

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía



**Optimización de la dosificación de
mercurio en la minería de oro artesanal
y a pequeña escala en Nambija, Ecuador**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Richard González Vásquez

Magíster en Administración Ambiental

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y
Energía

**Doctorado en Investigación, Modelización y Análisis del
Riesgo en Medio Ambiente**

Optimización de la dosificación de mercurio en la minería de oro artesanal y a pequeña escala en Nambija, Ecuador

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Richard González Vásquez

Magíster en Administración Ambiental

Bajo la dirección de:

Dr. M^a Jesús García Martínez

Dr. David Bolonio Martín

Madrid, 2024

Título: Optimización de la dosificación de mercurio en la minería de oro artesanal
y a pequeña escala en Nambija, Ecuador

Autor: Richard González Vásquez

Programa de Doctorado: Investigación, Modelización y Análisis del Riesgo
en Medio Ambiente

Dirección de tesis:

Dr. M^a Jesús García Martínez (Director)

Dr. David Bolonio Martín (Director)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Tribunal nombrado por el Magnífico Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día____
de_____.

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día_____de_____de _____
en Madrid, habiendo obtenido la calificación de _____

El presidente,

El secretario,

Los vocales,

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a mis Directores de Tesis, D^a. M^a Jesús García Martínez, PhD, y D. David Bolonio Martin, PhD. Su paciencia, dedicación, motivación, criterio y ayuda han sido invaluable para culminar esta etapa en mi vida. Han hecho lo difícil fácil y ha sido un privilegio contar con su guía y apoyo.

También quiero agradecer a los representantes de la Universidad Politécnica de Madrid - UPM por su atención y apoyo en mi vida como alumno de doctorado.

Quiero agradecer a todas las personas que, de una u otra manera, han sido clave en mi vida profesional. Agradezco especialmente a mi familia por su apoyo incondicional, ya que han sido un símbolo de esfuerzo y dedicación en busca de un mejor mañana. Agradezco a todos quienes han contribuido a mi crecimiento y éxito.

Gracias a todos ...

Dedicatoria:

A Dios ...

A mi familia por su apoyo incondicional; en especial a mi padre Ángel, a mi madre María Antonieta (+) por inculcarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y como recompensa de sus más grandes sacrificios.

A mi esposa Rosita mi apoyo, a mis hijos Bryan y Elian lo mejor de mi existencia.
A mis hermanos, por estar siempre ahí ...

Richard

ÍNDICE

RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT	XV
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. LEGISLACIÓN MINERA DE ORO EN ECUADOR Y CONVENIOS INTERNACIONALES.....	7
1.1.1. <i>Extracción en Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE)</i>	9
1.1.2. <i>Extracción en minería de Gran Escala</i>	11
1.1.3. <i>Prohibición del uso del mercurio</i>	12
1.1.4. <i>¿Por qué se sigue usando mercurio?</i>	14
1.1.5. <i>Experiencias exitosas de eliminación del uso de mercurio en la minería de oro</i>	15
1.2. MÉTODOS DE MINERÍA DE ORO	17
1.2.1. <i>Minería a cielo abierto</i>	18
1.2.2. <i>Minería subterránea</i>	20
1.3. TÉCNICAS Y PROCESOS MINERALÚRGICOS PARA LA RECUPERACIÓN DEL ORO	22
1.3.1. <i>Flotación</i>	22
1.3.2. <i>Gravimetría</i>	24
1.3.3. <i>Lixiviación</i>	25
1.3.3.1. <i>Biolixiviación</i>	28
1.3.3.2. <i>Lixiviación con cianuro</i>	29

1.3.4. Recuperación electrolítica	30
1.3.5. Amalgamación	31
1.4. AMALGAMACIÓN DE ORO CON MERCURIO	35
1.4.1. Progresos en la técnica de amalgamación	38
1.5. IMPACTOS DE LA MINERÍA DE ORO CON MERCURIO	41
1.5.1. Contaminación por mercurio	42
1.5.2. Afectaciones a la salud humana.....	42
1.5.3. Degradación ambiental.....	43
1.5.4. Impactos sociales y laborales.....	44
1.6. PÉRDIDAS DE MERCURIO EN LOS PROCESOS DE AMALGAMACIÓN	44
1.6.1. Estrategias para el cambio de prácticas	46
2. OBJETIVOS	48
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	49
3.1. ANTECEDENTES.....	49
3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	51
3.2.1. Localización y aspectos geográficos.....	51
3.2.2. Caracterización geológica	55
3.2.3. Litología y Mineralización	58
3.3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	61
3.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO MINERO - ARTESANAL.....	62
3.4.1. Procesamiento tradicional	63

3.4.2. Descripción del proceso minero – artesanal dentro del área minera Nambija.....	65
3.4.3. Diagrama de flujo del proceso minero.....	85
3.5. SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO	86
3.6. METODOLOGÍA PARA DEFINIR EL TAMAÑO ADECUADO DE PARTÍCULA (MALLA)	87
3.6.1. Análisis granulométrico (mallas).....	90
3.7. METODOLOGÍA PARA DEFINIR EL APOORTE DE MERCURIO	91
3.8. MONITOREO DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE AMALGAMACIÓN A NIVEL MACRO	92
3.9. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE LOS EFLUENTES	95
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	98
4.1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO ADECUADO DE PARTÍCULA (MALLA ÓPTIMA DE MOLIENDA)	98
4.1.1. Liberación de Au, con un tiempo de molienda de 80 min	99
4.1.2. Liberación de Au, con un tiempo de molienda de 100 min	102
4.1.3. Liberación de Au, con un tiempo de molienda de 120 min	104
4.1.4. Liberación de Au, con un tiempo de molienda de 140 min	107
4.1.5. Molienda de verificación (tiempo de molienda de 120 min).....	110
4.2. DETERMINACIÓN DEL APOORTE ADECUADO DE MERCURIO	115
4.2.1. Dosificación de mercurio en el molino de barras	115
4.3. MONITOREO DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE AMALGAMACIÓN A NIVEL MACRO EN PLANTA	117

4.3.1. Concentración y recuperación de Au-Hg del molino chileno.....	119
4.3.2. Destilación y recuperación de mercurio en retorta	123
4.3.3. Recuperación de oro de la arena del bayetas y tanque de sedimentación	126
4.3.4. Eficiencia operativa en los molinos chilenos.....	131
4.3.5. Otras Pérdidas de mercurio en planta.....	137
4.4. ANÁLISIS DE CALIDAD DE LOS EFLUENTES.....	138
5. CONCLUSIONES.....	140
6. LINEAS FUTURAS.....	143
7. BIBLIOGRAFÍA.....	147
8. ANEXOS.....	155
8.1. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LOS EFLUENTES	155
8.1.1. Parámetros físico – químicos in situ.....	158
8.1.2. Resultados muestreo pre optimización	160
8.1.3. Resultados muestreo post optimización.....	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área minera Nambija.....	52
Figura 2. Vista panorámica del área minera Nambija (Condominio norte)	53
Figura 3. Imagen satelital de las minas de Nambija. (Fuente: Google Earth)	54
Figura 4. Mapa geológico del área minera Nambija.....	57
Figura 5. Cuarcita verde (alteración epidótica), asociada a una vetilla.....	59
Figura 6. Skarn de epidota con mineralización de oro diseminada.....	59
Figura 7. Laboreo minero subterráneo.....	65
Figura 8. Laboreo minero a cielo abierto	66
Figura 9. Cintas trasportadoras (stock pile)	68
Figura 10. Extracción mineral (wincha).....	68
Figura 11. Tarabita (transporte aéreo de mineral).....	69
Figura 12. Vagón minero “burra” (minería subterránea).....	70
Figura 13. Adaptación para transporte de mineral (minería a cielo abierto).....	70
Figura 14. Trituradora de mandíbulas.....	71
Figura 15. Instalación (tipo) de Planta de beneficio mineral, dentro del área minera.....	72
Figura 16. Planta de beneficio en el C. Norte, con un sistema de descarga directa de relaves	73
Figura 17. Molino MIM, en funcionamiento (pulpa)	74
Figura 18. Malla de descarga (rejilla), molino tipo chileno	74
Figura 19. Lavado de bayetas, previa concentración.....	75
Figura 20. Lavado del molino de barras (liquidación).....	76
Figura 21. Lavado del molino chileno (liquidación).....	77
Figura 22. Recuperación y concentración de la amalgama (cernido).....	77
Figura 23. Baldeado (concentración por densidad).....	78

Figura 24. Concentrador centrífugo genérico (concentración por densidad).....	78
Figura 25. Platoneo (bateo manual).....	79
Figura 26. Eliminación de remanentes de hierro (imán).....	80
Figura 27. Extracción el exceso de mercurio (exprimido)	81
Figura 28. Limpieza y lavado de la amalgama	81
Figura 29. Amalgama (esponja de oro), previo al quemado	82
Figura 30. Quemado de la amalgama en la retorta (separación Au-Hg)	83
Figura 31. Quemado final (refinado)	83
Figura 32. Pesaje (producto final)	84
Figura 33. Diagrama de la operación minera e incidencia del mercurio	85
Figura 34. Localización de los puntos de muestreo en el área minera Nambija	86
Figura 35. Molino de barras (chancha)	89
Figura 36. Planta de Beneficio MiningAndos S.A., Sección 1 (molinos 1 y 2), stock mineral .	93
Figura 37. Planta MiningAndos S.A., Sección 2 (molinos 3 y 4); canalón, arena de bayetas.	94
Figura 38. Localización de los puntos de muestreo de agua	97
Figura 39. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda a 80 min.....	101
Figura 40. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda a 80 min (d80).....	102
Figura 41. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda a 100 min.....	103
Figura 42. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda a 100 min (d80).....	104
Figura 43. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda a 120 min.....	106
Figura 44. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda a 120 min (d80).....	107
Figura 45. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda a 140 min.....	109
Figura 46. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda a 140 min (d80).....	109
Figura 47. Curvas granulométricas resultantes de los cuatro tiempos de molienda	110
Figura 48. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda de verificación	112
Figura 49. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda de verificación (d80)	113

Figura 50. concentración mineral (lavado del molino)	121
Figura 51. Laboreo tradicional, recuperación de amalgama y mercurio de relaves	121
Figura 52. Recuperación de oro de bayetas y del tanque de arena, para las pruebas 1, 2, 3 y 4: a) Sección 1; b) Sección 2	129
Figura 53. Porcentaje de recuperación de Hg de bayetas y del tanque de arena, para las pruebas 1, 2, 3 y 4: a) Sección 1; b) Sección 2	130
Figura 54. Balances de Hg para las pruebas 1, 2, 3 y 4: a) Sección 1; b) Sección 2	134
Figura 55. Porcentaje (%) de extracción de oro, en relación al porcentaje (%) de mercurio alimentado, para las pruebas 1, 2, 3 y 4, en la Sección 1	136
Figura 56. Porcentaje (%) de extracción de oro, en relación al porcentaje (%) de mercurio alimentado, para las pruebas 1, 2, 3 y 4, en la Sección 2	136
Figura 57. Pérdidas de mercurio por el deficiente armado e instalación de un molino tipo chileno	137
Figura 58. Recuperación de mercurio presente en las bases del molino	138
Figura 59. Quebrada del “El Fierro”, drenaje principal del área minera Nambija	155
Figura 60. Drenaje secundario, afectado por efluente minero-sanitarios	156
Figura 61. Sector "La Soledad"	157
Figura 62. Canalones dispuestos en el sector “La Soledad”, quebrada del Fierro	157
Figura 63. Medición de los parámetros físico-químicos en drenajes	158
Figura 64. Afluente afectado por el vertimiento de residuos mineros	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Leyes de oro versus litología por sectores de Nambija	60
Tabla 2. Puntos de muestreo de agua y tipo de muestra	96
Tabla 3. Ensayo granulométrico, con un tiempo de molienda de 80 min.....	100
Tabla 4. Ensayo granulométrico, con un tiempo de molienda de 100 min.....	102
Tabla 5. Ensayo granulométrico, con un tiempo de molienda de 120 min.....	105
Tabla 6. Ensayo granulométrico, con un tiempo de molienda de 140 min.....	107
Tabla 7. Ensayo granulométrico de verificación, tiempo de molienda 120 min	111
Tabla 8. Resultados de las pruebas de distribución granulométrica	113
Tabla 9. Recuperación de oro por amalgamación en función del tiempo de molienda	114
Tabla 10. Dosificación de mercurio y rendimiento de la operación	116
Tabla 11. Test de Tukey. Tiempo de molienda (min)	117
Tabla 12. Test de Tukey. Mercurio introducido (g)	117
Tabla 13. Balance de mercurio del proceso de molienda-amalgamación (molino)	123
Tabla 14. Balance de mercurio recuperado de la amalgama y extracción de Au	125
Tabla 15. Balance de mercurio recuperado del bayeteado y de los tanques de sedimentación y del rendimiento con respecto al ensayo 1 en las 2 secciones de molinos.	128
Tabla 16. Balance de recuperación y pérdidas de mercurio de los ensayos molienda-amalgamación	133
Tabla 17. Valores de parámetros físico-químicos medidos, in situ	158
Tabla 18. Resultados de los análisis de metales pesados de las muestras base de agua	160
Tabla 19. Resultados de análisis de metales pesados en muestreo de agua post intervención .	161

RESUMEN

La minería artesanal de oro es una de las principales fuentes contaminación por mercurio en todo el mundo, debido a la separación o concentración por amalgamación que aún se utiliza para recuperar el oro directamente del mineral de mena.

En Nambija, los mineros artesanales utilizan mercurio para la concentración y recuperación de oro. El mercurio se adhiere al oro, formando una amalgama que facilita su separación de la roca. Esta investigación observa y monitorea las tareas que afectan directamente a la manipulación y el uso del mercurio durante el proceso de molienda - amalgamación por parte de los mineros. Proporcionamos alternativas viables para reducir la liberación de mercurio al medio ambiente.

Las pruebas de molienda se llevaron a cabo inicialmente en un molino de barras llamado "chancha" para una variedad de tamaños de partícula del mineral, en función del tiempo. Estos ensayos determinaron el tiempo de molienda y la granulometría óptima que extrae el oro en mayor proporción. Una vez optimizada la granulometría, se realizaron pruebas a nivel macro en una planta de procesamiento, sobre ciclos completos de molienda en molinos chilenos.

Se demostró que reduciendo la dosificación de mercurio en el proceso de molienda amalgamación, se puede conseguir una mayor recuperación de oro y se reducen las pérdidas de mercurio. Se determinó que la fracción mineral que libera más oro ocurre cuando el 62,12% del material es pasante a la malla #120 (125 μm). Este tamaño de partícula se consigue con un molino amalgamador de barras "chancha" y un tiempo de molienda de 120 minutos.

En cuanto a la dosificación de mercurio (Hg) para el mineral procesado, se ha comprobado que la cantidad adecuada para alimentar un molino amalgamador de barras "chancha" es de 340,5 g. Esto permite reducir en un 25% la cantidad de mercurio utilizada por los mineros artesanales en cada ciclo de trabajo, con una recuperación de oro del $57 \pm 0,5\%$.

Las pruebas con los molinos chilenos, demuestran que es posible reducir la cantidad de mercurio utilizada en el proceso de molienda hasta en un 18% al día, considerando las características del mineral y el funcionamiento de estos equipos. La optimización del proceso de molienda amalgamación y la reducción de la dosificación de mercurio son aspectos clave para mejorar la recuperación de oro y reducir las pérdidas de mercurio en la minería del oro. Esto permite lograr una mayor eficiencia en la recuperación de oro al tiempo que se reduce el uso de mercurio en la fuente.

Este estudio en minería artesanal analiza el alcance de la liberación de minerales como un factor para optimizar la recuperación de oro y reducir las emisiones de mercurio en la minería del país. Los métodos y técnicas utilizados en este estudio son viables y factibles, lo que significa que podrían replicarse en otras minas de oro para lograr una mayor eficiencia en la recuperación del mineral y reducir las emisiones antropogénicas de mercurio.

ABSTRACT

Artisanal gold mining is one of the main sources of mercury contamination worldwide, due to the separation or concentration by amalgamation that is still used to recover gold directly from the ore mineral.

In Nambija, artisanal miners use mercury for gold concentration and recovery. The mercury adheres to the gold, forming an amalgam that facilitates its separation from the rock. This research observes and monitors tasks that directly affect the handling and use of mercury during the milling-amalgamation process by the miners. We provide viable alternatives to reduce the release of mercury into environment.

Initially, grinding tests were carried out in a rod mill called a "chancha" for a variety of ore particle sizes as a function of time. These tests determined the grinding time and the optimal granulometry that extracts the gold in greater proportion. Once the granulometry was optimized, tests were carried out at the macro level in a processing plant, on complete grinding cycles in Chilean mills

It was shown that by reducing the dosage of mercury in the milling-amalgamation process, greater gold recovery can be achieved and mercury losses are reduced. It was determined that the mineral fraction that releases the most gold occurs when 62,12% of the material is passed through the mesh #120 (125 μm). This particle size is achieved with a "chancha" bar amalgamator mill and a grinding time of 120 minutes.

Regarding the mercury (Hg) dosage for the processed ore, it has been found that the optimal amount to feed a "chancha" bar amalgamator mill is 340,5 g. This allows the amount of mercury used by artisanal miners to be reduced by 25% in each work cycle, with a gold recovery of $57 \pm 0,5\%$.

Tests with Chilean mills shown that it is possible to reduce the amount of mercury used

in the grinding process by up to 18% per day, based on the characteristics of the ore and the operation of this equipment. The optimization of the amalgamation milling process and the reduction of mercury dosage are key aspects to improve gold recovery and reduce mercury losses in gold mining. This allows achieving higher gold recovery efficiency while reducing mercury use at the source. Optimizing the grinding-amalgamation process and reducing mercury dosing are key factors to improve gold recovery and reduce mercury losses in gold mining.

This study in artisanal mining analyzes the scope of mineral release as a factor to optimize gold recovery and reduce mercury emissions in the county's mining. The methods and techniques used in this study are viable and feasible, which means that they could be replicated in other gold mines to achieve greater efficiency in mineral recovery and reduce anthropogenic mercury emissions.

1. INTRODUCCIÓN

La minería de oro es una industria global que ha tenido un crecimiento sostenido en la última década, con un aumento acumulativo del 20% desde el año 2013. En el año 2023, la producción mundial de oro alcanzó las 3634.10 Tm (Statista Search Department, 2024). Este crecimiento se ha visto impulsado por una serie de factores como: el aumento del precio del oro, el crecimiento de la demanda y el desarrollo de nuevas tecnologías. Esta es una actividad económica que se ha llevado a cabo desde tiempos antiguos y que sigue siendo relevante hoy en la actualidad. Se trata de un proceso que comienza con la extracción del mineral, su transporte y su posterior procesamiento para obtener el oro que contiene. A lo largo de la historia han existido varias maneras de extraer este mineral.

A nivel mundial, la minería de oro es responsable del 38% de las emisiones anuales de mercurio (Stephen, L., 2023). Cada día se liberan grandes cantidades de Hg a la atmósfera en diferentes partes del mundo. Los países que liberan mayores cantidades de mercurio a nivel mundial son China (240-650 toneladas Hg/año), Indonesia (130-160 toneladas Hg/año) y Colombia (50-100 toneladas Hg/año). Esto, aunado a las inadecuadas condiciones de trabajo (Lydia et al., 2022), el uso de tecnologías deficientes y contaminantes y la aplicación de procedimientos rudimentarios (Kosai et al., 2023), ha provocado, no solo una disminución en la recuperación de minerales, sino también un aumento en el uso de mercurio (Hg) en los procesos de recuperación mineral, principalmente en las actividades mineras informales (Mestanza-Ramón et al., 2022).

Se estima que más de 10 millones de personas, incluidas mujeres y niños, participan directamente en esta actividad. Al mismo tiempo que produce alrededor del 10-15% del oro total mundial (Vergara-Murillo et al., 2022; Delgado Jiménez et al. 2022), lo que la convierte en una de las fuentes de minerales metálicos más importantes del planeta (Jiménez-Oyola et al., 2021).

Ahora bien, algunos estudios han demostrado que esta actividad minera es una herramienta importante para crear medios de vida sostenibles y reducir la pobreza (Bester, 2023).

Por otro lado, la minería de oro artesanal es una actividad que se caracteriza por una extracción a través de métodos rudimentarios e intensivos en mano de obra ya que, a menudo, los mineros utilizan herramientas y técnicas simples para extraer el oro (A. Sana et al., 2017). Especialmente en los países ricos en recursos minerales, se considera la minería artesanal como un sector económico tan importante como la misma minería a gran escala (Mwandiringana y Ye, 2023), jugando ésta un rol fundamental en la economía; en razón de que la minería de oro, sigue y seguirá siendo una fuente importante de ingresos y empleo en muchas regiones del mundo.

En Ecuador, la pequeña minería y minería artesanal de oro se concentra en varias provincias. Según un informe publicado en El Telégrafo (Ec), las provincias de Azuay y El Oro concentran el 86% de la producción nacional de oro, siendo las principales productoras de oro del país. En estas dos provincias se registran 237 concesiones de pequeña minería metálica, con Azuay y El Oro alcanzando una producción de oro del 72% y 17% del total nacional, respectivamente. En 2018, Ecuador registró una producción nacional de alrededor de 3,4 millones de gramos de oro proveniente de ocho provincias. El Oro y Azuay tienen el mayor aporte con 2,9 millones de gramos, equivalente al 86% de la producción nacional. En el año 2022, las exportaciones de oro de la pequeña minería alcanzaron USD 751,35 millones (Statista, 2024). En la provincia de Zamora Chinchipe, los principales sectores donde se desarrolla minería a pequeña escala y/o minería artesanal son: Nambija, Chinapintza y Guaysimi (minas); sin embargo, también existen proyectos mineros a gran escala que contribuyen a la producción total de oro en el país asociadas a la explotación de las minas Fruta del Norte (concesión “La Zarza”) y Mirador (concesión “Mirador 1”).

La minería de oro en Ecuador ha generado un intenso debate debido a su impacto

ambiental y social. Mientras algunos defienden la posibilidad de una minería sostenible, otros expresan preocupación por los riesgos para la salud y el medio ambiente asociados a esta actividad. Una expresión que refleja esta oposición es la de "agua u oro", que se ha difundido en varios países de Sudamérica (Vásconez, M. & Torres, L., 2018). Sin embargo, el sector de la minería aurífera artesanal y en pequeña escala (MAPE) también enfrenta desafíos y oportunidades de mejora; ya que los mineros tienen un acceso limitado a la tecnología, aunado a que: mayoritariamente las condiciones de trabajo son precarias, a la falta de conocimiento técnico, al bajo rendimiento de producción y a la poca formalización legal e institucional. Hay que mencionar también que, la minería artesanal y en pequeña escala está asociada con la contaminación causada por sustancias químicas peligrosas como el mercurio.

La minería de oro con la técnica de la amalgamación es la principal fuente de contaminación por mercurio en el mundo. Se estima que la minería artesanal y a pequeña escala, que utiliza mercurio para extraer oro, liberan al ambiente más de 2000 t de mercurio al año; el proceso de minería de oro con mercurio se divide en tres etapas: extracción del mineral, mezclado con mercurio (amalgamación) y separación de la amalgama.

La extracción y recuperación de oro mediante la amalgamación, es un método que consiste en capturar el oro (Au), utilizando mercurio (Hg) (Jonkman & Theije, 2022). El mercurio, es un elemento tóxico no esencial que se presenta en la naturaleza en tres formas: mercurio inorgánico, orgánico y elemental, siendo este último utilizado en la minería artesanal (Jiménez-Oyola et al., 2020; Torkaman et al., 2021). Por otro lado, la utilización de la técnica de amalgamación en la pequeña minería plantea serios desafíos debido a sus impactos negativos en el ambiente y la salud, lo que demanda la adopción de medidas para su eliminación y el fomento de prácticas más responsables.

A pesar de que el uso de mercurio en la minería está prohibido en muchos países, incluido Ecuador, debido a sus efectos nocivos, es importante considerar que esta práctica sigue

siendo aún la única opción viable para el beneficio de oro en algunas regiones. Esto se debe a que requiere menos tecnología e inversión, lo que significa que se podría continuar con su uso durante mucho tiempo (Almeida Rodríguez et al., 2019).

Las investigaciones en este campo pueden abordar el cómo mejorar la eficiencia de la separación y la manipulación segura del mercurio. En ciertas operaciones mineras se ha logrado algunos avances sobre el terreno, ya que la destilación del mercurio, que anteriormente se realizaba al aire libre, ahora se puede recuperar mediante sencillas y económicas retortas (Veiga y Gunson, 2020). Las retortas son equipos que retienen el Hg antes de que se libere como gas al medio ambiente durante el proceso de quemado (Cruz y Vega, 2021). Aunque este dispositivo es de gran ayuda para recuperar el mercurio, las pérdidas durante el proceso de amalgamación y en los relaves producto, en más de 70 países dedicados a la minería artesanal como ya se ha mencionado asciende a 2000 toneladas de Hg/año (Hinton et al., 2003; Torkaman y Veiga, 2022). Esto implica que es fundamental realizar este tipo de procedimientos con las precauciones de seguridad adecuadas para evitar la exposición a vapores o al contacto directo con el mercurio.

De otra parte, las consecuencias negativas de la minería informal no siempre son atribuibles a malas prácticas técnicas, sino también a las circunstancias socioeconómicas de los mineros (Semsari Parapari et al., 2022). Además, el grado de liberación mineral es un aspecto importante que incluso las empresas mineras a gran escala consideran en el proceso de molienda (Carling et al., 2013); en razón de que, una molienda ineficiente puede resultar en una liberación deficiente del mineral o en una pulverización excesiva del mercurio, lo cual puede ser perjudicial. Sin embargo, muchos mineros artesanales no consideran este aspecto, lo que se convierte en uno de los retos de la industria minera.

En Ecuador, la minería de oro con mercurio es una actividad importante, especialmente en la provincia de Zamora Chinchipe. El distrito minero de Nambija es, junto a Portovelo y Ponce

Enríquez, una de las tres áreas donde se centra la minería aurífera subterránea (Appleton et al., 2001). La mayor parte del oro, se extrae por el método de la amalgamación (Ramírez Requelme et al., 2003). Este aspecto es preocupante, ya que a pesar de haberse prohibido el uso del mercurio desde el año 2013, se sigue liberando al medio ambiente en los procesos de separación y recuperación de oro (minería informal), perjudicando la salud humana y los ecosistemas (Gonçalves et al., 2017; Morgan et al., 2021).

En la actualidad, varios depósitos de oro continúan siendo explotados por operaciones mineras informales en Ecuador, a pesar de las prohibiciones y regulaciones existentes en el país (MAE-PRAS Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2021). Se estima que existen más de 10.000 mineros artesanales que utilizan mercurio para extraer oro. Aunque el gobierno ecuatoriano ha tomado medidas para reducir el uso del mercurio en la minería de oro, estas medidas no se han aplicado de manera efectiva y la minería de oro con mercurio sigue siendo una práctica común.

La problemática asociada a la operación de beneficio mineral en circuito abierto, donde la alimentación mineral y la dosificación de mercurio se realizan arbitrariamente y/o dependiendo de la experiencia de los operadores (molineros), incide en la liberación de mercurio no utilizado al medio ambiente. Esta liberación de mercurio puede persistir durante largos periodos de tiempo, acumulándose y generando impactos ambientales y para la salud.

La extracción de oro mediante el proceso de amalgamación puede generar la liberación de partículas durante la molienda y amalgamación del mineral. Estas partículas pueden escapar del proceso de recuperación y ser descargadas junto con los residuos de la extracción, conocidos como colas o relaves. En muchos casos, estos residuos son arrojados directamente al medio ambiente, lo que puede resultar en la acumulación de sedimentos que contienen metales pesados en los cuerpos de agua naturales. En este sentido, es importante considerar las implicaciones ambientales y de seguridad asociadas con la manipulación segura del

mercurio, así como también la disposición de las amalgamas resultantes para minimizar la contaminación ambiental y los riesgos para la salud humana. Lamentablemente, el reemplazo de la amalgamación por otra técnica en las operaciones de la pequeña minería se considera poco probable, ya que la amalgamación se percibe como un método sencillo y efectivo. A pesar de las alternativas tecnológicas propuestas para reemplazar el uso de mercurio en la extracción de oro, como las técnicas gravitacionales, la flotación espumante, y la lixiviación en pilas.

1.1. LEGISLACIÓN MINERA DE ORO EN ECUADOR Y CONVENIOS INTERNACIONALES

El marco legislativo para la minería en Ecuador se rige por la Constitución de la República y diversas leyes y reglamentos, incluida la Ley Orgánica de Reforma a la Ley de Minería y otras leyes relacionadas. La Ley de Minería vigente (2014), tiene como objetivo regular la exploración, explotación y procesamiento de recursos minerales en el país. El Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables es el encargado de implementar y hacer cumplir la Ley de Minería.

La Ley de Minería establece los requisitos para la obtención de concesiones mineras, las cuales son otorgadas por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. Las concesiones se otorgan por un período de hasta 30 años, con posibilidad de renovación por igual período. La Ley de Minería también establece los requisitos para la evaluación de impacto ambiental y el pago de regalías e impuestos.

El uso de mercurio en la extracción de oro está regulado por la Ley de Minería y otras normas conexas como la Ley de Gestión Ambiental. Estas leyes establecen requisitos para el manejo de sustancias peligrosas, incluido el mercurio, así como para el manejo de los desechos generados durante la extracción de oro, incluyendo la minimización del uso de mercurio y la eliminación adecuada de los desechos que contienen mercurio.

A nivel internacional, la principal normativa sobre el uso del mercurio es el Convenio de Minamata, que es un tratado global destinado a reducir el uso de mercurio en la extracción de oro, adoptado en 2013, tiene como objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente de los riesgos asociados al mercurio (Fajardo, F.A., 2015). El Convenio de Minamata incluye una serie de medidas para reducir el uso del mercurio, como:

- Prohibición de la producción, importación y exportación de mercurio
- Eliminación gradual del uso del mercurio en productos y procesos industriales
- Control de las emisiones de mercurio al aire y al agua
- Eliminación de forma segura de los residuos que contienen mercurio

Estas normativas varían de un país a otro, pero generalmente incluyen medidas similares.

En Ecuador, se ha prohibido definitivamente el uso de mercurio en actividades mineras. Esta prohibición está estipulada en una ley orgánica y es parte de la implementación del plan "cero mercurio" firmado en enero de 2024. Esta medida refleja la política nacional del país en línea con la tendencia mundial de la industria minera.

La prohibición del uso de mercurio en actividades mineras en Ecuador se establece en la Ley de Minería reformada en 2014. En la página 32 de esta ley, se encuentra un artículo que prohíbe el uso de mercurio. "Sin perjuicio de la aplicación de la normativa minero ambiental, se prohíbe el uso del mercurio en el país en actividades mineras, de acuerdo a los mecanismos que la autoridad ambiental nacional establezca para el efecto, en conjunto con las instituciones con potestad legal sobre la materia.

La inobservancia a esta prohibición será sancionada con la revocatoria del derecho minero, sin perjuicio de las sanciones de orden penal a las que hubiere lugar".

Además, la Disposición Transitoria Tercera de la Ley Orgánica Reformatoria a la Ley de

Minería, en la página 58, también hace referencia a la prohibición del uso de mercurio en actividades mineras. “Para la erradicación del uso de mercurio en las actividades mineras, las personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras y los titulares de derechos mineros, a partir de la vigencia de la presente ley y durante el plazo de dos años, deberán aplicar métodos alternativos que permitan eliminar dicha sustancia de manera progresiva en los procesos de recuperación del mineral”.

Así mismo, dentro de la legislación ecuatoriana, en el Reglamento Ambiental de Actividades Mineras (RAAM 2016) vigente, en el Artículo 108 se hace referencia al uso de mercurio en operaciones mineras.

Art. 108. Uso del mercurio en operaciones mineras.- “El titular minero deberá buscar alternativas técnico-ambientales que eliminen el uso de mercurio, conforme a lo establecido en la Tercera Disposición Transitoria de la Ley Orgánica Reformatoria a la Ley de Minería.

La inobservancia de la prohibición de uso de mercurio será sancionada con la revocatoria de la licencia ambiental o del registro ambiental, según el caso, sin perjuicio de la aplicación de lo estipulado en el Art. 17 de la Ley Orgánica Reformatoria a la Ley de Minería, a la Ley Reformatoria para la Equidad Tributaria en el Ecuador, y a la Ley Orgánica de Régimen Tributario Interno y las sanciones administrativas, civiles y penales a las que hubiere lugar.

La importación, comercialización, tenencia y uso de mercurio para las actividades mineras, estará sujeto a las disposiciones establecidas en la normativa aplicable”.

1.1.1. Extracción en Minería Artesanal y de Pequeña Escala (MAPE)

En la ley de minería ecuatoriana (vigente) en el Título IX, DE LOS REGIMENES ESPECIALES; CAPITULO I, DE LA MINERÍA ARTESANAL Y DE SUSTENTO; se hace referencia a este apartado en razón de que el área minera de Nambija ha sido objeto de atención

debido a la actividad de pequeña minería que se lleva a cabo en la zona.

Art. 134. Minería artesanal.- “Para fines de aplicación de la presente Ley y en concordancia con las normas de la Ley Orgánica de la Economía Popular y Solidaria y del Sector Financiero Popular y Solidario, la denominación de "minería artesanal" comprende y se aplica a las unidades económicas populares, los emprendimientos unipersonales, familiares y domésticos que realicen labores en áreas libres.

Las actividades en minería artesanal se caracterizan por la utilización de maquinarias y equipos con capacidades limitadas de carga y producción de conformidad con el instructivo aprobado por el directorio de la Agencia de Regulación y Control Minero destinados a la obtención de minerales, cuya comercialización en general permita cubrir las necesidades de la comunidad, de las personas o grupo familiar que las realiza, únicamente, dentro de la circunscripción territorial respecto de la cual se hubiere otorgado el correspondiente permiso.

Por su naturaleza, las actividades de minería artesanal, no están sujetas al pago de regalías ni de patentes, pero si sujetas al régimen tributario, para garantizar los ingresos que corresponden al Estado.

El Ministerio Sectorial podrá otorgar permisos por un plazo de hasta 10 años para realizar labores de minería artesanal, renovables por períodos iguales siempre que exista, petición escrita antes de su vencimiento y que tenga informe favorable de la Agencia de Regulación y Control Minero y del Ministerio del Ambiente.

Los permisos que se otorguen para labores subterráneas de minería artesanal, no podrán exceder de 4 hectáreas mineras, ni de 6 hectáreas para labores a cielo abierto. Se prohíbe en forma expresa el otorgamiento de más de un permiso a una misma persona, para actividades en minería artesanal, así como también, la realización de labores en forma directa o por interpuestas personas ajenas a las localidades en las que se realicen tales labores.

“... Para fines de control y adecuado manejo ambiental los permisos de minería artesanal otorgados para la explotación de minerales metálicos, con excepción de la explotación de depósitos aluviales, estará limitada a labores de extracción. Su procesamiento deberá efectuarse en plantas que cuenten con la debida autorización para su instalación y operación, además con la licencia ambiental que el caso requiere”.

En el artículo incluido en la página 47 se establecen las capacidades de producción y procesamiento para la minería artesanal de material mineralizado. Estas capacidades varían según el tipo de mineral y los métodos de explotación utilizados. A continuación se detallan las capacidades establecidas. “En consideración a la diferente naturaleza y concentración de los minerales y en función de la distribución de la mineralización, así como de los métodos de explotación y/o procesamientos técnicamente seleccionados para su aprovechamiento racional, se establecen las siguientes capacidades de producción bajo el régimen de minería artesanal de material mineralizado: a) Para minerales metálicos: Hasta 10 toneladas por día en minería subterránea y 120 metros cúbicos por día en minería de aluviales; b) Para minerales no metálicos: Hasta 50 toneladas por día; c) Para materiales de construcción: Hasta 100 metros cúbicos por día para minería de aluviales o materiales no consolidados; y, 50 toneladas métricas por día en minería a cielo abierto en rocas duras”.

1.1.2. Extracción en minería de Gran Escala

En la legislación ecuatoriana, en el artículo incluido (página 46) se hace referencia a que la **minería en gran escala** se considera aquella que supera los volúmenes máximos establecidos para la modalidad de mediana minería. Según la ley, los volúmenes de producción en la modalidad de gran minería están sujetos a los siguientes rangos: “Los volúmenes de producción en la modalidad gran minería, estarán sujetos a los siguientes rangos: a) Para minerales metálicos: > 1000 toneladas por día en minería subterránea; > 2000 toneladas por

día en minería a cielo abierto; y, > 3000 metros cúbicos por día en minería aluvial; b) Para minerales no metálicos: > 3000 toneladas por día; y, c) Para materiales de construcción: > 2000 metros cúbicos para minería en terrazas aluviales; y, > 1000 toneladas métricas en minería a cielo abierto en roca dura (cantera).

En el artículo incluido (página 45), en referencia a la **mediana minería** “Se considera mediana minería aquella que, en razón del tamaño de los yacimientos dependiendo del tipo de sustancias minerales metálicas y no metálicas, se ha llegado a cuantificar reservas que permitan efectuar la explotación de las mismas por sobre el volumen de procesamiento establecido para el régimen especial de pequeña minería y hasta el volumen establecido”.

En referencia a los **volúmenes de producción** (página 46), “Los volúmenes de producción en la modalidad de mediana minería, estarán sujetos a los siguientes rangos: a) Para minerales metálicos: De 301 hasta 1000 toneladas por día en minería subterránea; de 1001 hasta 2000 toneladas por día en minería a cielo abierto; y, desde 1501 hasta 3000 metros cúbicos por día en minería aluvial; b) Para minerales no metálicos: Desde 1001 hasta 3000 toneladas por día; y, c) Para materiales de construcción: Desde 801 hasta 2000 metros cúbicos para minería en terrazas aluviales; y, desde 501 hasta 1000 toneladas métricas en minería a cielo abierto en roca dura (cantera)”.

1.1.3. Prohibición del uso del mercurio

La prohibición o restricción del uso del mercurio se ha llevado a cabo debido a sus impactos altamente nocivos para la salud humana y el medio ambiente, como una medida necesaria para proteger el medio ambiente, la salud humana y promover prácticas mineras más sostenibles y responsables. Sin embargo, a pesar de esta prohibición, el uso de mercurio en la minería artesanal y a pequeña escala en Ecuador aún es común, especialmente en las provincias de Esmeraldas, El Oro, Azuay y Zamora Chinchipe (Nambija). Las principales razones de su

producción son:

La toxicidad para la salud humana.- Como se ha dicho, el mercurio es altamente tóxico y puede tener efectos graves en la salud humana, especialmente en su forma orgánica, el metilmercurio. Lo que supone que la exposición al mercurio puede causar daño neurológico, problemas de desarrollo en niños, trastornos del sistema nervioso central, problemas reproductivos y otros problemas de salud.

La contaminación ambiental derivada.- El mercurio es un contaminante ambiental persistente. Las emisiones de mercurio a la atmósfera pueden depositarse en suelos y cuerpos de agua, donde se convierte en metilmercurio, un compuesto altamente tóxico que se acumula en organismos vivos a lo largo de la cadena alimentaria, causando daños en los ecosistemas acuáticos y afectando a la fauna y flora, y finalmente a los seres humanos que consumen pescado y otros alimentos contaminados.

Los impactos en la minería de oro.- El uso de mercurio en la minería artesanal y de pequeña escala para la extracción de oro tiene efectos devastadores. Si bien es eficaz para extraer oro, también contamina el medio ambiente y expone a los mineros a riesgos significativos para la salud.

Debido a estos impactos negativos, muchos países y organizaciones internacionales han trabajado para reducir y eliminar progresivamente el uso de mercurio. Se han implementado restricciones legales y acuerdos internacionales, como el Convenio de Minamata sobre Mercurio adoptado en 2013, que busca reducir las emisiones y liberaciones de mercurio, así como promover alternativas más seguras y sostenibles en la extracción de oro y en otras industrias.

Todo lo expuesto supone que las prohibiciones o restricciones al uso del mercurio están destinadas a proteger la salud humana y el medio ambiente, promoviendo el uso de tecnologías más seguras y prácticas más sostenibles en los procesos industriales para reducir los impactos nocivos del mercurio.

1.1.4. ¿Por qué se sigue usando mercurio?

A pesar de las prohibiciones y esfuerzos internacionales y nacionales para eliminar o restringir su uso, el mercurio continúa siendo utilizado en la minería de oro, especialmente en la minería artesanal y de pequeña escala, por varias razones, a pesar de sus riesgos y efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente. Las principales razones del porque se sigue usando son:

La disponibilidad y accesibilidad.- El mercurio es a menudo accesible y relativamente económico en comparación con otras alternativas para la extracción de oro, lo que lo hace atractivo para los mineros artesanales que buscan métodos económicos y simples para extraer oro de sus minerales.

La alta eficiencia en la extracción de oro.- La amalgamación con mercurio es un método eficaz para la extracción de oro en la minería artesanal. A pesar de sus riesgos, la amalgamación puede ser más simple y rápida en comparación con algunas de las alternativas más seguras y menos tóxicas.

La falta de acceso a tecnologías alternativas.- En muchas regiones, especialmente en áreas rurales y remotas, los mineros pueden tener limitado acceso a tecnologías alternativas más seguras para la extracción de oro. La falta de capacitación, recursos y acceso a estas alternativas contribuye a la persistencia del uso del mercurio opción viable para separar el oro de la ganga en la minería artesanal.

Por factores económicos y condiciones socioeconómicas.- Los mineros artesanales, en ocasiones, pueden carecer de opciones económicas viables y pueden estar operando en condiciones de pobreza o carencia de otras oportunidades laborales. El uso de mercurio puede ser considerado como la única opción disponible para ellos en ciertos contextos.

La falta de regulación o aplicación de normativas.- La falta de regulación o aplicación de normativas puede contribuir a la continuación del uso de mercurio en la minería,

a pesar de los riesgos conocidos. En algunos lugares, la regulación y la aplicación de leyes para prohibir el uso de mercurio en la minería pueden ser débiles o ineficaces.

Para reducir el uso de mercurio en la minería, se requieren estrategias integrales que aborden no solo la disponibilidad y accesibilidad de alternativas más seguras, sino también cuestiones socioeconómicas y regulatorias. La capacitación, la concientización sobre los riesgos del mercurio, el apoyo técnico y financiero, así como la implementación efectiva de regulaciones y políticas, son fundamentales para promover la adopción de prácticas más seguras y sostenibles en la extracción de oro.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que en la pequeña minería, la amalgamación con mercurio sigue siendo el método más utilizado y efectivo para separar el oro de otros minerales pesados. Reemplazar la amalgamación con otra técnica en las operaciones de la pequeña minería es raro, ya que la amalgamación es considerada el método más sencillo y efectivo en este contexto.

La falta de educación y concientización.- En algunas áreas mineras, los mineros no están informados sobre los riesgos del uso del mercurio ni las alternativas sostenibles disponibles para extraer oro sin causar daños ambientales o a la salud de los humanos, lo que puede perpetuar el uso de mercurio en la minería artesanal, a pesar de ser prohibido su uso por leyes y regulaciones locales e internacionales.

1.1.5. Experiencias exitosas de eliminación del uso de mercurio en la minería de oro.

Enmarcados dentro de las experiencias exitosas (programas, estrategias y resultados), se han logrado avances significativos en la reducción del uso de mercurio en varios países, como Colombia, Perú y Bolivia.

1. COLOMBIA:

- **Programa Nacional de Minería sin Mercurio:** Implementado desde 2013, ha logrado reducir el uso de mercurio en un 80%.
- **Estrategias:** Capacitación a mineros, entrega de equipos alternativos, la regularización de la actividad minera; y, apoyo a la investigación.
- **Resultados:** Disminución de la contaminación por mercurio, mejora de la salud de los mineros y desarrollo de alternativas sostenibles.

2. PERÚ:

- **Plan Nacional de Eliminación del Mercurio en la Minería de Oro:** Iniciado en 2010, busca eliminar el uso de mercurio para el año 2025.
- **Estrategias:** Prohibición gradual del mercurio, promoción de tecnologías limpias, apoyo a la reconversión laboral de los mineros y campañas de sensibilización.
- **Resultados:** Reducción significativa del uso de mercurio, avances en la formalización de la minería y desarrollo de nuevas oportunidades económicas para las comunidades.

3. BOLIVIA:

- **Programa Nacional de Reducción y Eliminación Progresiva del Mercurio en la Minería Aurífera:** Lanzado en 2010, busca eliminar el uso de mercurio para el año 2030.
- **Estrategias:** Implementación de tecnologías limpias, fortalecimiento de la institucionalidad ambiental, desarrollo de capacidades técnicas y promoción de la

participación social.

- **Resultados:** Avances en la reducción del uso de mercurio, mejora de la gestión ambiental y fortalecimiento de las organizaciones mineras artesanales.

4. ECUADOR:

- **Plan Nacional de Eliminación del Mercurio:** En proceso de elaboración y tiene como objetivo eliminar gradualmente el uso de mercurio en la minería de oro. Este plan ha sido presentado por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica y se ha cumplido con lo establecido en el Convenio de Minamata, siendo Ecuador el primer país de América Latina y el séptimo a nivel global en presentar este plan.
- **Estrategias:** La implementación de estrategias para abordar la aceptación de la prohibición del mercurio, el apoyo a la adopción de tecnologías limpias, la capacitación a mineros y la promoción de la formalización y regularización de la actividad minera.

LECCIONES APRENDIDAS:

- La eliminación del mercurio requiere un enfoque integral que combine medidas técnicas, económicas, sociales y ambientales.
- Es fundamental la participación activa de todos los actores involucrados, incluyendo gobiernos, mineros, comunidades locales y organizaciones internacionales.
- La cooperación internacional es clave para compartir experiencias, conocimientos y recursos.

1.2. MÉTODOS DE MINERÍA DE ORO

Existen varios métodos de minería de oro, que varían en función de la escala de la

operación minera, la naturaleza del depósito de mineral y las consideraciones ambientales y económicas; se pueden dividir en dos categorías principales: minería a cielo abierto y minería subterránea. Es importante mencionar que cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y desventajas en términos económicos, medioambientales y sociales (Lavandaio, E. O. L., 2014).

Las innovaciones técnicas han modificado radicalmente la minería a partir de la segunda mitad del siglo XX, de modo que se ha pasado del aprovechamiento de vetas subterráneas de gran calidad a la explotación en minas a cielo abierto, de yacimientos de menor calidad con minerales diseminados (Carrillo et al., 2010).

1.2.1. Minería a cielo abierto

Se utiliza para extraer oro de depósitos cercanos a la superficie; es una práctica común en la industria minera, que implica desmonte y remoción de grandes volúmenes de tierra y roca para llegar al mineral. La minería a cielo abierto es más económica y menos costosa en términos energéticos que la minería subterránea.

La minería de oro a cielo abierto, también conocida como minería a tajo abierto, es un método de extracción de oro que se realiza en la superficie terrestre. Se utiliza cuando el depósito de oro se encuentra cerca de la superficie, a diferencia de la minería subterránea que se emplea para yacimientos más profundos.

ETAPAS:

1. **Preparación:** Se remueve la capa superficial de tierra y vegetación para acceder al yacimiento (destape).
2. **Extracción:** Se utiliza maquinaria pesada como excavadoras y camiones (volquetes de gran tonelaje) para remover la roca y el material estéril producto del desarrollo y avance

de la explotación. Generalmente, se emplean explosivos para fragmentar la roca y obtener un tamaño adecuado para el carguío y transporte.

3. **Procesamiento:** El material extraído se tritura y se muele para separar el oro de la roca. Se utilizan diferentes métodos de procesamiento, como la flotación o la cianuración, para extraer el oro del mineral.
4. **Lixiviación:** Se utiliza una solución química para disolver el oro del mineral.
5. **Recuperación:** El oro se recupera de la solución mediante un proceso de electroobtención.

Ventajas de la minería a cielo abierto:

- Es un método más eficiente que la minería subterránea, ya que permite la extracción de grandes cantidades de material en poco tiempo.
- Los costos de operación son generalmente más bajos que en la minería subterránea.
- Es un método más seguro que la minería subterránea, ya que los trabajadores no están expuestos a los mismos riesgos de derrumbes o accidentes.

Desventajas de la minería a cielo abierto:

- Este método tiene un impacto ambiental significativo, ya que genera grandes cantidades de residuos, contamina el agua y el suelo, y destruye la vegetación.
- Se requiere una gran cantidad de agua para el procesamiento del mineral.
- La minería a cielo abierto puede desplazar a las comunidades locales y afectar su calidad de vida.

1.2.2. Minería subterránea

Se utiliza para extraer oro de depósitos más profundos; es un método que consiste en la excavación de galerías y túneles debajo de la superficie del terreno para extraer el mineral. Esta práctica es más costosa, pero se utiliza cuando los depósitos de oro están ubicados a profundidades mayores o en áreas donde la minería a cielo abierto podría causar daños ambientales significativos.

La minería de oro subterránea es un método de extracción que se utiliza cuando el depósito de oro se encuentra a una profundidad considerable, donde la explotación a cielo abierto no es viable o presenta riesgos mayores.

ETAPAS:

1. **Exploración:** Se realizan estudios geológicos para determinar la ubicación y el tamaño del yacimiento.
2. **Desarrollo:** Se construyen galerías mineras (túneles) y rampas para acceder al yacimiento.
3. **Extracción:** Se utilizan la perforación y voladura para el desarrollo de las galerías (mina) y para la fragmentación mineral para su posterior extracción.
4. **Transporte:** El mineral se transporta a la superficie camiones mineros subterráneos (dúmpers) a través de los túneles.
5. **Procesamiento:** El mineral se tritura y se muele para separar el oro de la roca. Se utilizan diferentes métodos de procesamiento, como la flotación o la cianuración, para extraer el oro del mineral, finalmente se obtienen barras dore (lingote) o concentrado.

Ventajas de la minería subterránea:

- Este método tiene un menor impacto ambiental que la minería a cielo abierto, ya que

genera menos residuos y no destruye la vegetación.

- Es un método más seguro que la minería a cielo abierto, ya que los trabajadores no están expuestos a los mismos riesgos de derrumbes.
- Puede ser un método eficiente para la extracción de oro en yacimientos profundos.

Desventajas de la minería subterránea:

- Los costos de operación son generalmente más altos que en la minería a cielo abierto.
- Los trabajadores están expuestos a riesgos de accidentes, como derrumbes, gases tóxicos y enfermedades pulmonares.
- Es un método más complejo que la minería a cielo abierto, ya que requiere de una mayor planificación y mano de obra especializada.

Aspectos adicionales a considerar:

- La minería subterránea puede tener un impacto social positivo al generar empleos y oportunidades económicas en las comunidades locales. Sin embargo, también puede tener impactos negativos, como el desplazamiento de las comunidades y la degradación del medio ambiente.
- Se están desarrollando nuevas tecnologías emergentes para la minería subterránea que pueden mejorar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad de este método de extracción.

La elección del método más adecuado para recuperar oro dependerá de una serie de factores, como:

- Tipo de depósito mineral: La técnica de extracción dependerá de si el oro se encuentra en un depósito aluvial, en una veta o en un depósito diseminado.

- Ley del mineral: La ley del mineral es la cantidad de oro que se encuentra en una tonelada de mineral.
- Costo del proceso: El costo del proceso debe ser comparado con el valor del oro recuperado.
- Impacto ambiental: El impacto ambiental del proceso debe ser considerado.

1.3. TÉCNICAS Y PROCESOS MINERALÚRGICOS PARA LA RECUPERACIÓN DEL ORO

Las técnicas y procesos mineralúrgicos más utilizados para la recuperación del oro incluyen la lixiviación in situ (LIS), la flotación, y la concentración gravimétrica. La LIS implica dejar el mineral en el lugar donde se encuentra en el suelo y recuperar los minerales, disolviéndolos y bombeando la solución concentrada hacia la superficie, donde se pueden recuperar los minerales, se utiliza para la extracción de minerales de baja ley. La flotación es un proceso físico-químico que se utiliza para separar minerales finamente molidos, donde el oro se adhiere a burbujas generadas por la adición de aire en celdas de flotación; posteriormente, se recupera el oro concentrado de la espuma formada en la superficie. La concentración gravimétrica se utiliza para separar minerales densos, como el oro, de la ganga o material estéril. Esta técnica incluye métodos como la gravedad, la amalgamación, y la cianuración.

1.3.1. Flotación

La flotación es un proceso ampliamente utilizado para recuperar oro de minerales de baja ley, especialmente aquellos que contienen partículas de oro finas y sulfuradas. Se trata de un método eficiente y relativamente simple que ha revolucionado la industria minera del oro (Ros, A., 2017) .

Los principios básicos en que se fundamenta el proceso de la flotación son:

- La hidrofobicidad del mineral que permite la adherencia de las partículas sólidas a las burbujas de aire; y,
- La formación de una espuma estable sobre la superficie del agua que permite mantener las partículas sobre la superficie.

Entre las ventajas de la flotación se tiene, de que es un proceso eficaz para la separación de una amplia gama de minerales; que es escalable ya que se puede adaptar a operaciones de cualquier escala; y, que la flotación es un proceso relativamente rentable para la extracción de minerales. Entre las desventajas conviene subrayar que el proceso de la flotación requiere una cantidad significativa de agua, lo que puede ser una limitación en áreas con escasez de agua; y, a que los reactivos químicos utilizados en la flotación pueden contaminar el agua y el aire.

El mineral se tritura y muele hasta obtener un tamaño de partícula fino, liberando las partículas de oro; se agregan al mineral agentes químicos específicos, como colectores, depresores y activadores, que modifican la superficie de las partículas para promover la flotación selectiva del oro. Se introduce la pulpa mineralizada en una celda de flotación con aire a presión. Las partículas de oro se adhieren a las burbujas de aire debido a la interacción con los colectores, mientras que los minerales no deseados permanecen en la pulpa. Las burbujas de aire con las partículas de oro adheridas ascienden y forman una espuma en la superficie, que se recoge como concentrado. La pulpa restante, que contiene los minerales no deseados, se denomina relaves. Para la recuperación el concentrado se somete a procesos adicionales para recuperar el oro, como cianuración o electro obtención.

Entre las ventajas tenemos: una alta eficiencia en la recuperación de oro fino y sulfurado, proceso relativamente simple y versátil, bajo costo operativo en comparación con otros métodos, se puede adaptar a diferentes tipos de minerales y leyes de oro y es amigable con el medio ambiente.

Entre las desventajas se tiene que: requiere de un conocimiento y control riguroso de la química del proceso, los reactivos utilizados pueden ser costosos, no es efectiva para recuperar oro grueso y, puede generar relaves con contenido residual de oro.

1.3.2. Gravimetría

La gravimetría es un método de separación de minerales basado en la diferencia de densidades entre el mineral y la ganga (material estéril); aunque es un método simple tiene limitaciones en cuanto a su eficiencia y aplicabilidad, por lo que suele relegarse a operaciones pequeñas o artesanales (MAPE). La gravimetría puede ser una alternativa responsable al mercurio, ya que no utiliza productos químicos tóxicos (mercurio y/o cianuro) y, puede ser una técnica más segura y sostenible que la amalgamación, especialmente en la MAPE, donde las operaciones suelen ser más pequeñas y menos mecanizadas. Sin embargo, la gravimetría presenta desafíos en función de la cantidad de mineral a procesar, ya que puede requerir equipos más sofisticados y costosos en comparación con la amalgamación, además de que funciona mejor cuando el mineral está libre. Esto puede ser una barrera para los mineros artesanales y de pequeña escala.

Es un proceso sencillo y rentable, que es eficaz para oro grueso y la más importante que es amigable con el medio ambiente. Entre las desventajas del proceso se tiene que no es apto para recuperar oro fino, pudiendo ser un proceso laborioso; y, que requiere una cantidad significativa de agua, para su desarrollo (Forns Sant, P. (2020).

Equipos como concentradores centrífugos, espirales y otros dispositivos separan las partículas de oro de la carga alimentada según su densidad (peso). Estos concentradores centrífugos operan con el mismo principio: básicamente, un recipiente que rota efectúa la separación gravitacional de la carga en un campo centrífugo; los tipos de concentradores

centrífugos más utilizados (concentradores Knelson, Falcon y genéricos), están basados en el mismo principio pero difieren en su diseño técnico.

El mineral aurífero se tritura y muele hasta liberar las partículas de oro, se utilizan mecanismos como cribas o ciclones para separar las partículas en función de su tamaño y densidad, las partículas de oro, más densas, tienden a concentrarse en las fracciones más pesadas. Mediante técnicas como mesas vibratorias o jigs, se aprovecha la diferencia de densidad para separar aún más las partículas de oro del resto del material, el concentrado final, aún con impurezas, se procesa posteriormente para extraer el oro puro mediante otros métodos como la fusión, la amalgamación, etc. (Huayhua, E., 2003).

Entre las ventajas se tiene que: es una técnica sencilla, ya que no requiere maquinaria compleja ni insumos costosos, el bajo costo operativo, lo que la hace adecuada para operaciones a pequeña escala o artesanales (MAPE), el bajo impacto ambiental; y, el ser una técnica efectiva para recuperar oro grueso, ya que puede recuperar partículas de oro relativamente grandes.

Entre las desventajas se pueden mencionar: la baja eficiencia, ya que no recupera todo el oro presente especialmente partículas finas; que es una técnica limitada a oro libre, ya que solo funciona con oro metálico libre, no con oro atrapado en otros minerales; requiere mucho material, por cuanto se procesa una gran cantidad de material para obtener pequeñas cantidades de oro; y, la automatización es difícil.

1.3.3. Lixiviación

La lixiviación es un proceso metalúrgico fundamental en la industria minera para la extracción de diversos minerales de sus menas, se basa en la disolución selectiva del mineral de interés en un disolvente líquido, separándolo de la matriz rocosa; con ventajas como su

versatilidad, eficiencia y potencial de escalabilidad. Sin embargo, es importante considerar su impacto ambiental y los riesgos para la salud a fin de minimizarlos.

El mineral se tritura y muele hasta obtener un tamaño de partícula adecuado para la disolución, se pone en contacto el mineral triturado con el disolvente elegido, que puede ser agua, ácido, cianuro u otras soluciones químicas específicas. El mineral de interés se disuelve en el disolvente, mientras que los minerales no deseados (ganga) permanecen en estado sólido; se separa la solución que contiene el mineral disuelto (lixiviado) de la ganga mediante técnicas como la filtración o la decantación. A partir de la solución lixiviada, se recupera el mineral de interés mediante diversos métodos, como la precipitación, la electrodeposición o la evaporación del disolvente (Romero García, J. O., 2020).

Tipos de lixiviación:

- Lixiviación en tanque: se realiza en un tanque donde el mineral y el disolvente se mezclan y agitan durante un tiempo determinado.
- Lixiviación en columna: el mineral se coloca en una columna y el disolvente se percola a través de ella, disolviendo el mineral a medida que avanza.
- Lixiviación en pilas: se coloca el mineral en pilas sobre una base impermeable y se riega con el disolvente, que se lixivia a través de la pila.

Factores que influyen en la lixiviación:

- Tipo de mineral: la composición química y la estructura del mineral (oro), determinan su solubilidad en el disolvente elegido.
- Tipo de disolvente: las propiedades fisicoquímicas del disolvente, como su pH, concentración y temperatura, afectan la eficiencia de la lixiviación.
- Tamaño de partícula: un tamaño de partícula más pequeño aumenta la superficie de

contacto entre el mineral y el disolvente, mejorando la disolución.

- Temperatura: a mayor temperatura, la velocidad de disolución generalmente aumenta.

Aplicaciones de la lixiviación:

- Extracción de oro: la cianuración es un método de lixiviación ampliamente utilizado para extraer oro de sus menas.
- Extracción de cobre: la lixiviación con ácido sulfúrico es un método común para la extracción de cobre.
- Extracción de uranio: la lixiviación con ácido carbónico se utiliza para extraer uranio de sus minerales.
- Extracción de otros minerales: la lixiviación se utiliza también para la extracción de zinc, níquel, plomo, entre otros.

Entre las ventajas de la lixiviación se tiene que: es un proceso versátil, ya que se puede aplicar a una amplia variedad de minerales; permite la extracción de minerales de baja ley, es relativamente económica, en comparación con otros métodos de extracción; y, se puede adaptar a operaciones de pequeña y gran escala.

Entre las desventajas del proceso de lixiviación se tiene: que el proceso requiere grandes cantidades de agua en algunos casos; la producción de relaves que pueden contener sustancias contaminantes; otra desventaja es la de que si no se gestiona adecuadamente, puede tener un impacto negativo en el medio ambiente; y finalmente los riesgos para la salud, en razón de que algunos disolventes utilizados pueden ser peligrosos para la salud.

Procesamiento de relaves:

Es una técnica utilizada para recuperar oro que se ha perdido durante el proceso de lixiviación y adsorción (CIL) o por filtrado en la minería a cielo abierto y los relaves producto de la amalgamación en la pequeña minería o artesanal. Consiste en tratar los relaves, es decir, las aguas residuales y sólidos generados durante el proceso de obtención del metal, para recuperar oro adicional (Parra et al., 2018).

1.3.3.1. Biolixiviación.

Es un proceso biotecnológico que utiliza microorganismos específicos para disolver y extraer metales valiosos como el cobre, el oro, el níquel y el zinc de sus respectivos minerales. Es una alternativa a los métodos tradicionales de extracción o lixiviación (AMBIENTAL, M. E. C. Y. T., 2011).

El mineral se tritura y muele hasta un tamaño que facilite la acción de las bacterias, se agregan las bacterias específicas al mineral, creando un ambiente favorable para su crecimiento y actividad. Las bacterias liberan sustancias solubles (ácidos u otros compuestos) que disuelven los metales de interés en el mineral, la solución que contiene los metales disueltos se separa del material residual mediante técnicas convencionales como la filtración o la decantación. Para la recuperación del metal, se aplican métodos químicos o electroquímicos para extraer el metal de interés de la solución lixiviada.

Entre las ventajas de la biolixiviación se tiene: que el proceso es amigable con el medio ambiente ya que no emplea químicos tóxicos como el cianuro y genera menos residuos contaminantes; es de bajo consumo en energía, pues no requiere altos niveles de temperatura o presión, la alta eficiencia en recuperación, puesto que se pueden recuperar metales de baja ley de manera rentable; y la especificidad, dado que las bacterias pueden atacar específicamente a

un metal de interés, dejando intactos otros elementos valiosos. Hay que destacar que se continúa investigando y desarrollando nuevas cepas bacterianas más eficientes y con mayor espectro de acción.

Entre las desventajas del proceso se tiene que: la acción de las bacterias es más lenta que los métodos químicos tradicionales, la alta sensibilidad a las condiciones, puesto que las bacterias requieren un control estricto de pH, temperatura y concentración de nutrientes para un funcionamiento óptimo. De otra parte la tecnología aún se encuentra en etapas de optimización y expansión a nivel industrial.

1.3.3.2. Lixiviación con cianuro.

La lixiviación con cianuro es un proceso industrial utilizado para extraer oro y otros metales preciosos de minerales (ganga). Este método involucra la disolución del oro en una solución de cianuro, que luego se puede recuperar mediante un proceso de separación. Aunque efectiva, esta técnica tiene preocupaciones ambientales y de seguridad debido a la toxicidad del cianuro (Arminta Qjehuarucho, L., & Vargas Huaman, D. N., 2022). Se utiliza en operaciones mineras grandes y medianas, y en algunos casos en la pequeña minería para el tratamiento de colas de amalgamación.

El mineral se tritura y muele hasta conseguir un tamaño de partícula fino, liberando el oro y la plata. Se añade la solución de cianuro a la pulpa mineralizada. El oro y la plata se disuelven en la solución formando complejos de cianuro. La solución que contiene los metales preciosos se separa de la pulpa utilizando diversos métodos como la sedimentación o la filtración. Se emplean técnicas electroquímicas (electrodeposición) o químicas (precipitación) para recuperar el oro y la plata de la solución de lixiviación.

Entre las ventajas hay que destacar que: es un método muy efectivo para extraer oro fino y plata incluso de minerales de baja ley, que se puede adaptar a diferentes tipos de

minerales y condiciones operativas (se puede adaptar a operaciones de cualquier escala); y, los costos relativamente bajos. Comparado con otros métodos de extracción, la cianuración puede ser más económica.

Entre las desventajas se tiene que: su toxicidad, puesto que el cianuro es un compuesto químico tóxico que puede contaminar el agua, el suelo y el aire si no se gestiona adecuadamente, que la exposición al cianuro puede ser perjudicial para la salud humana. Existen numerosas regulaciones ambientales que controlan el uso y la disposición del cianuro.

Merril-Crowe. El proceso Merrill-Crowe es un método mecánico utilizado para extraer oro a partir de soluciones cianuradas. Consiste en pasar la solución por una serie de filtros que atrapan al oro, dejando el resto del material en suspensión. Luego, los granos de oro se retiran y se sumergen en ácido sulfúrico para obtener oro puro. El proceso en si consta de cuatro etapas: 1. Clarificación, La solución cianurada se clarifica para eliminar impurezas y partículas sólidas, 2. Precipitación, la solución clarificada se hace reaccionar con polvo de zinc, lo que provoca la precipitación del oro y la plata en forma sólida, 3. Filtración, se filtra la solución para separar los sólidos (precipitado de oro y plata) del líquido restante; y, 4. Refinación, los sólidos (precipitado de oro y plata) se funden para obtener una aleación conocida como bullion, que contiene oro, plata, cobre y zinc. Luego, se realiza una etapa de refinación para obtener oro puro.

1.3.4. Recuperación electrolítica

Es un proceso eficaz y respetuoso con el medio ambiente, que utiliza electricidad para separar el oro de los minerales, el proceso se basa en la propiedad del oro de ser un buen conductor de electricidad. En el proceso de recuperación, los iones de oro se separan de los

iones de los otros metales presentes en la solución. El electrodo de oro actúa como cátodo, y el electrodo de carbono actúa como ánodo; y es así que, los iones de oro se mueven hacia el cátodo, donde se reducen y se depositan en forma de oro metálico.

El mineral aurífero se tritura y muele para liberar las partículas de oro. El mineral triturado se mezcla con una solución de ácido sulfúrico o ácido nítrico para disolver el oro. La solución de oro disuelta se coloca en una celda electrolítica. Un electrodo de oro se coloca en la solución, y un electrodo de carbono se coloca en la parte superior. Se aplica una corriente eléctrica a la celda. El oro se deposita en el electrodo de oro. El oro depositado se retira del electrodo.

La recuperación de oro electrolítica ofrece una serie de ventajas sobre otros métodos de extracción de oro como: es eficiente en razón de que la recuperación de oro electrolítica puede recuperar hasta el 99% del oro presente en el mineral; la recuperación de oro electrolítica no genera residuos tóxicos; y, que la recuperación de oro electrolítica no presenta riesgos para la salud de los trabajadores.

Entre las desventajas de la recuperación de oro electrolítica se tiene que es un proceso costoso en razón de que requiere una inversión significativa en equipos y energía; y, de que el tiempo que requiere el proceso puede tardar varios días o semanas.

1.3.5. Amalgamación

La amalgamación se ha utilizado históricamente como un método eficaz para extraer metales, en razón de que el mercurio tiene la capacidad de formar aleaciones con el oro, la plata y varios otros metales (amalgamas), lo que permite separarlos de los minerales de ganga acompañantes. El primer uso de la amalgamación para la producción de oro probablemente data de la minería en Bosnia, en época de Nerón (54-68 a.C.), hasta el día de hoy la pequeña minería aurífera utiliza esta técnica de manera generalizada (Taggart, A.F., 1953).

En la actualidad, la amalgamación se utiliza como se ha venido mencionando principalmente en minería a pequeña escala y en operaciones artesanales de minería, por ser un proceso simple y efectivo para la recuperación de oro. En operaciones a gran escala, la amalgamación ha sido reemplazada por métodos más eficientes y ambientalmente amigables, a pesar de que cada método tiene sus ventajas y desventajas.

La base del proceso implica la molienda del mineral aurífero de mena para liberar el oro y mezclarlo con mercurio líquido (azogue) para formar una amalgama con el oro, que contiene oro disuelto. Que posteriormente se calienta para evaporar el mercurio y dejar el oro puro, que luego se funde para obtener lingotes del metal (Ros, A., 2017).

El oro primario libre (nativo) con un tamaño de grano de entre 0.2-0.3 mm es apropiado para la amalgamación; en tanto que, el oro grueso se puede recuperar fácilmente con métodos gravimétricos. En el proceso de amalgamación, el oro se disuelve mínimamente en el mercurio; mientras que, la amalgama contiene generalmente partículas de oro superficialmente aleadas con el mercurio y ligadas entre sí por el mismo (Taggart, A.F., 1953).

En principio, todo el oro libre y limpio (p. ej. no cubierto por óxidos de hierro) se amalgama. Sin embargo, frecuentemente el mineral bruto puede contener ciertos minerales acompañantes y/o impurezas con efectos negativos para el proceso de amalgamación. Algunos de tales problemas se describen a continuación:

- Los sulfuros de arsénico, antimonio y bismuto reaccionan con el mercurio, produciendo una pérdida significativa del mineral precioso y mercurio. En un ambiente oxidante (p.ej. con aguas ácidas de mina), también la pirrotina y en menor grado la pirita y calcopirita pueden tener un efecto negativo sobre la amalgamación.
- La baritina, el talco, la esteatita y otros silicatos hidratados de magnesio y aluminio también podrían interrumpir el proceso e incrementar las pérdidas de oro y mercurio.

- Los lubricantes y las grasas son extremadamente problemáticos, porque se fijan al mercurio y tienden a atrapar sulfuros, talco, arcillas y otros minerales. Como resultado, el mercurio es cubierto por una sólida película de finas partículas. Adicionalmente, la presencia de aceites lubricantes o grasas causan la flotación del oro, el cual es alejado del contacto con el mercurio. Tales factores, naturalmente bajan la recuperación del metal precioso en un proceso de amalgamación. Las medidas preventivas para evitar dichos factores negativos incluyen, añadir agentes limpiadores, algún detergente fuerte o la savia ("jugo") de una planta como el sisal (fique o pita), cuyas hojas son frecuentemente utilizadas para ese propósito en Colombia; el objetivo de su uso es saponificar el aceite y la grasa. Dentro del área minera de Nambija, frecuentemente se utiliza para mejorar el rendimiento de la amalgamación: la panela (concentrado de caña de azúcar), detergente, sal, gasolina, etc.
- Tanto el aluminio o el cobre metálico de los detonadores (fulminante común) o cables eléctricos, clavos, pilas; desechados inadecuadamente se pueden amalgamar, consumir y ensuciar el mercurio. Las amalgamas de estos metales frecuentemente se dispersan en forma de partículas finísimas bajo condiciones oxidantes.
- Las aguas ácidas de mina, frecuentemente utilizadas como agua de procesamiento, también tienen efectos dañinos para la amalgamación (por la oxidación de sulfuros, ver arriba). La adición dosificada de cal neutraliza parcialmente dichos efectos.

Inicialmente, el mineral aurífero se tritura y muele para liberar las partículas de oro y, posteriormente se agrega mercurio metálico a la pulpa mineralizada. El oro se amalgama con el mercurio, formando una masa pastosa. Para la separación de la amalgama del resto de material (ganga y/o estéril), se pueden utilizar técnicas como gravedad (baldeado) o lavado (canaleo y platoneo) para separar la amalgama del material restante. Finalmente la amalgama se calienta, liberando vapor de mercurio (altamente tóxico) y dejando el oro puro.

Al evaluar los costos asociados, se considera a la amalgamación como un proceso relativamente barato en comparación o comparación con otras técnicas de recuperación como se ha mencionado. Sin embargo, hace prioritario e importante el considerar las ventajas y desventajas de la amalgamación, con el objetivo de promover prácticas más seguras, sostenibles y económicamente viables en la industria minera.

Entre las ventajas de la amalgamación cabe mencionar: que es una técnica sencilla y económicamente accesible utilizada en la extracción de oro desde hace mucho tiempo, ya que no requiere equipo especializado ni insumos costosos; y, que además es eficiente en recuperación de oro fino, ya que captura partículas pequeñas que podrían perderse en otros métodos. Aunque la cianuración puede ser una alternativa responsable al mercurio en la minería a pequeña escala (MAPE), esta implica costos significativamente mayores en términos de inversión y operación, ya que requiere medidas de seguridad adecuadas y operadores capacitados. Lo que hace que la opción de concentrar con amalgamación sea más favorable cuando los fondos son limitados.

Entre las desventajas de la amalgamación (además de lo anteriormente mencionado), se puede reiterar que es gravemente contaminante debido a la liberación de mercurio; y, la baja recuperación de oro que es otra desventaja significativa de la amalgamación, en razón de que no se recupera todo el oro presente en el mineral (se puede perder hasta el 50% del oro presente en el mineral), lo que puede resultar en pérdidas de este metal durante el proceso de extracción.

Hay que mencionar que, durante la amalgamación de concentrados, inevitablemente se pierde en las colas (relaves) un porcentaje del mercurio utilizado, debido a que éstas por lo general no son depositadas de manera segura. La producción de "floured mercury" o "mercurio en polvo" que no puede ser recuperado satisfactoriamente por métodos gravimétricos, ni con planchas amalgamadoras, depende fundamentalmente de la naturaleza de los concentrados y de la forma en que se realice la amalgamación (Ichavautis Nuñez, A., 2014).

Si bien la amalgamación tradicional fue históricamente importante para la extracción de oro, debido a los conflictos asociados al mercurio, su alto impacto ambiental y por sus riesgos asociados para la salud, ha quedado obsoleta e, incluso prohibida en gran parte del mundo (incluido en Ecuador). Por lo que resulta fundamental apostar por alternativas más sostenibles y seguras para proteger la salud humana y el medio ambiente, lo que implica que esta técnica debe ser reemplazada por métodos más modernos y sostenibles como la cianuración y la flotación.

1.4. AMALGAMACIÓN DE ORO CON MERCURIO

A inicios, la técnica de la amalgamación consistió en mezclar el mineral molido con el mercurio en “quimbaletes” (equipo rudimentario compuesto por dos piedras de gran dimensión que hace las veces de un mortero), el mineral previamente molido se va depositando en el quimbalete junto con el agua y el mercurio, que luego de ser agitado el tiempo necesario forma la amalgama, cuya composición química puede ser del tipo: AuHg_2 , Au_2Hg y Au_3Hg (Taggart & Behre, 1945). En la actualidad la amalgamación con mercurio consiste en la mezcla de mercurio con el mineral pulverizado (molienda), formando una aleación líquida que permite la captura del oro y su posterior separación. Este método es ampliamente utilizado en la pequeña minería para extraer oro, debido a su relativa simplicidad y bajo costo.

El uso de mercurio en “circuito abierto” es un problema que sin duda acarrea las mayores pérdidas de mercurio en la producción de oro, ya que el mercurio se vierte directamente en el equipo de molienda. La amalgamación en circuito abierto se refiere al proceso donde toda la carga de material aurífero se pone en contacto con mercurio en un flujo continuo de pulpa, lo que implica que no es posible recuperar todo el mercurio en forma de amalgama; ya que parte de este mercurio, ya sea en forma metálica libre o en forma de amalgama, escapa con las colas (relaves contaminados con mercurio). En tanto que, la amalgamación en circuito cerrado es un

proceso de extracción de oro que utiliza mercurio en un circuito cerrado, lo que significa que el mercurio se recircula y se reutiliza en el proceso. Este proceso tiene un impacto ambiental inferior al proceso de amalgamación en circuito abierto, ya que reduce la evaporación de mercurio a la atmósfera. La amalgamación en circuito cerrado se realiza en equipos cuidadosamente diseñados y operados, lo que permite una mayor recuperación de oro.

El proceso molienda - amalgamación se realiza en diferentes tipos de molinos, como molinos de bolas, de barras (chanchas), de pisones, chilenos (trapiches), y otros. Los molinos chilenos se utilizan en la recuperación de oro en explotaciones mineras artesanales y de pequeña escala, se utilizan para moler y pulverizar, lo que permite separar el oro de otros minerales; el proceso consiste en mezclar el mineral molido con agua para crear una pulpa, que luego se pasa a través de una canaleta o caja de esclusa para recuperar el oro. En este proceso, una parte de la amalgama se queda en el recipiente del molino y otra parte sale del molino y es parcialmente recuperado por métodos gravimétricos (como canaletas, trampas, o planchas amalgamadoras).

El molino de barras o cilindro de amalgamación “chancha” es un dispositivo que utiliza barras de hierro como medio de molienda (carga de molienda), para reducir el tamaño de los minerales; funciona por el impacto y la fricción que se produce entre las barras contra las partículas de mineral a fraccionar, al proceso se adiciona agua en una proporción para la dilución de la pulpa, que generalmente es de 1/1.

Las canaletas que se utilizan en la recuperación de mercurio en circuitos abiertos, especialmente en el proceso de amalgamación; están hechas cemento o madera y están cubiertas de material textil o de alfombra y se utilizan para recuperar el mercurio atomizado, que sale del molino.

Las planchas amalgamadoras son utilizadas en la minería primaria para la recuperación de oro fino, ya que se colocan a la salida del molino y permiten la formación de amalgama al entrar en contacto el oro con el mercurio presente en las planchas. Para mantener su

funcionamiento, las planchas deben ser "activadas" periódicamente, es decir que necesitan una nueva carga de mercurio para que el atrapamiento de oro no cese y la amalgama tenga una consistencia favorable. Cuando la capa de amalgama es considerable, esta se remueve y separa con una espátula de goma. Generalmente cuando se utiliza mercurio dentro el molino, las planchas amalgamadoras sirven para retener parcialmente la amalgama que no queda adentro.

Las minas (incluyendo Nambija), que utilizan mercurio directamente en sus molinos (trapiche chileno o molino a barras o bolas) para realizar molienda y amalgamación simultánea, pierden cantidades considerables de mercurio. Generalmente, en el intento de recuperar amalgama que sale del molino se realiza con simples trampas gravimétricas o planchas de amalgamación; por esto las colas (relaves) contienen aún oro libre, amalgama y mercurio libre.

Otro aspecto a considerarse son las emisiones de mercurio por la quema de amalgama al aire libre de la esponja de oro son muy variables, lo que se traduce no solamente un problema ambiental sino también un problema de seguridad industrial. Normalmente, se gasifica y evapora al ambiente alrededor de 500 a 1.000 g de mercurio por kg de oro recuperado; la mayor parte del vapor se recondensa y vuelve a precipitarse en las proximidades del área de quemado. Los mineros inhalan constantemente vapores de mercurio, exponiéndose en algunos casos a agudo envenenamiento por mercurio (GAMA).

El mercurio adicionado a diferentes tipos de molinos "por el régimen de funcionamiento de éstos", se atomiza en "harina de mercurio"; y la presencia en el material de alimentación de sustancias como grasas, aceite, aluminio y cobre provenientes de detonadores y cables eléctricos, minerales como el talco, etc., contaminan al mercurio, de modo que éste pierde su habilidad de unirse a otras esferitas (coalescencia) para formar perlas de mercurio más grandes, disminuyendo ostensiblemente su capacidad de amalgamación. Una gran parte de la harina de mercurio se pierde por la dificultad de recuperarlo por cualquier método gravimétrico;

generalmente, en sistemas combinados de molienda-amalgamación en flujo abierto, se pierden de 5 a 10 kg de mercurio por kg de oro recuperado. Estas pérdidas son varias veces mayores a las ocasionadas por la quema de amalgama al aire libre. Otras fuentes de emisión de mercurio resultan del almacenamiento inseguro de las colas de amalgamación (GAMA).

A lo largo de los años, se han llevado a cabo varios estudios y esfuerzos para optimizar la amalgamación como medida para mitigar los efectos del mercurio. Estos esfuerzos se centran en encontrar formas más seguras, eficientes y menos contaminantes de extraer oro sin depender tanto del mercurio.

1.4.1. Progresos en la técnica de amalgamación

Se han realizado varios estudios para intentar mejorar el proceso de amalgamación en sí, optimizando las condiciones de operación, como la granulometría adecuada del mineral, la cantidad de mercurio utilizada, la agitación adecuada, entre otros factores, para reducir al mínimo el uso de mercurio y maximizar la recuperación de oro.

La optimización de la amalgamación para el tratamiento y uso del mercurio buscan reducir la cantidad de mercurio utilizado en el proceso de extracción y beneficio de oro, otro aspecto en consideración es minimizar la exposición de los trabajadores a este metal tóxico y finalmente el evitar la contaminación ambiental y pasivos ambientales resultantes de su aplicación.

En los últimos años, se han desarrollado una serie de mejoras en las técnicas de amalgamación para abordar sus desventajas y los riesgos asociados a este proceso como el uso de amalgamadores automáticos, que reducen la exposición de los trabajadores al mercurio; el uso de amalgamas de bajo contenido de mercurio, que reducen la cantidad de mercurio que se requiere para extraer el oro; y, el uso de procesos de recuperación de mercurio, que recuperan el mercurio de las amalgamas usadas. Sin embargo se deberían puntualizar, considerar e implementar:

El uso eficiente del mercurio.- La optimización implica utilizar la cantidad mínima de mercurio necesaria para amalgamar el oro. Esto se logra mediante la mejora del proceso y la optimización de la técnica de amalgamación, ajustando factores como la cantidad de mercurio utilizada en relación con la cantidad de mineral procesado, la granulometría adecuada del mineral y la duración del proceso.

La mejora en las condiciones de trabajo y manipulación.- Se enfoca en proporcionar a los mineros herramientas y técnicas seguras para la manipulación del mercurio, como el uso de guantes, mascarillas y la implementación de buenas prácticas de higiene para reducir el tiempo y la exposición directa al metal.

Educación y capacitación.- El objetivo principal es capacitar a los mineros en el uso adecuado del mercurio; y, en este sentido, la formación de los mineros sobre los riesgos asociados con el mercurio y la promoción de prácticas seguras son esenciales. Esto incluye la concientización sobre la manipulación adecuada del mercurio, el uso de retortas para recuperar el mercurio residual, la importancia de la ventilación adecuada en las áreas de trabajo, y utilizar equipos de protección personal adecuados.

Tecnologías de retorta.- El uso de retortas para mejorar el control de emisiones de mercurio en las operaciones mineras. Las retortas como se ha mencionado son dispositivos que capturan y reciclan el mercurio residual; además, permiten la recolección del mercurio evaporado durante la amalgamación para ser reutilizado, evitando así su liberación al medio ambiente.

Control de la contaminación.- Se han implementado sistemas de gestión de residuos y aguas residuales para evitar que el mercurio y otros productos químicos peligrosos contaminen los suelos y cuerpos de agua cercanos a las áreas de extracción.

Investigación y desarrollo de técnicas alternativas.- La investigación y desarrollo de técnicas alternativas en la extracción de oro es un campo activo que busca promover métodos

más seguros, eficientes y que no dependan del mercurio. Estos esfuerzos tienen como objetivo minimizar los riesgos para la salud humana y reducir la contaminación ambiental asociada con el uso de mercurio en la extracción de oro. Se han realizado investigaciones centradas en encontrar métodos alternativos y menos nocivos para la extracción de oro. Algunas de las alternativas a la amalgamación con mercurio en la minería de oro incluyen:

1. Minería en seco con sistemas de separación electrostática.
2. Uso de tecnologías hidráulicas y gravimétricas.
3. Uso de retortas para recuperar el mercurio residual y evitar su liberación al medio ambiente.
4. Sistemas de purificación de aguas residuales para minimizar la contaminación.

Estas tecnologías más seguras y sostenibles buscan no solo reducir el impacto ambiental y los riesgos para la salud asociados con la amalgamación de mercurio, sino también mejorar las condiciones de trabajo de los mineros artesanales y promover prácticas más sostenibles en la extracción de oro.

La optimización de la amalgamación es crucial para encontrar un equilibrio entre la necesidad de obtener oro y la protección de la salud y el medio ambiente. Se busca mejorar la recuperación del metal precioso y reducir las pérdidas de mercurio mediante la aplicación de métodos convencionales de concentración de menas y tecnologías sencillas de amalgamación. Además, se han estudiado técnicas alternativas como la cianuración

Concienciación.- La concienciación es esencial para reducir el uso de mercurio y sus impactos negativos. Los esfuerzos deben dirigirse hacia la educación y la capacitación de mineros y trabajadores de la minería, ya que son los que están expuestos a los mayores riesgos del mercurio. Es importante que estén bien informados sobre los peligros y los riesgos del mercurio, así como sobre las prácticas más seguras y las alternativas disponibles para la

extracción de oro.

1.5. IMPACTOS DE LA MINERÍA DE ORO CON MERCURIO

La extracción de oro, si bien es cierto que genera valor económico, conlleva una serie de problemas ambientales, sociales y económicos; en este contexto, la minería del oro mediante la amalgamación es y ha sido una técnica común, especialmente en la minería artesanal y de pequeña escala, que se asocia con diversas problemáticas que afectan al medio ambiente y a la salud humana (Julio, T., & Arnobis, W., 2020). Aunado a que, las empresas y/o sociedades mineras no realizan adecuadamente los procesos de rehabilitación del medio ambiente posterior a la explotación minera, lo que se traduce en daños irreparables, por la generación de impactos y pasivos ambientales en el ecosistema local.

En términos ambientales, se considera la contaminación del agua debido al vertido de aguas residuales, la acidificación de ríos por el drenaje ácido de las minas y la contaminación por mercurio. También se produce la degradación del suelo por la remoción de la capa superficial y la exposición a la erosión, así como la contaminación del suelo con metales pesados y otros químicos utilizados en la minería. En cuanto a los impactos sociales, se generan conflictos por el desplazamiento de comunidades locales de sus tierras y territorios ancestrales, explotación laboral en condiciones precarias y violaciones a los derechos humanos. Además, en términos económicos, se produce una distribución desigual de beneficios, dependencia económica de la minería y costos ambientales y sociales que no son asumidos por las empresas mineras

Es importante tener en cuenta que estas son solo algunas de las implicaciones y afectaciones de la minería con mercurio, y que existen otros aspectos a considerar; por lo que una minería responsable y sostenible es fundamental para minimizar sus impactos. Entre las principales implicaciones y afectaciones de este tipo de minería, se tiene:

1.5.1. Contaminación por mercurio

El uso generalizado de mercurio en la amalgamación del oro conlleva la liberación de este metal al medio ambiente, lo que puede degenerar finalmente en una contaminación del aire, el agua y el suelo a través de la emisión de gases; aunado, a la descarga de aguas residuales propias de la minería y la disposición inadecuada de residuos, así como también la huella de carbono y los impactos ambientales asociados. Por otra parte, el uso del mercurio en la minería provoca una grave contaminación que afecta tanto al medio ambiente como a las poblaciones humanas cercanas a las minas o asentamientos mineros. El mercurio liberado en el aire se dispersa en el entorno y puede depositarse en el suelo y el agua, persistiendo durante mucho tiempo. Esto puede causar daños a los ecosistemas acuáticos y a las poblaciones humanas que dependen de ellos. Además, el mercurio puede ser absorbido por las plantas y transferirse a los organismos que las consumen, lo que puede alterar los ecosistemas y dañar la biodiversidad. A medida que el mercurio se mueve a través de la cadena alimenticia, puede aumentar su concentración, lo que representa un riesgo para los organismos vivos que lo consumen.

1.5.2. Afectaciones a la salud humana

Los mineros y las comunidades cercanas a las áreas de extracción (zonas mineras), están expuestos a la inhalación de vapores de mercurio y al contacto directo con este metal (tóxico); ya que, la exposición prolongada al mercurio puede causar problemas neurológicos, daños al sistema nervioso central, trastornos del desarrollo en niños y problemas de salud reproductiva, entre otros efectos adversos para la salud humana (Van Hoof, B., et al., 2018). Lo que implica que la exposición crónica al mercurio puede causar problemas de salud a largo plazo y socavar la calidad de vida local.

Dentro de las implicaciones en la salud humana se tiene: **1. Envenenamiento por mercurio**, las personas pueden verse expuestas al mercurio por el consumo de agua y pescado

contaminados, la inhalación de aire en zonas mineras y el contacto directo con el metal, el envenenamiento por mercurio afecta principalmente el sistema nervioso, causando temblores, problemas de coordinación, dificultad para hablar y pensar el mercurio puede atravesar la placenta y afectar el desarrollo del feto, causando problemas de aprendizaje, memoria y atención. **2. Problemas respiratorios**, los trabajadores mineros y las personas que viven en zonas mineras pueden sufrir problemas respiratorios por la exposición al polvo que contiene mercurio. **3. Otras enfermedades**, el mercurio también puede causar problemas en el sistema digestivo, reproductor e inmunológico.

1.5.3. Degradación ambiental

La extracción y recuperación de oro mediante la amalgamación pueden provocar la degradación del suelo, la deforestación, la contaminación de ríos y cuerpos de agua con los residuos de mercurio y otros productos químicos utilizados en el proceso de beneficio; en este contexto, se liberan grandes cantidades de sedimentos y sustancias químicas tóxicas al medio ambiente, especialmente en ríos y lagos cercanos a las minas, afectando a los ecosistemas locales de los sectores de influencia y la biodiversidad circundante a los asentamientos mineros (Sepúlveda, T. V., 2005).

Dentro de las implicaciones ambientales se tiene: **1. Contaminación del agua**, por el vertido de aguas residuales con mercurio liberadas, impactando negativamente los ríos, las aguas subterráneas y la vida acuática; y, la bioacumulación ya que mercurio se acumula en los organismos vivos. **2. Contaminación del suelo**, el mercurio se infiltra en el suelo, contaminándolo y haciéndolo inutilizable para la agricultura; y, la erosión y dispersión en razón de que el mercurio puede ser transportado por la erosión y el viento, contaminando áreas aledañas a la actividad minera. **3. Impactos en flora y fauna**, por envenenamiento puesto que el mercurio afecta el sistema nervioso de animales y plantas, causando daños

reproductivos, problemas de desarrollo y, en algunos casos, la muerte; y a que, la contaminación por mercurio reduce la diversidad de especies en las zonas afectadas.

1.5.4. Impactos sociales y laborales

Muchas veces, la minería del oro mediante la amalgamación se lleva a cabo en condiciones laborales precarias y sin garantías de seguridad para los trabajadores. Además, puede provocar conflictos sociales, desplazamientos de comunidades y problemas de seguridad (López Pérez, K. Y., & Gutiérrez Amaya, L. J., 2022).

Para abordar estos problemas y mitigarlos, es prioritario el introducir prácticas más seguras y sostenibles en la minería de oro, incluyendo la implementación de tecnologías alternativas a la amalgamación, como el promover la capacitación a los mineros en técnicas compatibles ambientalmente y más seguras, apoyados con el desarrollo de regulaciones y controles ambientales más estrictos.

Finalmente, el objetivo de desarrollar e implementar tecnologías alternativas a la amalgamación, no es sólo reducir el impacto sobre el medio ambiente y los riesgos para la salud generados por esta técnica; sino también, mejorar las condiciones laborales de los mineros y promover prácticas más sostenibles en la extracción y recuperación de oro en la minería artesanal y pequeña minería, priorizando la protección del medio ambiente y la salud pública.

1.6. PÉRDIDAS DE MERCURIO EN LOS PROCESOS DE AMALGAMACIÓN

Se ha observado que las pérdidas de mercurio al medio ambiente con los procesos tradicionales de amalgamación y recuperación (Carrillo, et al., 2010), se producen en las siguientes etapas y/o fases:

- Las emisiones de mercurio en “circuitos abiertos”, cuando la amalgamación ocurre antes, junto o después de la molienda y/o la preconcentración (uso de mercurio "in situ", en canalones, en molinos de barras y de bolas, en planchas amalgamadoras, etc.). Toda la carga (material aurífero) se pone en contacto con mercurio en un flujo continuo de pulpa. No es posible recuperar todo el mercurio en forma de amalgama, una parte de éste, en forma metálica libre (gotas o partículas), escapa en las colas, contaminando una gran cantidad de material.
- Emisiones de mercurio después de la etapa de preconcentración o concentración por la amalgamación de concentrados “amalgamación en circuito cerrado”. Solo una parte del material tratado (concentrado), generalmente producido gravimétricamente se pone en contacto con el mercurio en un ambiente parcial o totalmente cerrado, donde la amalgamación se realiza sin la emisión de porción alguna de pulpa.
- Las emisiones de mercurio durante la separación de oro y mercurio (generalmente al quemar la amalgama, y ocasionalmente en la disolución del mercurio con ácido nítrico, que es la otra alternativa para separar el oro del mercurio, recuperándose posteriormente el mercurio de la solución residual mediante cementación).
- Emisiones de mercurio durante la refinación del oro, (proceso crucial para obtener oro de alta pureza y eliminar las impurezas presentes en el metal), generalmente realizado en las casas compradoras de oro.
- Emisiones de mercurio durante su manejo y transporte (derrames de mercurio).
- Desechado del "mercurio reciclado", (mercurio sucio que pierde su capacidad de amalgamación con el pasar del tiempo y su utilización, que puede ser reactivado con electrólisis). La disposición del mercurio reciclado en la pequeña minería puede variar según las regulaciones y prácticas específicas de cada país o región; sin embargo el mercurio reciclado debe ser recolectado y almacenado de manera segura en recipientes

adecuados y herméticamente cerrados para evitar fugas y derrames; es importante utilizar recipientes que sean resistentes a la corrosión del mercurio.

El uso de mercurio en circuito abierto es el problema que sin duda acarrea las mayores pérdidas de mercurio en la producción de oro. En las minas de Nambija, se utiliza mercurio directamente en sus molinos para realizar un sistema combinado de molienda - amalgamación simultánea. Por lo general, el intento de recuperar amalgama lo realizan con simples trampas gravimétricas (canalones), razón por lo cual las colas contienen aún oro libre, amalgama y mercurio libre.

1.6.1. Estrategias para el cambio de prácticas

El cambio de prácticas requiere un enfoque que combine medidas técnicas, económicas, sociales y ambientales y la participación activa de los actores clave, ya que es fundamental la participación de los gobiernos, mineros, comunidades locales y organizaciones internacionales en el proceso de cambio.

Por otra parte, es importante informar y capacitar a las personas sobre las nuevas prácticas y cómo implementarlas, los incentivos pueden ser una herramienta eficaz para motivar a las personas a la adopción de nuevas prácticas, siendo necesario el realizar un seguimiento del progreso del cambio y evaluar su impacto para realizar ajustes en el plan de acción de ser necesario.

La experiencia parece indicar que, el cambio de prácticas es un proceso complejo y desafiante que requiere tiempo y esfuerzo, en razón de la resistencia al cambio por parte de algunos actores; ya que, los recursos financieros y técnicos pueden ser limitados.

Experiencias y evaluaciones técnicas realizadas en varias operaciones mineras han demostrado que la recuperación de oro en circuito abierto, por lo general, es menor que cuando

se utiliza un equipo de concentración gravimétrica. A pesar de esto, el mercurio sigue siendo utilizado en circuito abierto en la pequeña minería, a pesar de que desde un punto de vista técnico-económico, este tipo de amalgamación no presenta ninguna ventaja (GAMA). La concentración gravimétrica es un método más eficiente y seguro para la recuperación de oro, y la optimización de estos procesos puede ayudar a limitar el uso de la amalgamación con mercurio.

Finalmente, la implementación de estrategias para el cambio de prácticas en la minería de oro ha demostrado resultados positivos en la reducción del uso de mercurio, la mejora de la salud de las personas y la protección del medio ambiente. En algunos casos, como el ya comentado de Colombia, se han logrado avances significativos en la reducción del uso de mercurio y la promoción de una minería de oro responsable y sostenible. Sin embargo, aún queda mucho por hacer para superar los desafíos y alcanzar el objetivo de una minería de oro responsable y sostenible.

2. OBJETIVOS

Contribuir a la disminución de la contaminación por mercurio en la minería artesanal y minería a pequeña escala de oro a través del mejoramiento de técnicas sostenibles de aprovechamiento del recurso minero, como medida de mitigación para limitar su uso y consumo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Definir en pruebas granulométricas la malla óptima de molienda para la recuperación de oro, de acuerdo al sector y al tipo de mineral procesado.
2. Evaluar la eficiencia del uso de mercurio con relación al tipo de mineral procesado a través de ensayos comparativos.
3. Evaluar la calidad de los efluentes antes y después de la optimización del proceso de recuperación de oro.
4. Contribuir al mejoramiento de la gestión de la actividad minera artesanal y a pequeña escala, a través de propuestas que reduzcan y limiten el uso del mercurio en los procesos de recuperación de oro, tendiendo progresivamente a su eliminación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ANTECEDENTES

Según datos históricos, las minas de oro en la zona de Nambija en Ecuador, habían sido explotadas desde la época colonial (1535-1560) y luego abandonadas. A partir de la década de los 80, colonos de la provincia de Zamora Chinchipe redescubrieron estas minas y se reanuda la explotación de este yacimiento aurífero mediante una minería informal, artesanal; y, con el empleo de métodos antitécnicos e irracionales para la excavación de túneles y galerías, cuyas consecuencias catastróficas (conflictos sociales y ambientales), se han observado con el transcurso del tiempo (RICTHISARM, 1997).

Los problemas medioambientales derivados de prácticas de minería artesanal y/o a pequeña escala desarrollada con métodos antitécnicos de beneficio (destrucción de fuentes de agua, contaminación de suelos con minerales tóxicos), se han observado con el transcurso del tiempo (Veiga et al., 2006). Las actividades mineras para la obtención de oro generan la liberación de partículas producto de la molienda y amalgamación (mercurio), que escapan al proceso de recuperación y son descargados con las colas y/o relaves (tailings), que en la mayor parte de casos son descargados directamente formando efluentes artificiales. Con la consiguiente acumulación de sedimentos y metales pesados cerca de los mismos y que finalmente siempre terminan en los afluentes naturales (Veiga y Baker, 2004).

El actual sistema de explotación y beneficio mineral, incide directamente en la contaminación de los sectores aledaños a los asentamientos mineros. Generalmente, la recuperación de oro en las plantas de procesamiento es baja, en razón de que parte del oro muchas veces no es recuperable con sus métodos rústicos de concentración por amalgamación.

En este sentido, la incidencia y contaminación por mercurio (Hg), dentro del área minera de Nambija, se da principalmente por: **1.** La descarga directa de relaves o colas

producto del procesamiento mineral generando vertientes artificiales, **2.** Por la concentración que se realiza con amalgamación de toda la mena en circuito abierto y **3.** Emisiones de mercurio en la separación (Au-Hg) con la quema a la intemperie, procedimientos que afectan directamente a los componentes bióticos y abióticos, sin considerarse los pasivos ambientales generados por la actividad a través de los años.

Se han realizado algunos avances sobre el terreno, como en lo relativo a la eliminación de mercurio de la amalgama que se realizaba al aire, y ahora se utilizan sencillas y baratas retortas de hierro que disminuyen mucho la emisión de vapores de mercurio a la atmósfera, pero sigue habiendo muchas pérdidas de mercurio en los residuos o estériles del proceso de amalgamación que es, fundamentalmente, casi todo el peso de mineral tratado. Para ello se han utilizado técnicas de lavado con detergentes alcalinos de la mena y de purificación electrolítica del mercurio con un sencillo y barato equipo que puede ser construido por los propios mineros, así como la demostración de que un sencillo ensayo de control de los tiempos de amalgamación y proporción de mercurio utilizado puede disminuir también las pérdidas, conjuntamente con un aumento de la recuperación de oro (Pantoja et al., 2005).

En los procesos de beneficio de oro, el grado de reducción de la partícula está fuertemente influenciado por el tamaño y la forma de las especies minerales asociadas con metales de importancia económica, por lo tanto es esencial caracterizar el grado de liberación del mineral de interés en función del tamaño de la partícula. Las plantas de beneficio mineral en pequeña escala generalmente no consideran la liberación de las partículas de sulfuros como un requisito para definir la relación de reducción del tamaño de molienda, esto se determina empíricamente, evaluando en qué tamaño se obtiene un mayor porcentaje de recuperación de oro (Pantoja-Barrios et al., 2020). En tal sentido, una malla óptima de molienda permite una mejor concentración y aprovechamiento mineral (oro), sin dejar de considerar y tomando en cuenta siempre las características propias de la mena que se procesa, lo que incide directamente

en la cantidad de mercurio a utilizarse. Consecuentemente al optimizarse la operación, ya no existirá sobremolienda, con su consecuente arrastre y pérdida.

Por tanto, en base a un aprovechamiento eficiente de los recursos mineros se puede reducir y controlar el uso del mercurio en las diversas labores de extracción y beneficio de oro para la minería artesanal y a pequeña escala. Lo ideal sería la eliminación y/o no utilización de mercurio en procesos de concentración con la implementación de nuevas tecnologías que por lo general para su operación requieren equipos muy costosos que no están al alcance de las personas que realizan minería artesanal, pero esto es un proceso y se puede iniciar con una reducción de emisión de mercurio en la fuente, la concientización de sus efectos nocivos a través de soluciones sistémicas, etc.

Por ello, la presente investigación pretende mejorar por un lado la eficiencia y productividad de la actividad minera y por otro lado disminuir o mitigar la contaminación por mercurio, en una de las zonas con mayor tradición minera del Ecuador; así también, una de las zonas con mayor afectación por contaminación con mercurio.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1. *Localización y aspectos geográficos*

El área minera de Nambija (69 ha mineras), se sitúa en la región suroriental de Ecuador en la Provincia de Zamora Chinchipe a 25 km. de la ciudad de Zamora, parroquia San Carlos de las Minas, en el flanco occidental de la cordillera de Nanguipa (ver Figura 1).

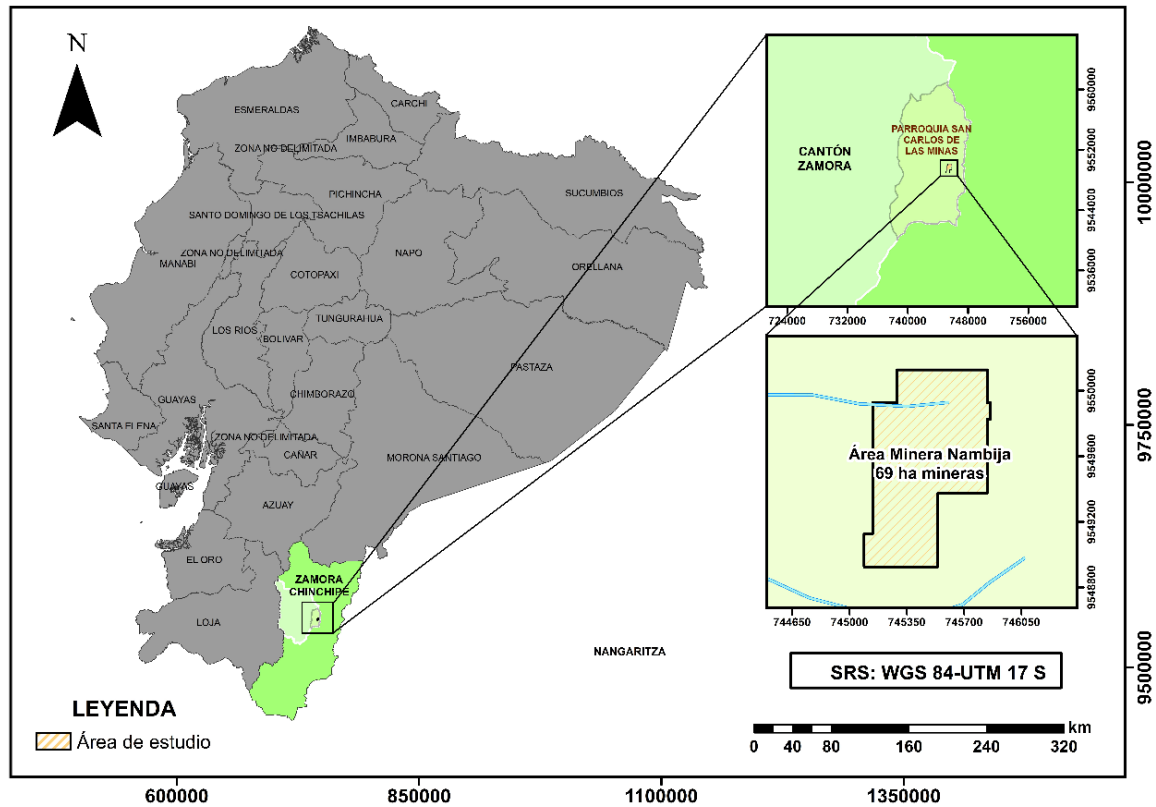


Figura 1. Localización del área minera Nambija

El distrito aurífero de Nambija, consiste en skarns oxidados desarrollados principalmente en rocas volcanoclásticas de la unidad Triásica de Piuntza, que se presenta como una lente metamorfoseada de contacto de 20 km de longitud y orientación norte dentro del batolito Jurásico de Zamora. Las altas leyes de oro (10-30 g/t) van acompañadas en la mayoría de las minas por contenidos muy bajos de sulfuros de Fe, Cu, Zn y Pb (Fontboté et al., 2005).

El área minera Nambija, comprende los condominios mineros norte y sur de una concesión minera de 69 hectáreas mineras contiguas otorgada legalmente por el estado ecuatoriano. El terreno es accidentado, con altitudes que varían entre 1500 y 2100 m.s.n.m. Posee un clima característico de la región interandina, con temperaturas que oscilan entre 18 y 24 °C y precipitaciones anuales entre 200 y 300 mm. Nambija es actualmente un pueblo minero con 1000 habitantes aproximadamente, entre mineros, obreros, familias (niños) y comerciantes intermitentes.

Como puede apreciarse en las Figuras 2 y 3, son visibles las alteraciones provocadas por el asentamiento (minero) y la actividad minera en el sector; donde además se contempla un conjunto desordenado de construcciones en lugares no aptos para ello. No existe infraestructura sanitaria alguna, los desechos, aguas servidas y efluentes mineros son descargados directamente a las quebradas, lo que transforman al asentamiento minero en una zona altamente contaminada y de alto riesgo para las personas que habitan en el sector.



Figura 2. Vista panorámica del área minera Nambija (Condominio norte)

La quebrada del Fierro, principal drenaje de la zona atraviesa el área de este a oeste, es la receptora del agua de los afluentes tributarios intermitentes producto de las aguas de lluvias y del agua de uso doméstico local, así como, de los vertidos y aguas producto de descargas de desechos mineros (relaves); y, de gran parte de las aguas servidas del sector.

La población del sector vive directa e indirectamente de la minería, por lo que se hace necesario un manejo sustentable del recurso sin perjudicar el ámbito socio ambiental del área de influencia.



Figura 3. Imagen satelital de las minas de Nambija. (Fuente: Google Earth)

Sin embargo, las actividades mineras informales, la falta de guía técnica en las operaciones y los procesos rudimentarios para la explotación y beneficio mineral inciden directamente en la contaminación de los sectores aledaños al asentamiento minero, consecuentemente los vertidos (efluentes), con altos contenidos en metales pesados incluyéndose el mercurio (Hg), producen acumulación y posterior alteración de las características físico – químicas primarias del suelo y agua.

Frecuentemente la exposición a mercurio no se limita a los mismos mineros, sino se extiende a su familia, esto debido a que en muchos de los casos los mineros artesanales queman la amalgama directamente sobre la estufa de su cocina o en el patio de sus casas, donde tienen la mayor privacidad. Por ello, para mejorar por un lado la eficiencia de la actividad minera y por otro lado disminuir y/o mitigar la contaminación por mercurio, se plantea la presente investigación en una de las zonas con mayor tradición minera del Ecuador y también una de las zonas de mayor índice de contaminación por mercurio.

3.2.2. Caracterización geológica

El área minera Nambija, geológicamente constituye parte de la cordillera de Nanguipa y su configuración está dada por el tectonismo desarrollado en la era Terciaria, durante la formación de la Cordillera de los Andes; se caracteriza por un conjunto de lomas con crestas alargadas que convergen a una depresión representada por depósitos aluviales ubicados en el sector denominado El Playón (Dávila, 1997; Easdon, 2004). Ubicado en el denominado techo colgante sobre el Batolito de Zamora y está constituido por rocas volcano-sedimentarias de la división Zamora. Al oeste de Zamora afloran hasta la Cordillera Real meta-sedimentos, gneises y esquistos de la División Loja (Baldock, 1982).

Nambija contiene una secuencia sedimentaria (metamorfizada), que hasta donde se conoce, tiene una potencia promedio de 300 m. Está conformada principalmente por rocas calcáreas micríticas, areniscas, skarns y cuarcitas. En menor proporción hay lutitas, areniscas calcáreas, limolitas, mármoles y hornfels. Esta secuencia sedimentaria puede ser correlacionada litológicamente con la Formación Santiago del triásico (Jurásico). Aquí se la denomina simplemente “Serie Nambija” y constituye en parte un Roof Pendant sobre el Batolito de Zamora.

En algunos sectores esta secuencia se encuentra intruída por cuerpos dioríticos, cuarzodioríticos, monzoníticos y diques andesíticos. En otros sectores tobas verdes cloritizadas tapizan discordantemente la superficie.

La secuencia estratigráfica tiene una orientación general 330° a 350° NW y buzamientos suaves de 10° a 15° al NE en la parte alta del cerro Mapasingue y buzamientos de 30° a 45° al NE hacia el Norte de Mapasingue y cerca de la quebrada Nambija (Dávila, 1997; Easdon, 2004). Estos cambios de buzamiento se deben a efectos combinados de dislocación de bloques y plegamiento suave. Un sistema de fracturamiento - cizalla paralelo a la falla principal N 15° E con 81° SE, parece ser el sistema usado por las soluciones hidrotermales como los canales alimentadores de la mineralización aurífera.

De acuerdo a las medidas de los manteos de los estratos, se determinó que la estructura más grande en Nambija es un sinclinal abierto, fallado en bloques y cuyos flancos están localizados en Mapasingue y el Tierrero, estando su eje en la Quebrada del Fierro.

El modelo aproximado de mineralización hospedada en rocas transformadas previamente por metasomatismo de Nambija consta de tres etapas principales:

Estadio 1:

En esta etapa, las rocas existentes alrededor de la intrusión experimentan recristalización. La caliza se transforma en mármol, las lutitas y tobas se convierten en hornfels, y las areniscas y limonitas se convierten en cuarcitas. Además, se forman skarns de reacción a lo largo de los contactos geológicos.

Estadio 2:

Durante esta etapa, los mármoles relativamente puros se transforman en skarns debido a la infiltración de fluidos hidrotermales y magmáticos en las rocas de contacto. Se forman granates ricos en calcio, como la andradita y la grossularita, y también se desarrollan hornfelds calco-silicatados. Este proceso implica un metamorfismo y metasomatismo progresivo, durante el cual un fluido mineral evoluciona y se inicia la deposición de la mena.

Estadio 3:

El Estadio 3 es retrogrado (destrutivo) y ocurre durante el enfriamiento del plutón asociado. Durante esta etapa, el calcio tiende a ser lixiviado y se introducen elementos volátiles con el desarrollo de minerales como la epidota baja en hierro y la clorita. A medida que la temperatura desciende, los sulfuros se precipitan. La alteración es generalmente controlada estructuralmente y corta a través de los skarns, depositando sulfuros más allá de los límites de los mármoles y hornfels. Aquí, las reacciones con el mármol neutralizan las soluciones hidrotermales y se desarrollan menas de sulfuros de alto grado (ver Mapa geológico, Figura 4).

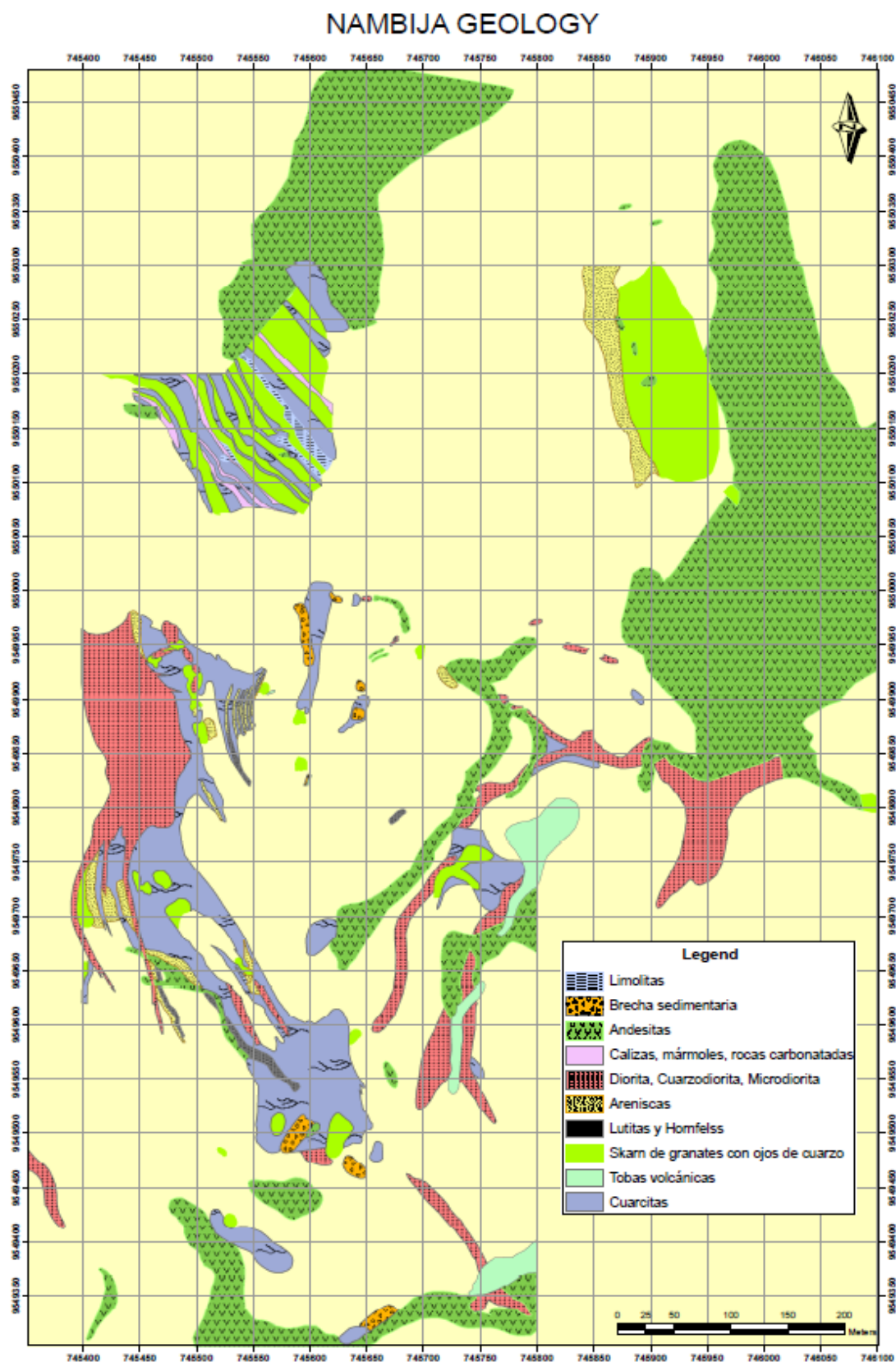


Figura 4. Mapa geológico del área minera Nambija

3.2.3. Litología y Mineralización

Con relación a la litología, en el área están presentes formaciones sedimentarias marinas, de edad mesozoica, intruída por el batolito de Zamora. El sector puede ser considerado como un depósito tipo Skarn o reemplazamiento en cuerpos irregulares y tabulares desarrollados cerca de fallas y fracturas en estratos sedimentarios químicamente favorables. Entre el cerro de Mapasingue y El Playón aflora un potente paquete sedimentario en el que dominan las cuarcitas hacia la parte superior; en tanto que en la parte inferior se definen niveles de areniscas, calizas, cuerpos de mármoles, areniscas calcáreas y lutitas silíceas y ocasionales brechas calcáreas con clastos de porcelanita blanca (Dávila, 1997; Easdon 2004). La serie tiene una potencia de 270 m.

Los estratos presentan cambios laterales de facies. Las areniscas se vuelven lateralmente más calcáreas y se interdigitan con lutitas, limolitas o areniscas arcillosas. Las facies calcáreas han sido recrystalizadas en parte y skarnificadas parcialmente, constituyéndose en buena roca huésped para precipitar menas auríferas desde soluciones hidrotermales ricas en oro y sílice. También ocurren diques y capas de andesitas porfídicas en la parte alta del cerro Mapasingue. en su flanco sur occidental, y en la quebrada Nambija y del Fierro. Pequeños afloramientos de brechas volcánicas andesíticas asociadas a fallas, ocurren en la parte centro sur del área (Easdon 2004).

La mineralización de oro en el sector de Mapasingue y El Playón se encuentra principalmente en cuarcitas verdes (ver Figura 5), areniscas calcáreas y rocas skarnificadas en diversos grados (ver Figura 6). Aportes mineralizantes del 3-5% de pirita se puede observar en estas rocas. Las rocas andesíticas contienen algo de pirita en fracturas y microfracturas.



Figura 5. Cuarcita verde (alteración epidótica), asociada a una vetilla



Figura 6. Skarn de epidota con mineralización de oro diseminada

En un estudio realizado, se compararon las leyes de oro versus la litología en un conjunto escogido de muestras de todos los sectores. En el sector denominado “Gold Star” las muestras

fueron tomadas en interestratificaciones que contienen lentes de calizas, niveles de cuarcitas y horizontes de skarn con una mineralización rica en oro, lo cual tiene relevancia por cuanto el muestreo realizado en el área minera se lo hizo del stock mineral explotado en diferentes frentes de producción (muestra compuesta). Los resultados de este análisis son:

Tabla 1. Leyes de oro versus litología por sectores de Nambija

LITOLOGÍA	RANGO DE VALORES Ppm (g/t)	VALOR ACUMULADO Ppm (g/t)	NUMERO DE MUESTRAS	VALOR PROMEDIO Ppm (g/t)
Gold Star	---	912,91	221	4,13
Skarn de epidota	0,01 - 13,26	43,34	18	2,55
Skarn de granates	0,05 - 20,80	374,33	168	2,23
Skarn de bajo grado	---	38,86	20	1,93
Calizas	0,01 - 0,05	257,90	207	1,25
Areniscas	0,01 - 7,12	108,80	89	1,22
Cuarcitas	0,04 - 14,35	61,24	52	1,14
Limolitas / lutitas	---	6,21	10	0,62
Skarn de grano medio	0,02 - 1,33	7,25	16	0,45
Andesitas	0,01 - 2,89	4,03	22	0,18
Zonas de falla	0,01 - 0,58	1,87	15	0,12

Fuente: Informe de exploración Geológica de las minas de Nambija, Ing. Oscar Dávila.

Dos tipos principales de alteración están presentes en Nambija: la hipogénica y la supergénica.

- La alteración supergénica se trata de una meteorización y un proceso superficial que involucra soluciones meteóricas, afecta a la parte exterior de las galerías desarrollando caolinización en tobas e intrusivos, hematización y depositación de pirolusita en fracturas y planos de falla, usual en esta zona.
- La alteración supergénica es frecuentemente considerada como un fenómeno metasomático porque involucra hidrotermalismo y metamorfismo de contacto. Nambija puede ser considerado como un proceso pirometasomático, porque los minerales como andradita, tremolita y diópsido (todos presentes en los skarn de Nambija) testifican las

altas temperaturas involucradas. Es la más importante alteración, pues la roca afectada por esta alteración es una buena hospedadora de la mineralización de oro (Dávila, 1997).

De acuerdo a las medidas de los manteos de los estratos, se determinó que la estructura más grande en Nambija es un sinclinal abierto, fallado en bloques y cuyos flancos están localizados en Mapasingue y el Tierrero, estando su eje en la Quebrada del Fierro.

Los esfuerzos producidos por las fallas principales, de dirección 10/70W, dieron origen a un sistema de fallas y fracturamientos secundarios con direcciones 110/80°W y 220/40°NW; y, también originaron un sistema de fracturamiento paralelo a las fallas principales con dirección 10 (a 20) / 70 (a 80)W (Dávila, 1997).

Las actividades mineras realizadas en esta área han acelerado los diversos procesos geodinámicos, cambiando las condiciones paisajísticas que influyen en la morfología y morfometría de las diferentes geoformas del sector. Se observa el predominio de una erosión acelerada debido a las actividades mineras realizadas por la actividad humana, han destruido todas las condiciones naturales. Toda el área se encuentra intervenida y nunca se ha realizado una planificación para la ejecución de los diferentes trabajos que requiere la actividad minera (Auditoría Ambiental, 2005).

3.3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

Para incrementar la eficiencia de la investigación se optó por la metodología exploratoria correlacional, que es un enfoque de investigación que combina elementos de la metodología exploratoria y la metodología correlacional.

- La metodología exploratoria se utiliza para explorar y comprender fenómenos poco conocidos o poco estudiados. Estos estudios exploratorios identifican tendencias, relaciones potenciales entre variables y establecen el tono para investigaciones

posteriores más rigurosas.

- La metodología correlacional, por otro lado, se utiliza para evaluar la relación entre dos o más variables. La investigación correlacional consiste en evaluar dos variables, siendo su fin estudiar el grado de correlación entre ellas.

Inicialmente se realizaron recorridos por el área minera con la finalidad de familiarizarse con cada una de las actividades o laboreos mineros que se desarrollan; y, los procesos utilizados para la extracción de oro (amalgamación), lo que sirvió de base para seleccionar: las labores mineras y/o frentes de explotación en producción para poder obtener una muestra mineral representativa.

En las instalaciones de maquinaria minera (plantas de beneficio), se observó los métodos y técnicas para la extracción y recuperación de oro, lo que sirvió para definir en qué procesos se podría plantear una mejora. La finalidad es probar reducir el mercurio utilizado (reducción en la fuente), al optimizar la cantidad de mercurio suministrado (y recuperado), y evitar las pérdidas de mercurio en el proceso (amalgamación).

3.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO MINERO - ARTESANAL

Se realiza en dos fases; una de campo y la otra de gabinete. En la primera fase se realiza el seguimiento al proceso de producción minera; mientras que, en la segunda fase se relaciona y describen los aspectos técnico – productivos desarrollados en el área minera, en base a:

- ✓ Un seguimiento del proceso productivo dentro del área minera.
- ✓ Determinación de los métodos y técnicas seguidos por los mineros para la recuperación de oro.
- ✓ Determinación de la granulometría óptima para una amalgamación efectiva.
- ✓ Estudio de la influencia de la granulometría dentro del proceso de amalgamación con el

equipo utilizado por los mineros.

- ✓ Análisis del proceso de amalgamación y dosificación de mercurio.
- ✓ Determinación de los procesos con pérdidas de mercurio y la forma de mitigarlos.
- ✓ Determinación de la efectividad promedio de recuperación del proceso de amalgamación (análisis de la ley de cabeza y relaves).
- ✓ Uso de retortas.

3.4.1. *Procesamiento tradicional*

Las técnicas de procesamiento utilizados por el sector de la pequeña minería aurífera primaria muestran una gran variedad de técnicas individuales, que dependen especialmente de la situación financiera de los mineros y de sus conocimientos tecnológicos.

El método más primitivo y simple de procesamiento en la pequeña minería aurífera primaria es el siguiente:

- Selección manual de trozos de mineral con chispas de oro;
- Trituración y molienda con un martillo manual;
- Lavado del material molido utilizando una batea para separar el oro grueso;
- Si el oro es fino, amalgamación manual del concentrado en batea;
- Estrujado de la amalgama utilizando un paño fino para separar el mercurio libre;
- “Quema” de la amalgama al aire libre para evaporar el mercurio.

La última etapa la realizan sin ningún equipo para recuperar mercurio, y sin utilizar implemento de seguridad alguno contra los vapores de éste. Utilizan varias fuentes de calor, desde el carbón vegetal; sopletes a gas-oíl, gas propano o acetileno, hasta hornillas a queroseno muy comúnmente utilizadas en las cocinas de los mineros (GAMA).

Un primer paso en el propósito de mecanización constituye el uso del llamado “molino chileno” o “trapiche”. En este molino, el uso de mercurio es casi generalizado, para combinar molienda y amalgamación. Su régimen de funcionamiento produce excesiva atomización del mercurio. En general, después del molino chileno, se utilizan placas amalgamadoras o una simple canaleta empedrada (tojilla), que sirven como trampas para retener el oro grueso libre y la amalgama. Obviamente, ni las placas, ni las canaletas empedradas sirven para garantizar una buena recuperación del oro libre, la amalgama y el mercurio atomizado.

En operaciones más grandes es común el uso de:

- Pequeñas trituradoras de mandíbulas;
- Molinos a bolas, desde 2' x 3' hasta 3' x 4', capacidades entre 5 a 15 tpd
- Canaletas empedradas, placas amalgamadoras, mesas concentradoras, etc.

Como en los molinos chilenos, también es casi común la adición de mercurio, a los molinos a bolas, con similar o mayor efecto de atomización del mercurio y, como consecuencia, las pérdidas de mercurio en polvo en la etapa de concentración son también considerables (GAMA).

Generalmente, la recuperación de oro en las plantas de procesamiento en las minas primarias es baja, debido a que parte del oro muchas veces no es recuperable con sus métodos rústicos de concentración gravimétrica o por amalgamación. Más aún si también se pierde oro liberado en las colas, especialmente oro fino y oro laminar (laminado en la molienda). alguna parte del oro también se pierde debido a la insuficiente liberación. La combinación de molienda y amalgamación ocasiona altas pérdidas de pequeñas partículas de oro atrapadas en la harina de mercurio o bajo la forma de flóculos de amalgama-oro, que a veces contienen burbujas de aire o agua atrapadas. Estos flóculos, en general, tienen un peso específico relativamente menor y una gran superficie, por lo que son fácilmente arrastrados a las colas. Las colas generalmente son desparramadas en áreas aledañas a la planta de procesamiento (GAMA).

3.4.2. Descripción del proceso minero – artesanal dentro del área minera Nambija

Los procesos mineros son las actividades y operaciones involucradas en la extracción mineral. Estos básicamente se pueden dividir en tres etapas principales: **1) exploración**, que es el proceso de identificación y evaluación de yacimientos minerales potenciales, **2) la explotación**, que es el proceso de extracción mineral; el método de explotación varía según el tipo de mineral y ubicación del yacimiento, los métodos más comunes son la minería subterránea y la minería a cielo abierto; y, **3) el procesamiento** (beneficio mineral), que es el proceso de separación del mineral valioso de la roca que lo contiene, los métodos comunes de procesamiento incluyen la trituración, la molienda, la concentración y la fundición.

En el área minera de Nambija, los desarrollos y laboreos mineros corresponden a un sistema mixto de explotación de oro; desarrollada por minería subterránea en la mayoría de los casos y con laboreos intermitentes con el sistema de explotación a cielo abierto (ver Figuras 7 y 8). Las labores mineras empiezan con el arranque del mineral de los frentes de explotación y avance, que corresponden a las diferentes sociedades mineras del sector.



Figura 7. Laboreo minero subterráneo



Figura 8. Laboreo minero a cielo abierto

La minería subterránea es el método de extracción mineral que se realiza excavando frontones y galerías mineras, este tipo de minería es menos disruptiva para el medio ambiente, ya que no requiere la remoción y eliminación de grandes cantidades de tierra y roca que generalmente ocurre en el destape en la minería a cielo abierto.

Dentro del área minera, las galerías y/o frontones promedio generalmente tienen las siguientes características: 1,5 m de ancho por 2 m de alto, con un drenaje en la parte central en algunos casos del 0,5%, con entibado o fortificación de madera en forma puntual, debido a las buenas características físico químicas de la roca mineralizada (cuarcitas, skarn), que permite que las galerías tengan una buena estabilidad.

Para la apertura y desarrollo de las galerías mineras se utiliza la tradicional técnica de perforación y voladura; utilizando un martillo perforador "Pionjar y/o YT27" se franquean barrenos de 45 mm de diámetro, el proceso comienza con la perforación de un orificio piloto (para formar la cara libre), que se utiliza para establecer la ruta de la galería; la profundidad varía entre 1,20 y 1,60 metros, conforme las necesidades de avance.

La voladura de roca se la realiza utilizando explosivos (emulsiones), con un diseño de malla de voladura conformada generalmente por 22 barrenos, como promedio, lo que puede variar si a la par se hacen desbanques para aumentar el tonelaje.

Generalmente, el avance por la voladura es del orden del 85 al 95%, y el gasto específico de explosivo es de aproximadamente de 2,0 kg/m³. Para el carguío de barrenos se utiliza carga de fondo (emulsión más el fulminante con mecha lenta como iniciador), carga de columna el ANFO como agente de voladura (nitrato de amonio + diésel) y en el retacado (arena de relave).

Para la extracción del mineral, las condiciones de laboreo en el interior mina (galerías), se la efectúa de forma muy rudimentaria, utilizando palas, barretas, picos y combos, dependiendo de las características propias y del tipo de roca del frente en desarrollo.

Para el carguío y transporte del mineral y el desalojo de roca estéril (material excavado), desde los diferentes frentes de explotación y plataformas temporales a las plantas de procesamiento (beneficio) y escombreras, se utilizan: saquillos, carretillas, vagones mineros (burras), cintas transportadoras, “winchas” (cabrestantes que se utilizan para el transporte de mineral) y “tarabitas” (tipo de sistema de transporte aéreo utilizado para transporte de mineral), dependiendo del sector de extracción y consecuentemente de las condiciones económicas del dueño de la labor minera o de la sociedad minera (ver Figuras 9, 10 y 11).



Figura 9. Cintas transportadoras (stock pile)



Figura 10. Extracción mineral (wincha)



Figura 11. Tarabita (transporte aéreo de mineral)

Los vagones mineros (burras) utilizados en minería subterránea suelen tener una capacidad de 1 tonelada y son operados manualmente (Figura 12). En ocasiones, se observan adaptaciones en desarrollos a cielo abierto, donde se acoplan tolvas de 1 tonelada de capacidad a vehículos (Figura 13). La distancia y el método de transporte varían según el frente y el sistema de explotación, la ubicación de las plantas de procesamiento (beneficio), el sector de acopio mineral (stock pile), la disposición de las escombreras y/o botaderos, y la disposición final, entre otros factores.



Figura 12. Vagón minero “burra” (minería subterránea)



Figura 13. Adaptación para transporte de mineral (minería a cielo abierto)

Para la conminución (trituración y molienda), el mineral de mina se lo reduce utilizando trituradoras de mandíbula (trituración primaria), el tamaño del producto obtenido varía entre los

2-3 cm de diámetro (ver Figura 14). El mineral triturado se acopia y o se trasporta hasta los molinos para su posterior proceso.



Figura 14. Trituradora de mandíbulas

En las plantas de procesamiento (tipo) para el beneficio del mineral dentro del área minera, generalmente los equipos instalados para el proceso son: **1)** Molinos (trapiches) chilenos y molinos MIN (adaptaciones de los trapiches chilenos, que están diseñadas para mejorar la eficiencia y la capacidad de los molinos chilenos tradicionales, ver Figura 15), por su capacidad de procesamiento se utilizan en ciclos de molienda de 8 días o hasta que se termine el mineral acumulado en stock; los medios de molienda son las 2 ruedas o boleadoras cuyo peso aproximado es de 1 ton c/u, este puede variar dependiendo del diseño y de los materiales utilizados **2)** Molinos giratorios de bolas o de barras “chanchas”, los medios de molienda (bolas o barras) son cargados; su utilización está limitada hasta 55 Kg de mineral por ciclo de molienda. **3)** Los canalones ubicados generalmente en los puntos de descarga de los molinos; y, **4)** los tanques de sedimentación, se ubican al final de los canalones como última alternativa para la

recuperación de oro, estos generalmente se lavan y procesan cuando termina el ciclo de molienda (ver Figura 15).



Figura 15. Instalación (tipo) de Planta de beneficio mineral, dentro del área minera

El objetivo de la molienda es la liberación del oro (Au), de la roca de mena dejando las partículas de oro libre (nativo), para permitir que entre en contacto con el mercurio para formar la amalgama (concentración). Cabe mencionarse que con la amalgamación solo se recupera parte de la fracción de oro grueso, en tal sentido las partículas de tamaño inadecuado se pierden en los relaves (que son los residuos que quedan luego de extraer el oro).

En la figura 16 se observa una planta de beneficio en el Condominio minero Norte. Esta planta se encuentra en un espacio reducido e incluye vivienda, trituradora, molino de tipo chileno y canalón, con un sistema de descarga directa de relaves.



Figura 16. Planta de beneficio en el C. Norte, con un sistema de descarga directa de relaves

El proceso de molienda en los molinos chilenos y/o molinos MIN se realiza utilizando un flujo continuo y constante de agua con un caudal de 0,62 L/s (diámetro de manguera de 1") . Este caudal es necesario para la formación de la pulpa que necesita el molino para su funcionamiento (ver Figura 17). El uso de agua en el proceso de molienda es importante para la eficiencia del proceso, ya que reduce el desgaste y la fricción. Además, un flujo bajo de agua puede provocar una molienda deficiente y la obturación de las mallas de descarga, que son utilizadas para separar y clasificar los materiales molidos (ver Figura 18).



Figura 17. Molino MIM, en funcionamiento (pulpa)



Figura 18. Malla de descarga (rejilla), molino tipo chileno

La fracción mineral pesada, amalgama y mercurio quedan en el interior del molino; mientras que, la fracción liviana y las partículas pulverizadas se descargan a través de una malla metálica a un canalón (cemento), dispuesto en forma inclinada con longitudes variables, entre

3,0 a 5,0 metros y 0,50 metros de ancho (promedio); cubierto con bayetas (geotextiles y/o cobijas); que tiene por objetivo que se sedimente el oro y otros minerales con pesos específicos elevados, que salen del molino; periódicamente estas bayetas son lavadas acumulándose los sedimentos pesados producto del bayeteado para su posterior tratamiento (ver Figura 19). Finalmente, como última opción de recuperación están los tanques de sedimentación que generalmente se ubican al final de los canalones.



Figura 19. Lavado de bayetas, previa concentración

Para producir la amalgamación, en los molinos de barras (chanchas), el mercurio se adiciona inicialmente; en tanto que, en los molinos chilenos (trapiches), el mercurio se adiciona al inicio del ciclo de molienda y periódicamente formando parte de la molienda, hasta completarse el ciclo (circuito abierto).

Una vez terminado el ciclo de molienda - amalgamación, se procede con la “liquidación” o lavado de los molinos, utilizándose canalones, tamices, baldes, platones.

En los molinos de barras el producto de la molienda amalgamación se deposita en una

tina, luego se baldea y el concentrado se platonea (bateo manual) para recuperar el oro (ver Figura 20).



Figura 20. Lavado del molino de barras (liquidación)

En los molinos chilenos el proceso de lavado es diferente por la cantidad de concentrado que queda al interior del molino, para proceder a la recuperación inicialmente se tamiza (cierne), para separar el mineral grueso que queda al interior (ver Figuras 21 y 22).

Para reducir la cantidad de concentrado (arena) y concentrar la amalgama y el mercurio libre se continua el laboreo con el “baldeado”, que es un proceso de separación gravimétrica que se utiliza para recuperar el oro del concentrado, en donde el oro y los otros minerales pesados se hunden al fondo del balde, mientras que los materiales más ligeros como la roca y arena flotan y son descargados (ver Figura 23).



Figura 21. Lavado del molino chileno (liquidación)



Figura 22. Recuperación y concentración de la amalgama (cernido)



Figura 23. Baldeado (concentración por densidad)

Algunas sociedades mineras utilizan concentradores centrífugos genéricos que son más eficientes que el baldeado en la recuperación; ya que estos equipos recuperan partículas finas, lo que puede resultar en una mayor recuperación de oro, el tiempo de trabajo es relativamente menor (ver Figura 24).



Figura 24. Concentrador centrífugo genérico (concentración por densidad)

Finalmente la fracción producto obtenida (concentrado final) se platonea para la separación de la amalgama. El platoneo o bateo es una técnica artesanal utilizada para la extracción de oro mediante el uso de una batea o platón (ver Figura 25).



Figura 25. Platoneo (bateo manual)

Se limpia la amalgama para eliminar remanentes de hierro producto del desgaste y fricción de los anillos y soleras (elementos de molienda), con la ayuda de un imán que son acumulados para luego ser desechados (ver Figura 26).



Figura 26. Eliminación de remanentes de hierro (imán)

La amalgama en esta fase está altamente viscosa. La separación de la amalgama y el mercurio remanente se lleva a cabo mediante el proceso del exprimido o estrujado manual, donde se comprime fuertemente con la ayuda de un pañuelo o un trapo. Esto obliga al mercurio líquido no amalgamado a escurrirse entre los poros del tejido (ver Figura 27). El mercurio recuperado es almacenado para ser reactivado (cuando la sociedad minera tiene el equipo para la reactivación); y, posteriormente ser nuevamente reutilizado. La amalgama es lavada previa a su quema, para el efecto se utiliza cloro, azúcar, panela, pasta de dientes entre otros, como agentes coalescentes. El objeto del lavado de la amalgama es eliminar la mayor cantidad posible de material remanente (impuro) o ganga que se haya adherido a las partículas de oro durante la formación de la amalgama. Esto permite obtener un producto final más puro, y después de este proceso, la amalgama se ve más limpia y brillante (ver Figuras 28 y 29).



Figura 27. Extracción el exceso de mercurio (exprimido)



Figura 28. Limpieza y lavado de la amalgama



Figura 29. Amalgama (esponja de oro), previo al quemado

La faena final es la separación del oro de la amalgama Au-Hg; para lo cual, posterior al lavado la esponja de oro, se deposita en retortas para la evaporación y destilación del mercurio. La retorta es un dispositivo utilizado para calentar la amalgama y separar el oro del mercurio, que pueden mejorar el procesamiento y el refinado reduciendo el uso de mercurio en la extracción de oro artesanal y a pequeña escala; y, a su vez, proteger la salud de los trabajadores y de las comunidades aledañas al reducir el uso de mercurio, ya que éste puede recuperarse y reciclarse.

Ocasionalmente se utilizan recipientes abiertos, ya sea de bronce o arcilla e inclusive se usan latas de atún para la quema. El calentamiento directo es proporcionado a través de diferentes quemadores, como hornillas de cocina, mecheros, sopletes, utilizando gas comúnmente (ver Figuras 30 y 31); el requerimiento es alcanzar temperaturas mayores a 360 °C, para lograr la gasificación del mercurio y así llegar al producto final (ver Figura 32).



Figura 30. Quemado de la amalgama en la retorta (separación Au-Hg)



Figura 31. Quemado final (refinado)



Figura 32. Pesaje (producto final)

Es importante resaltar que no se lleva un inventario metalúrgico de las actividades de las sociedades mineras. Sin embargo, según la experiencia de los mineros, se estima que se recupera entre el 30% y el 45% del oro existente en el mineral de mena que ingresa a las plantas de beneficio para su procesamiento. Además, se estima que las pérdidas de mercurio en las plantas de beneficio son en promedio del 40% al 50%, ya sea que se pierda en el proceso o se escape en los relaves. Empíricamente, se considera que para lograr concentrar el equivalente a 100 g de oro (Au) se necesitan aproximadamente 454 g de Hg (mercurio).

3.4.3. Diagrama de flujo del proceso minero

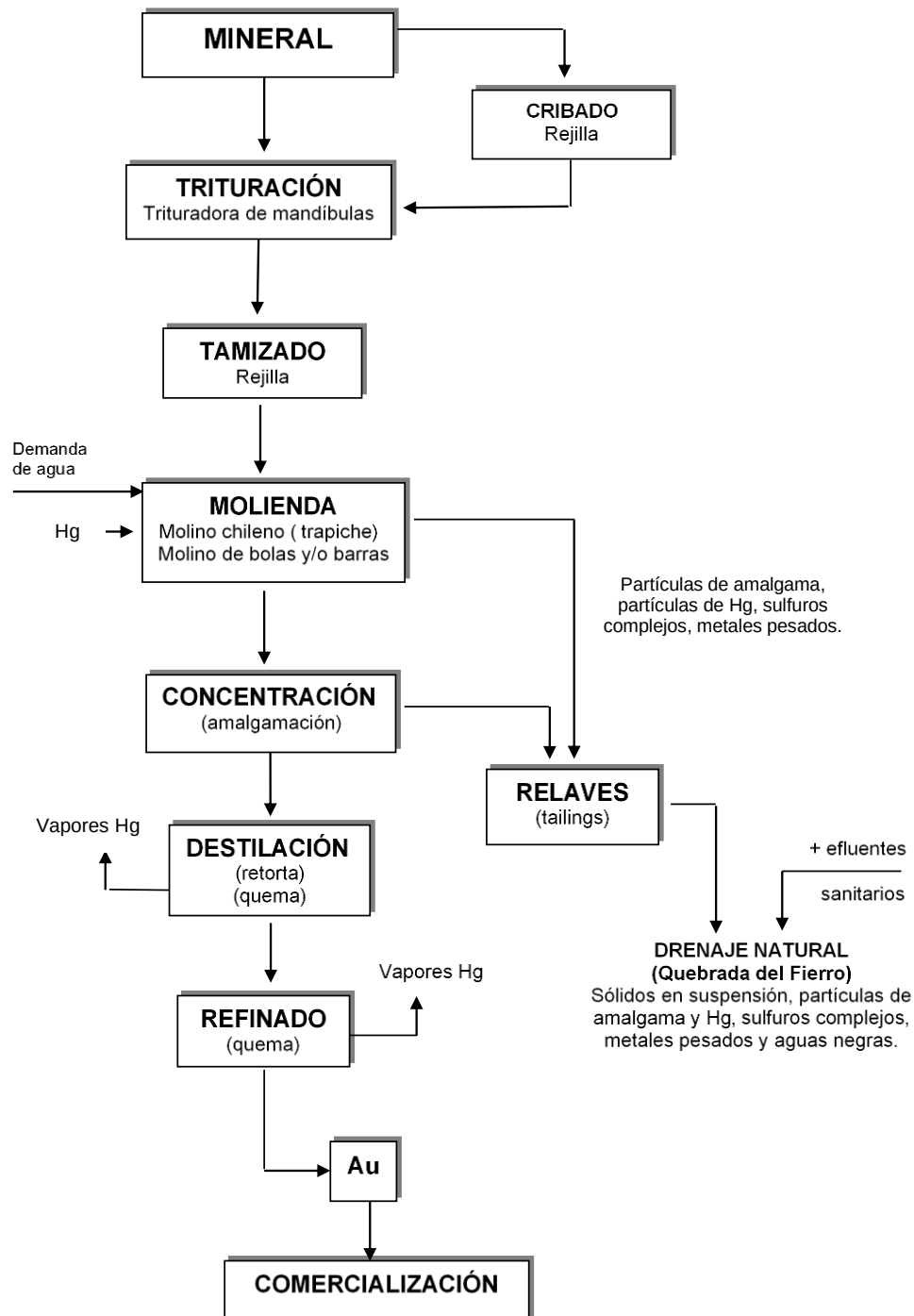


Figura 33. Diagrama de la operación minera e incidencia del mercurio

3.5. SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO

Una herramienta fundamental en el estudio actual es la selección de los sitios de muestreo para obtener la muestra representativa del mineral de mena (skarn), que se procesa en el área minera. El objetivo del muestreo es lograr la homogeneidad del mineral. En este caso, se establecieron 18 puntos de muestreo en la zona de estudio para recolección de 10 muestras de mineral y 8 muestras de aguas residuales y/o de efluentes mineros (ver Figura 34).

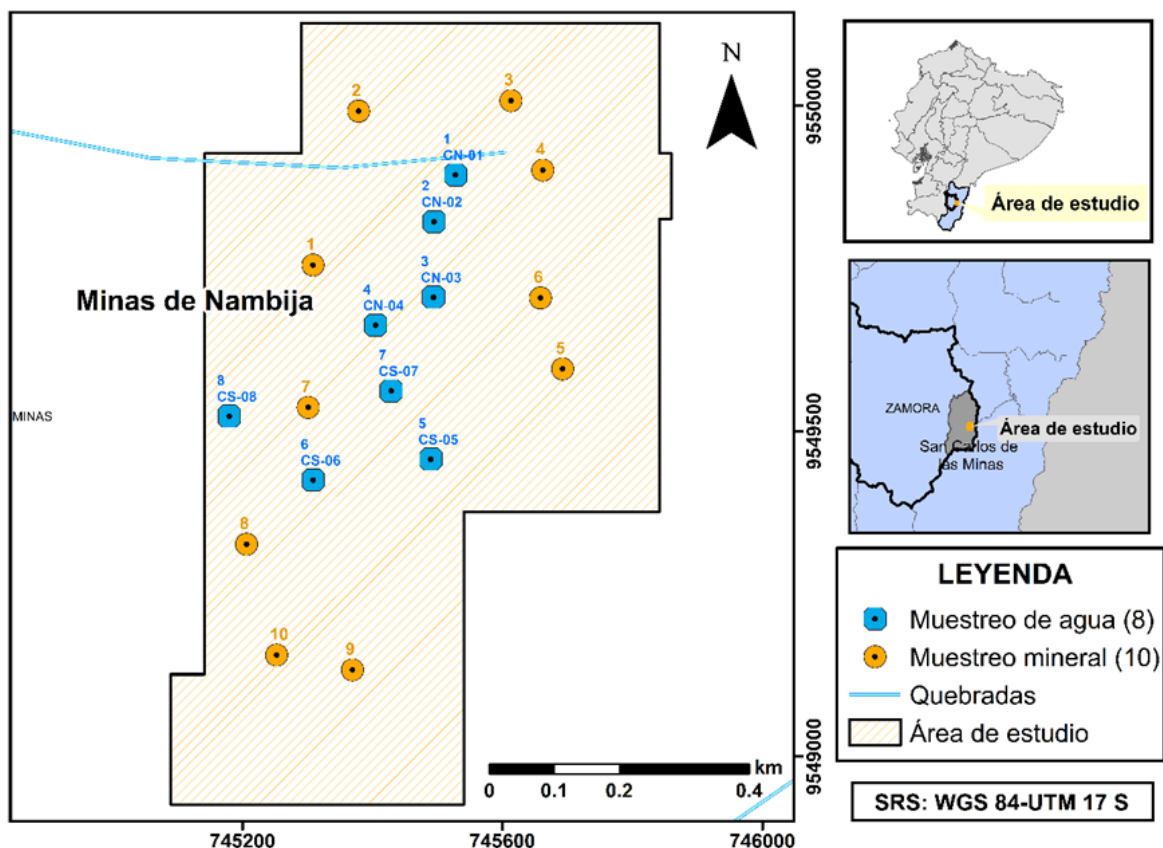


Figura 34. Localización de los puntos de muestreo en el área minera Nambija

Para obtener la muestra mineral que se va a utilizar en los ensayos, se realizaron muestreos en 8 frentes mineros (submuestra 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8 y 9) y en 2 escombreras y/o botaderos de roca antigua (submuestra 6 y 10), que estaban siendo removidos y trabajados por los mineros de la zona en ese momento. Se recogieron un total de 450 kg de muestra.

Las submuestras que se colectaron en los frentes mineros en operación se tomaron del stock mineral triturado acumulado en las tolvas (stock pile), por lo que ya tenían un tamaño adecuado para ser procesadas en el molino de barras. Asimismo, las submuestras colectadas en las escombreras, por su naturaleza al ser de botaderos tenían diferente tamaño, por lo que necesitaron ser trituradas hasta obtener una fracción de diámetro ≤ 3 cm, para poder ser procesadas en el molino (amalgamador) de barras. El método de muestreo utilizado fue el “chip sampling”, que es una técnica de muestreo utilizada en la exploración y explotación minera para obtener muestras representativas de un depósito mineral. Se usa comúnmente para el control de la ley del mineral en minas productivas (Buitrón et al., 2021).

La preparación mecánica de la muestra representativa referencial fue: trituración, homogeneización y cuarteo previo a su análisis, dando como resultado ocho muestras equivalentes de 55 kg cada una (S#1, S#2, S#3, S#4, S#5, S#6, S#7 y S#8). Las muestras se procesaron y analizaron in situ. El método utilizado para determinar la ley de cabeza (feed) de la muestra mineral fue el ensayo al fuego “fire assay” y se realizó en el Laboratorio Químico Metalúrgico JV Metals, ubicado en El Pache, Portovelo, Ecuador. Es el método de análisis químico más confiable y preciso para determinar el contenido de oro en minerales, consiste en fundir la muestra con reactivos y fundentes, la mezcla de muestra y fundentes se coloca en un crisol de arcilla refractaria y se calienta a alta temperatura en un horno hasta que se funde completamente, el material fundido se vierte en una copela, donde se forma una perla metálica compuesta por plomo y oro, finalmente la perla metálica se separa de la copela y se pesa. Es una de las técnicas más utilizadas en la prospección de Au en todo el mundo (Baena et al., 2021).

3.6. METODOLOGÍA PARA DEFINIR EL TAMAÑO ADECUADO DE PARTÍCULA (MALLA)

La caracterización del grado de liberación del mineral de interés en función del tamaño de partícula es una variable clave (Pérez-García, 2021), que ayuda a determinar el tamaño de

molienda adecuado para obtener una mayor recuperación de oro (O. Altun y D. Altun, 2021).

Las pruebas iniciales de molienda – amalgamación se realizaron en un molino (amalgamador) de barras (ver Figura 35), de forma octogonal de 1,30 m de longitud, con una capacidad total de 0,297 m³ y una velocidad de 70 rpm. Este molino, comúnmente llamado en el sitio "chancha" o cilindro de amalgamación porque se utiliza para realizar el proceso de amalgamación, es un dispositivo que utiliza barras de hierro como medio de molienda, para reducir el tamaño de los minerales (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2022). Funciona por el impacto y la fricción que se produce entre las barras contra las partículas del material a fraccionar. Los parámetros técnicos estándar y constantes durante las pruebas para garantizar el correcto funcionamiento del molino amalgamador de barras fueron: una *carga circulante* de 55 kg de muestra, adecuada para un molino de tamaño mediano; una *carga de molienda* de 120 kg de barras; una *relación sólido-líquido* de 1/1 (pulpa), esta relación proporciona una consistencia adecuada para la molienda fina y la formación de la amalgama; una adición de mercurio de 1 lb (454 g); y, una barra de 1 lb (454 g) aproximadamente de panela (azúcar morena). La panela se utiliza en la minería para mejorar la formación de amalgama y mantener la coalescencia del mercurio. Después de finalizar el proceso de amalgamación, la amalgama se separa de la pulpa mediante lavado y concentración, utilizando el método de baldeado y platoneo (bateo manual). El tamaño de partícula adecuado se determinó mediante ensayos del proceso de molienda-amalgamación para las muestras S#1, S#2, S#3, S#4 y S#5.



Figura 35. Molino de barras (chancha)

El tiempo de molienda utilizado por los mineros fue de 120 minutos. Se evaluó el efecto del tiempo de molienda en la recuperación de oro a partir de cuatro muestras (S#1, S#2, S#3, S#4), que fueron sometidas a 80, 100, 120 y 140 minutos de molienda respectivamente. El objetivo era determinar en cuál de estos ensayos se obtiene la mejor recuperación de oro. Posteriormente, se validaron los resultados mediante un quinto ensayo (S#5), replicando las mismas condiciones estándar y el tiempo de molienda donde se obtuvo la mayor recuperación de oro de las cuatro pruebas.

Estas pruebas se llevaron a cabo a diferentes tiempos de molienda para evaluar la relación de reducción del tamaño de partícula y la liberación y extracción de oro del mineral de mena de Nambija. El objetivo era encontrar el punto en el que se produjera la mayor liberación y extracción de oro, evitando la sobremolienda, las pérdidas de oro y la pulverización del mercurio "floured mercury". Los parámetros utilizados durante la molienda se detallan a continuación:

Parámetros constantes:

- Carga circulante: 55 kg de muestra
- Carga de molienda: 120 Kg de barras
- Razón sólido líquido: 1/1 (pulpa)
- Dosificación de mercurio: 1 lb (454 g)
- Panela: 1 barra (454 g aproximadamente)

Parámetro variable:

- Tiempo de molienda (granulometría adecuada)

3.6.1. Análisis granulométrico (mallas)

A continuación, se tomaron muestras de 250 g de los relaves posterior a la concentración mineral (Au) de cada prueba de molienda/amalgamación, para realizar las pruebas de tamaño de partícula (ensayos granulométricos), en húmedo (lamas pulverizadas) y en seco que nos proporcionan la información sobre la eficiencia de la molienda y la recuperación de oro. Se utiliza el método “Chip sampling” de muestreo, este método consiste en tomar material de puntos distribuidos geométricamente en la masa mineral, ya sea linealmente o formando una malla regular en dos dimensiones (Chas. et al., 1939).

A fin de conocer la distribución de la fracción granulométrica de las muestras de mineral; se realizó un tamizaje sobre estas, con tamices normalizados estándar tipo ASTM. El equipo utilizado fue: 1 juego de tamices (Serie ASTM), 1 vibrotamiz, 1 balanza y 1 estufa. Se realizó el análisis granulométrico en húmedo y en seco para cada una de las muestras.

Para determinar la cantidad de finos (lamas) en la muestra mineral, inicialmente se secaron las muestras para evitar grumos, se pesaron 250 g. de cada muestra. Se monto el equipo, para el efecto se utilizaron los tamices +400 y el +230 (protección de la malla +400), se coloca la muestra

y se regula para que el vibrotamiz trabaje a 80 vibraciones por minuto, por un tiempo de 15 minutos. El proceso se repite para todas las muestras. Para el análisis en seco, luego de secar las muestras se homogeniza, se monta el equipo, se ordena la serie de tamices (previamente se pesa c/u), se coloca la muestra y se regula para que el vibrotamiz trabaje a 70 vibraciones por minuto por un tiempo de 15 minutos. El proceso se repite para todas las muestras.

Los resultados de las pruebas de tamaño de grano se grafican en un formato semilogarítmico (en la abscisa el tamaño de la partícula, y en la ordenada el porcentaje pasante acumulado de partículas). La curva de tamaño de partícula se realizó utilizando la función de distribución de Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S), teniendo en cuenta el peso total y el peso retenido. Esta función describe las distribuciones de tamaño de partícula comparando los valores del porcentaje del pasante acumulado con la abertura de la malla (García et al., 2023).

Los tamices (tamaños de malla utilizados) fueron: #10 (2000 μm), #18 (1000 μm), #35 (500 μm), #60 (250 μm), #120 (125 μm), #230 (63 μm), #325 (45 μm) y #400 (37 μm). La curva de distribución granulométrica permitió visualizar la tendencia homogénea o heterogénea de las fracciones (diámetros) de las partículas. Con base en los resultados obtenidos, se calculó la ley del mineral de cada prueba. Finalmente, se equilibró y analizó la ley de la cabeza y la ley de relaves. La ley de cabeza válida (ley del mineral que sale de la mina y entra en la planta) de la muestra de mineral fue de 7.34 g Au/t (oro) y 1.31 g Ag/t (plata).

3.7. METODOLOGÍA PARA DEFINIR EL APOORTE DE MERCURIO

Se parte de la premisa de que la “dosis óptima” de mercurio sería cero, pero se intentara buscar la menor dosis para que el proceso sea lo más eficiente posible. Para determinar el aporte adecuado de mercurio, se tomó como referencia inicial la cantidad de mercurio (Hg) utilizada por los mineros, 454 g. Así, las muestras S#3 y S#5 fueron alimentadas con 454 g de mercurio (100%), mientras que en las muestras S#6 y S#7 se probó y fueron analizadas reduciendo el Hg

alimentado siendo 340,5 g (75%) y 227 g (50%), respectivamente.

Las condiciones estándar de operación consideradas en la sección anterior se mantuvieron constantes, así como el tiempo de molienda optimizado en la etapa anterior y se escogió el aporte de mercurio como parámetro variable. Luego, se determinó la cantidad de oro recuperado en el proceso para cada ensayo y el oro presente en los relaves con el fin de establecer la recuperación (eficiencia), con la finalidad de reducir el aporte de mercurio para el beneficio mineral en la zona minera. Finalmente, se probó un ensayo (S#8) con la dosificación que dio los mejores resultados para verificar y validar los resultados obtenidos. Se manejaron los siguientes parámetros:

Parámetros constantes:

- Carga circulante: 55 kg de muestra
- Carga de molienda: 120 Kg de barras
- Razón sólido líquido: 1/1 (pulpa)
- Tiempo de molienda: (tiempo más eficiente)
- Panela: 1 barra (454 g aproximadamente), coalescencia

Parámetro variable:

- Dosificación de mercurio: 454 g (1 lb), 340,5 g ($\frac{3}{4}$ lb), 227 g ($\frac{1}{2}$ lb)

3.8. MONITOREO DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE AMALGAMACIÓN A NIVEL MACRO

Como paso complementario, y con base en los resultados obtenidos de pruebas previas en el molino de amalgamación (barras), se realizó un seguimiento a nivel macro de las operaciones de molienda-amalgamación en la planta de beneficio mineral de MiningAndos S.A., ubicada en el sector de Mapasingue dentro del Condominio Minero Sur de Nambija. La planta

consta de dos secciones, cada una con dos molinos de ruedas tipo chileno (circuito abierto). Como antecedente cabe mencionar que, inicialmente, se construyeron dos molinos para procesar el mineral del sector la Sección 1 (ver Figura 36), que era de alta ley en ese momento. Sin embargo, debido al cambio en las condiciones mineras, el aumento en el precio del oro y la variación en la ley mineral, se decidió incrementar la capacidad de procesamiento construyendo dos molinos más para compensar y trabajar minerales de menor ley, la Sección 2 (ver Figura 37).



Figura 36. Planta de Beneficio MiningAndos S.A., Sección 1 (molinos 1 y 2), stock mineral



Figura 37. Planta MiningAndos S.A., Sección 2 (molinos 3 y 4); canalón, arena de bayetas

Los molinos chilenos, también conocidos como trapiches, son ingenios de molienda de minerales que fueron desarrollados en Chile durante la época colonial. Se caracterizan por su simplicidad de diseño, bajo costo de construcción y facilidad de operación. Un molino chileno consiste en un eje principal con brazos que mueven las ruedas en círculos para moler el mineral. Aplican tres efectos en su funcionamiento: fricción, presión (peso de las ruedas), y cizallamiento.

En inicio, se supervisó un ciclo de molienda de 8 días para observar los procesos y fases de la recuperación de la amalgama y los métodos y técnicas utilizados para la recuperación del mercurio. Por lo general, los mineros suministran 454 g de mercurio a cada molino al comenzar la operación y continúan agregando 454 g de Hg/día hasta que se completa el ciclo de molienda; la capacidad de procesamiento es de 250 ton de mineral por sección/ciclo (Prueba 1). La alimentación de material (mineral) a los molinos se realiza de forma arbitraria y/o cuando los molinos están descargados, confiando en la experiencia del molinero. Consecuentemente, se realizaron 3 ciclos de molienda (pruebas 2, 3 y 4), basadas en el procedimiento estándar inicial,

en los que se probó reducir en un 20% la cantidad de mercurio alimentado por día.

Se consideraron los siguientes parámetros: **1)** el tiempo de molienda requerido para el procesamiento, **2)** el volumen de mineral procesado y **3)** el Hg total alimentado y recuperado al final de cada operación en las secciones de molinos 1 y 2 .

3.9. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE LOS EFLUENTES

En el estudio realizado para evaluar la calidad de los efluentes mineros, se tomaron un total de 16 muestras de agua en diferentes puntos de descarga de relaves mineros, efluentes, afluentes y drenajes principales. El objetivo es analizar las concentraciones de metales pesados como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn) y hierro (Fe), para determinar si existe variación en los aportes de mercurio (Hg) en los puntos de muestreo, antes y después al reducir los aportes de mercurio y optimizar el proceso de recuperación.

Para el análisis fisicoquímico, se recogieron muestras simples de aproximadamente 1/2 litro de agua en envases debidamente esterilizados con HCl (ácido clorhídrico) al 10% (bajo el procedimiento estandarizado), estas muestras fueron refrigeradas y transportadas al laboratorio. Todo el procedimiento fue realizado de acuerdo con la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2169:2013 (INEN-Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013). Los ensayos se realizaron en los laboratorios CETTIA-UTPL de la Universidad Particular, ubicado en Loja - Ecuador, y el método de análisis utilizado es el de absorción atómica.

Las muestras CN-02, CN-03 y CS-07 se tomaron de efluentes mineros de aguas residuales resultantes de las operaciones mineras (como relaves, drenaje ácido y metales pesados). Por otro lado, las muestras CN-04, CS-05 y CS-08 provienen de afluentes que son receptores de los efluentes mineros, estos afluentes son cuerpos de agua que reciben los desechos líquidos de la minería y que luego son descargados en la red natural de drenaje

principal. Finalmente, las muestras CN-01 y CS-06 provienen de la red de drenaje secundaria de la concesión minera (ver Tabla 2 y Figura 38).

Durante los muestreos, se midieron varios parámetros físico-químicos in situ, incluyendo pH, Oxígeno disuelto (OD), conductividad, Total de sólidos disueltos (TDS) y salinidad en los puntos de muestreo definidos en la Figura 38, empleando un Multímetro portátil Sension+ MM156 de la marca HACH Sension. Las muestras de agua se codificaron de acuerdo con la zona donde fueron muestreadas, donde C hace referencia al Condominio; N y S, a norte y sur, respectivamente; y de 01 a 08 el número de muestra.

Tabla 2. Puntos de muestreo de agua y tipo de muestra

Codificación (muestra)	Fecha (muestreo inicial)	Fecha (muestreo post)	Coordenada Este	Coordenada Norte	Tipo de muestra
CN - A - 01	6/2/2020	20/5/2021	745.780	9°550.259	Drenaje
CN - A - 02	6/2/2020	20/5/2021	745.747	9°550.187	Efluente
CN - A - 03	6/2/2020	20/5/2021	745.746	9°550.071	Efluente
CN - A - 04	6/2/2020	20/5/2021	745.657	9°550.028	Drenaje principal
CS - A - 05	6/2/2020	20/5/2021	745.742	9°549.822	Drenaje principal
CS - A - 06	6/2/2020	20/5/2021	745.561	9°549.790	Drenaje
CS - A - 07	6/2/2020	20/5/2021	745.681	9°549.927	Efluente
CS - A - 08	6/2/2020	20/5/2021	745.432	9°549.888	Drenaje

Es importante destacar que se hizo todo lo posible para cumplir con el objetivo propuesto, sin embargo, con los medios disponibles no fue suficiente. El avance realizado en cuanto al análisis de calidad de los efluentes se adjunta en el anexo 8.1.

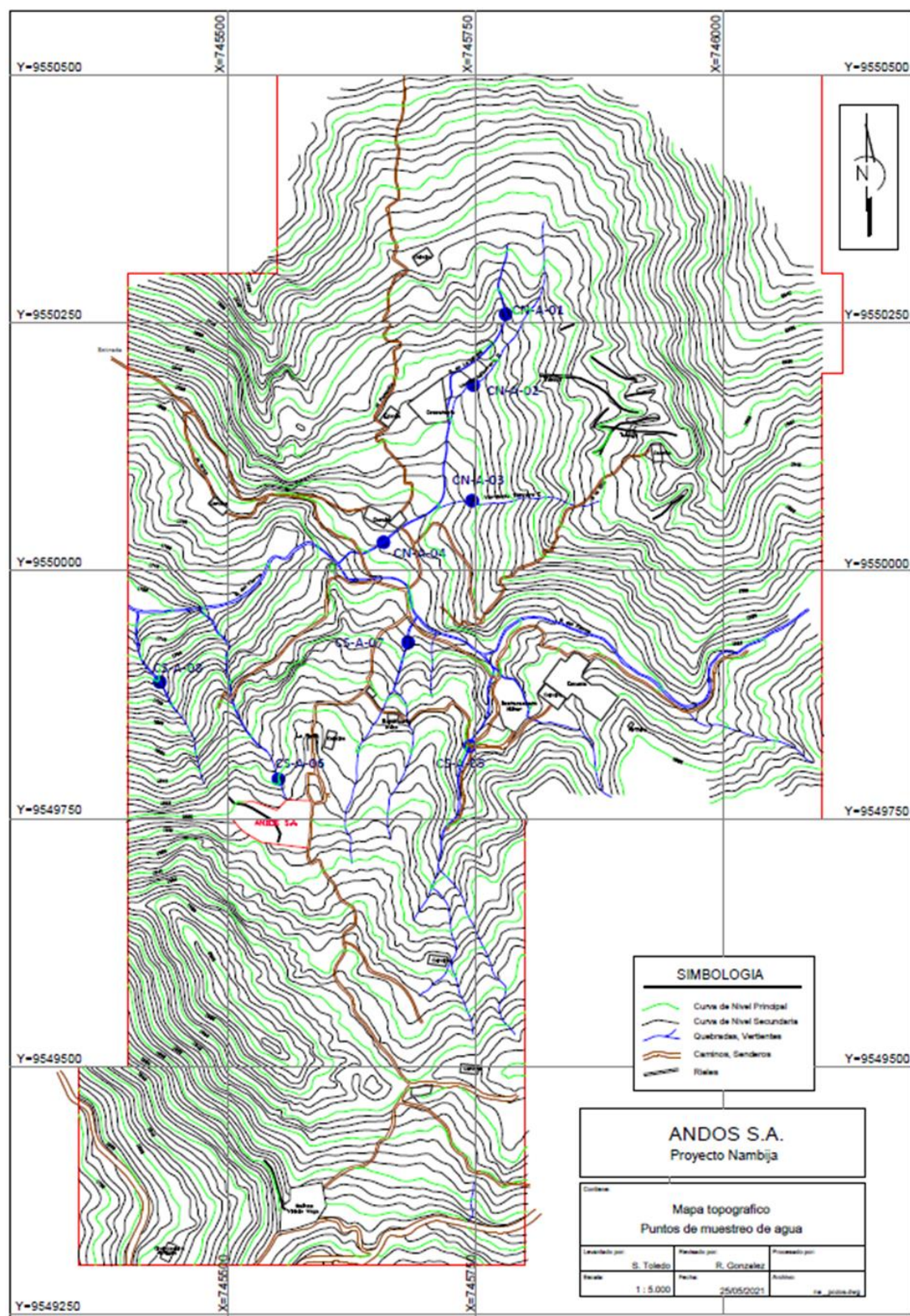


Figura 38. Localización de los puntos de muestreo de agua

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas iniciales de molienda - amalgamación se llevaron a cabo a diferentes tiempos de molienda para evaluar la relación de reducción del tamaño de partícula y la liberación y extracción de oro del mineral de mena. Una vez determinado el tamaño de grano que liberaba en mayor proporción el oro, se realizaron pruebas para reducir la cantidad de mercurio adicionada (75% y 50%), manteniendo los parámetros base del ensayo que dio los mejores resultados.

Para validar los resultados obtenidos a nivel macro, se hizo el seguimiento al ciclo de molienda amalgamación de una Planta de procesamiento mineral, que consta de 2 secciones, cada una con 2 molinos de tipo chileno. Estas pruebas se basaron en la cantidad de mercurio agregada por los mineros en los molinos chilenos.

Además, se identificaron procesos y técnicas de recuperación de amalgama y mercurio, que incluyen la concentración y recuperación después del proceso de molienda-amalgamación, la recuperación de mercurio evaporado de la amalgama en la quema (retorta) y la recuperación de arenas producto del bayeteado y arenas concentradas en los tanques de sedimentación. Se propone una intervención a cada uno de estos procesos a fin de optimizarlos.

Las pruebas realizadas se verificaron en diferentes ciclos de molienda en la planta de procesamiento mineral.

4.1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO ADECUADO DE PARTÍCULA (MALLA ÓPTIMA DE MOLIENDA)

Las pruebas iniciales de molienda – amalgamación, se realizaron en un molino de barras “chancha” (ver Figura 35), los amalgamadores son comúnmente utilizados para extraer el oro del mineral. Por lo general, por su tamaño y capacidad de procesamiento, se los reserva para el tratamiento de mineral de alta ley (janches, rocas mineralizadas seleccionadas y/o mineral de un

frente de explotación de alta ley), y/o para el procesamiento de relaves de arena producto del bayeteado y/o arena de los tanques de sedimentación), ya que óptimamente pueden llegar a procesar hasta 55 kg de mineral por ciclo de 2 horas.

La relación de reducción del tamaño de molienda y recuperación, se determina empíricamente, evaluando a qué tamaño de partícula se obtiene un mayor porcentaje de recuperación de oro (Pantoja-Barrios et al., 2020).

El estudio presentado evalúa el efecto del tiempo de molienda en la recuperación de oro a partir de cuatro muestras (S#1, S#2, S#3, S#4) y valida los resultados mediante un quinto ensayo (S#5); se evalúa la eficiencia de la molienda (tamaño de partícula adecuado) y se establece en cuál de estos ensayos se obtiene la mejor recuperación de oro; se toma como referencia inicial el tiempo empleado por los mineros que es de 120 min.

Los datos obtenidos del tamizado en húmedo y en seco se utilizan para generar las curvas de distribución granulométrica, que representan el porcentaje de partículas en las muestras en función de su tamaño. El d80 as veces representa la granulometría o tamaño de partícula en la que 80% de la muestra (mineral) resultante es pasante.

Las muestras S#1, S#2, S#3 y S#4 se someten al proceso de amalgamación in situ, con diferentes tiempos de molienda en un molino giratorio de barras, partiendo del tiempo empleado por los mineros (120 min), como variables se toma un tiempo mayor al utilizado (140 min), así como dos moliendas a tiempos menores (100 y 80 min), a fin de establecer en cuál de estos ensayos se obtiene la mejor recuperación de oro; y, en base a los resultados obtenidos (oro recuperado) se calcula la ley del mineral. Seguidamente se realiza el análisis y balance de la ley de cabeza y relaves a fin de determinar la efectividad promedio de recuperación del proceso.

4.1.1. Liberación de Au, con un tiempo de molienda de 80 min

La Tabla 2 muestra los resultados del análisis granulométrico con un tiempo de molienda

de 80 min para la muestra S#1.

Tabla 3. Ensayo granulométrico, con un tiempo de molienda de 80 min

		Arena: 98,79 %		Finos: 1,21 %	
		Au extraído: 16,60 %			
Ensayo # 1	Tiempo de molienda 80'				
Malla #	Abertura (μm)	Peso (g)	% Peso	% Ac. (+) retenido	% Ac.(-) que pasa
10	2000	1,42	0,57	0,57	99,43
18	1000	9,34	3,75	4,33	95,67
35	500	26,52	10,66	14,99	85,01
60	250	121,06	48,66	63,65	36,35
120	125	47,49	19,09	82,74	17,26
230	63	39,92	16,05	98,79	1,21
325	45	0,09	0,04	98,82	1,18
400	37	0,115	0,05	98,87	1,13
laminas	37	2,81	1,13	100,00	0,00
TOTAL		248,765	100,00		

En la muestra de mineral (S#1) sometida a un tiempo de molienda de 80 min, se obtienen los siguientes resultados:

- El **98,87% de la masa** de la muestra se retiene en la malla #400, que tiene una abertura de 37 μm.
- El **99,43% de la masa** pasa a través de la malla #10, que tiene una abertura de 2000 μm.

Es importante destacar que la recuperación de oro puede ser baja en este caso debido a un tiempo de molienda insuficiente para liberar completamente el oro de la ganga. En el tamaño de grano específico mencionado, se ha determinado que un **36,35% de la masa** del mineral pasa a través de la malla 60 (ver Tabla 3 y Figura 39).

En la figura 39, se muestra la curva semilogarítmica normal de distribución del tamaño de partícula resultante para un tiempo de molienda de 80 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm) y el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa retenida en cada tamiz (%Ac(+)).

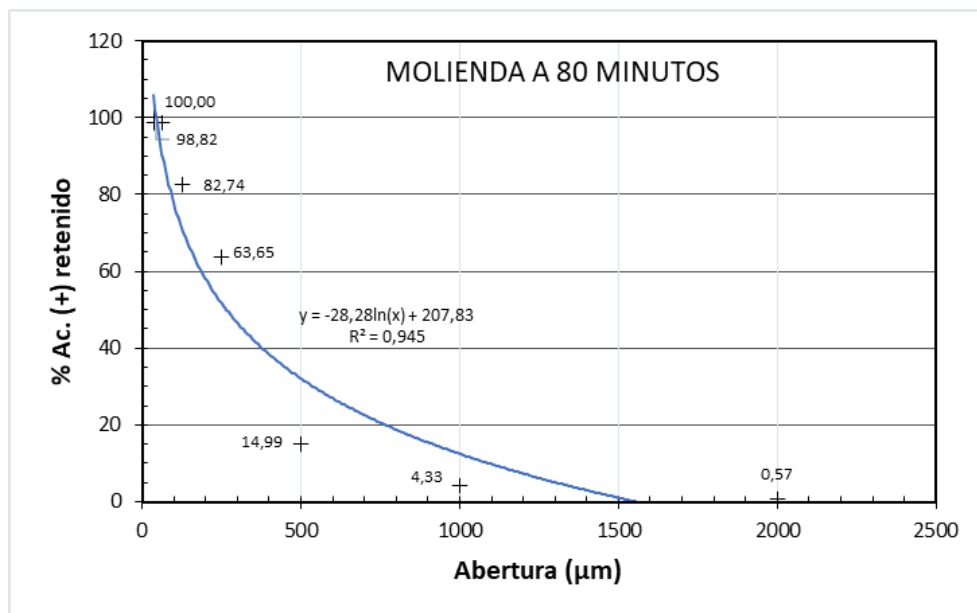


Figura 39. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda a 80 min

En la figura 40, la curva granulométrica representa la distribución del tamaño de partícula para un tiempo de molienda de 80 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm) y el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa que pasa por cada tamiz (%Ac(-)). El d80 indica que el 80% de la muestra tiene un tamaño de partícula igual o menor a 455 μm.

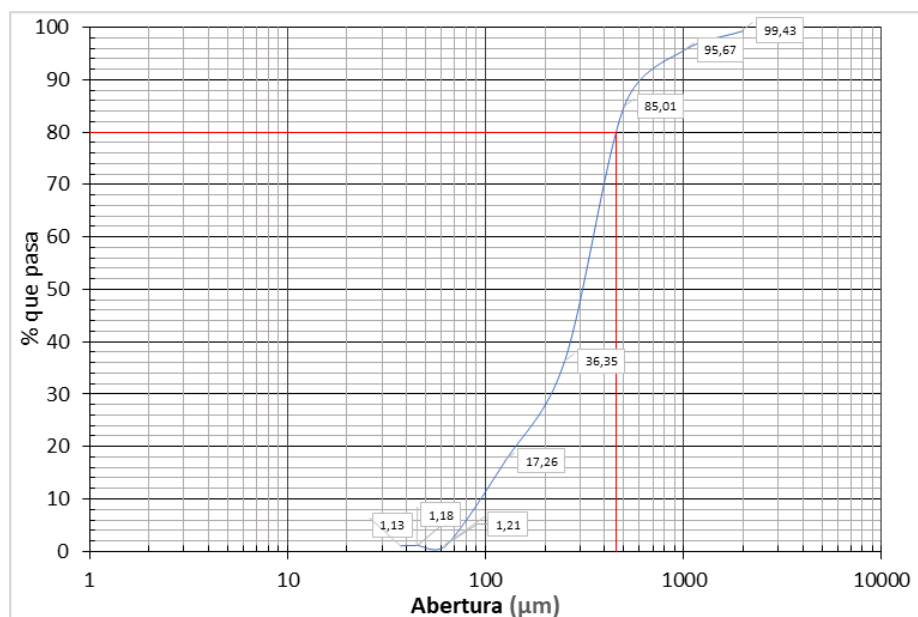


Figura 40. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda a 80 min (d80)

4.1.2. Liberación de Au, con un tiempo de molienda de 100 min

La Tabla 3 muestra los resultados del análisis granulométrico para el mineral con un tiempo de molienda de 100 min para las muestra S#2.

Tabla 4. Ensayo granulométrico, con un tiempo de molienda de 100 min

Arena: 84,29 %			Finos: 15,71 %		
			Au extraído: 37,90 %		
Ensayo # 2	Tiempo de molienda 100'				
Malla #	Abertura (μm)	Peso (g)	% Peso	% Ac. (+) retenido	% Ac.(-) que pasa
10	2000	0,68	0,27	0,27	99,73
18	1000	0,12	0,05	0,32	99,68
35	500	2,21	0,89	1,21	98,79
60	250	39,78	15,99	17,20	82,80
120	125	109,07	43,83	61,03	38,97
230	63	57,88	23,26	84,29	15,71
325	45	9,34	3,75	88,04	11,96
400	37	7,35	2,95	91,00	9,00
lamas	37	22,40	9,00	100,00	0,00
TOTAL		248,83	100,00		

En la muestra de mineral (S#2) sometida a un tiempo de molienda de 100 min, se consiguen los siguientes resultados:

- El **91,00% de la masa** de la muestra se retiene en la malla #400, que tiene una abertura de 37 μm .
- El **99,73% de la masa** pasa a través de la malla #10, que tiene una abertura de 2000 μm .

Se logra una mejor recuperación de oro en comparación con S#1, pero aún podría no ser óptima. En el tamaño de grano específico mencionado, se ha determinado que un **38,97% de la masa** del mineral pasa a través de la malla 120 (ver Tabla 4 y Figura 41).

En la figura 39, se muestra la curva semilogarítmica normal de distribución del tamaño de partícula resultante para un tiempo de molienda de 100 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm) y el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa retenida en cada malla (%Ac(+)).

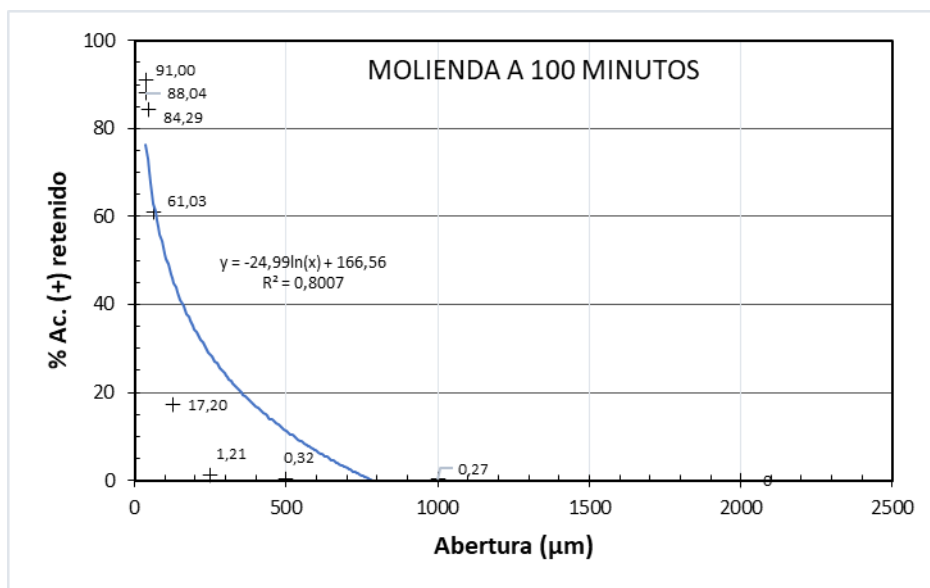


Figura 41. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda a 100 min

En la figura 42, la curva granulométrica representa la distribución del tamaño de partícula para un tiempo de molienda de 100 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm) y el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa que pasa por cada tamiz (%Ac(-)). El d80 indica que el 80% de la muestra tiene un tamaño de partícula igual o menor a 235 μm .

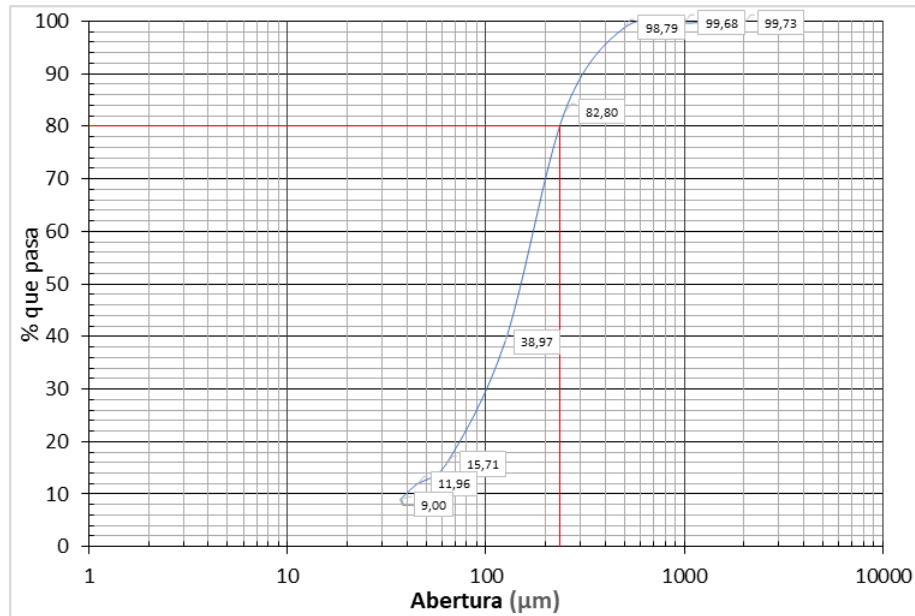


Figura 42. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda a 100 min (d80)

4.1.3. Liberación de Au, con un tiempo de molienda de 120 min

La Tabla 4 muestra los resultados del análisis granulométrico con un tiempo de molienda de 120 min para las muestras S#3.

Tabla 5. Ensayo granulométrico, con un tiempo de molienda de 120 min

		Arena: 77,05 %		Finos: 22,95 %	
				Au extraído: 54,25 %	
Ensayo # 3	Tiempo de molienda 120'				
Malla #	Abertura (μm)	Peso (g)	% Peso	% Ac. (+) retenido	% Ac.(-) que pasa
10	2000	0,26	0,10	0,10	99,90
18	1000	0,09	0,04	0,14	99,86
35	500	1,27	0,51	0,65	99,35
60	250	16,58	6,65	7,30	92,70
120	125	76,07	30,52	37,82	62,18
230	63	97,81	39,24	77,05	22,95
325	45	13,61	5,46	82,51	17,49
400	37	2,29	0,92	83,43	16,57
lamas	37	41,30	16,57	100,00	0,00
TOTAL		249,28	100,00		

En la muestra de mineral (S#3) sometida a un tiempo de molienda de 120 min, se consiguen los siguientes resultados:

- El **83,43% de la masa** de la muestra se retiene en la malla #400, que tiene una abertura de 37 μm.
- El **99,90% de la masa** pasa a través de la malla #10, que tiene una abertura de 2000 μm.

En esta prueba se consigue la mayor extracción y recuperación de oro, este tiempo de molienda permite liberar y amalgamar más eficientemente el oro que en ensayo anterior (S#2). En este tamaño de grano específico mencionado, se ha determinado que un **62,18% de la masa** del mineral pasa a través de la malla 120 (ver Tabla 5 y Figura 43).

En la figura 43, se muestra la curva semilogarítmica normal de distribución del tamaño de partícula resultante para un tiempo de molienda de 120 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm) y el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa retenida en cada malla (%Ac(+)).

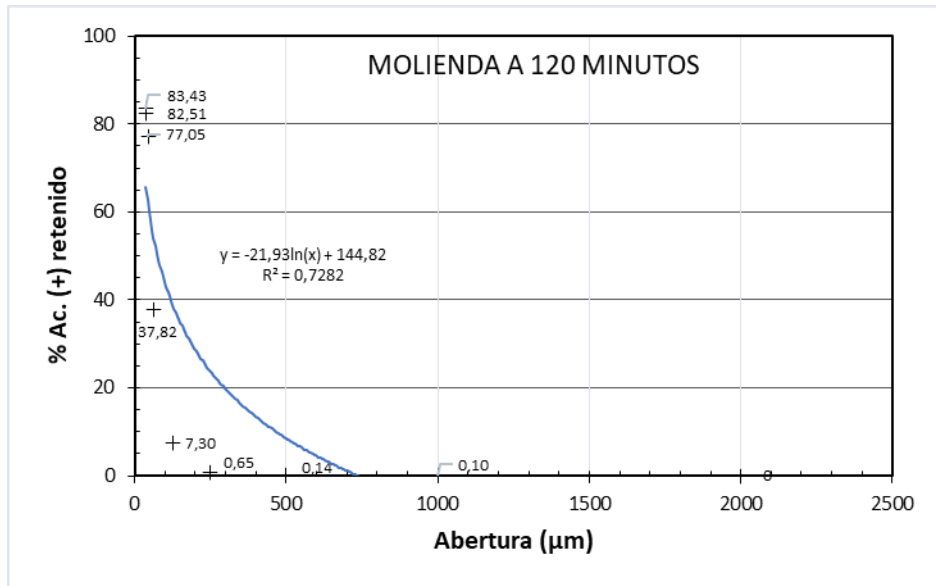


Figura 43. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda a 120 min

En la figura 44, la curva granulométrica representa la distribución del tamaño de partícula para un tiempo de molienda de 120 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm); y, el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa que pasa por cada tamiz (%Ac(-)). El d80 indica que el 80% de la muestra tiene un tamaño de partícula igual o menor a 180 μm.

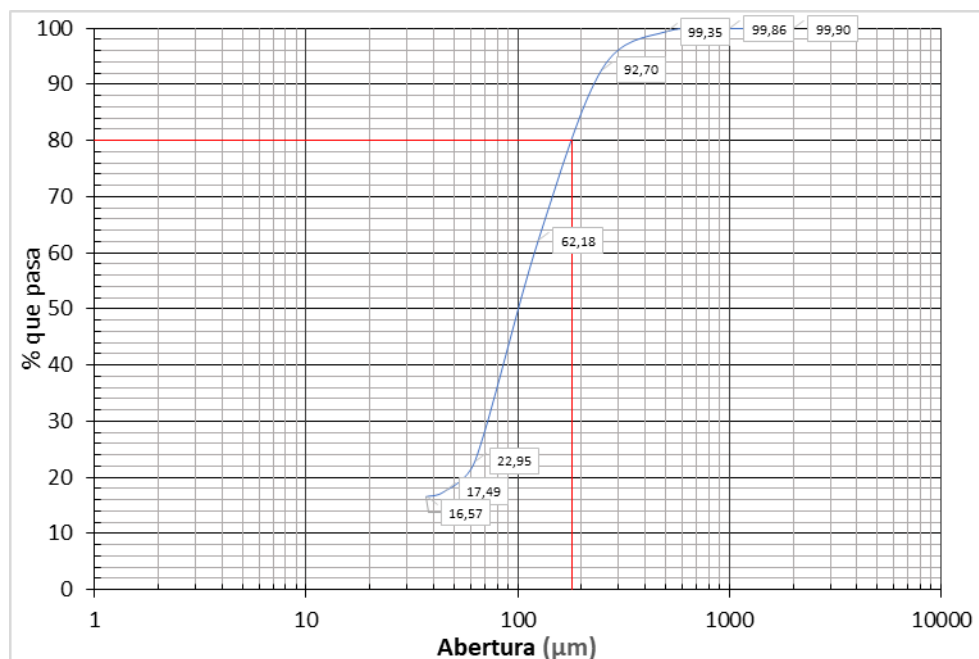


Figura 44. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda a 120 min (d80)

El análisis granulométrico resultante de este ensayo indica que el 80% de las partículas (d80) están por debajo de 180 μm. Con este tiempo de molienda se recupera una mayor proporción de oro, como se puede observar, el rendimiento en este ensayo es del 54,25%.

4.1.4. Liberación de Au, con un tiempo de molienda de 140 min

La Tabla 5 muestra los resultados del análisis granulométrico con un tiempo de molienda de 140 min para las muestras S#4.

Tabla 6. Ensayo granulométrico, con un tiempo de molienda de 140 min

			Arena:	59,57 %	Finos:	40,43 %
					Au extraído:	30,72 %
Ensayo # 4	Tiempo de molienda 140'					
Malla #	Abertura (µm)	Peso (g)	% Peso	% Ac. (+) retenido	% Ac.(-) que pasa	
10	2000	0,01	0,00	0,00	100,00	
18	1000	0,61	0,24	0,25	99,75	

35	500	0,58	0,23	0,48	99,52
60	250	3,12	1,25	1,73	98,27
120	125	41,02	16,45	18,18	81,82
230	63	103,18	41,38	59,57	40,43
325	45	14,48	5,81	65,38	34,62
400	37	2,86	1,15	66,52	33,48
laminas	37	83,47	33,48	100,00	0,00
TOTAL		249,33	100,00		

En la muestra de mineral (S#4) sometida a un tiempo de molienda de 140 min, se consiguen los siguientes resultados:

- El **66,52% de la masa** de la muestra se retiene en la malla #400, que tiene una abertura de 37 μm .
- El **100% de la masa** pasa a través de la malla #10, que tiene una abertura de 2000 μm .

En esta prueba, la recuperación de oro es menor a S#3 debido a una posible sobremolienda con "mercurio en polvo" que pudo afectar a la amalgamación. En el tamaño de grano específico mencionado, se ha determinado que un **81,82% de la masa** del mineral pasa a través de la malla 120 (ver Tabla 6 y Figura 45).

La sobremolienda es un proceso en el cual el material se muele excesivamente, lo que puede llevar a la liberación de partículas finas de oro y mercurio. Estas partículas finas pueden dificultar la recuperación del oro debido a la formación de una capa de mercurio en la superficie del oro, lo que dificulta su amalgamación.

En la figura 45, se muestra la curva semilogarítmica normal de distribución del tamaño de partícula resultante para un tiempo de molienda de 140 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm) y el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa retenida en cada malla (%Ac(+)).

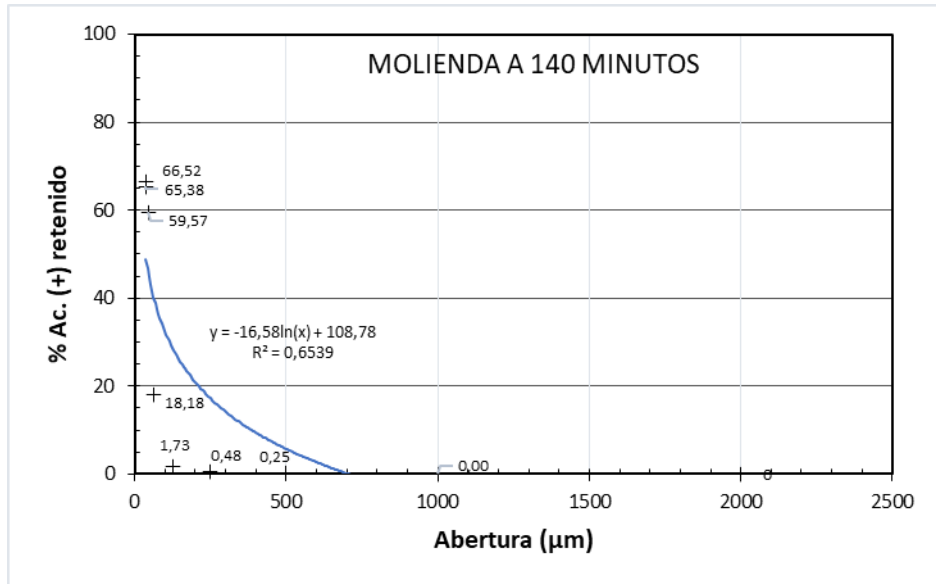


Figura 45. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda a 140 min

En la figura 46, la curva granulométrica representa la distribución del tamaño de partícula para un tiempo de molienda de 140 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm) y el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa que pasa por cada tamiz (%Ac(-)). El d80 indica que el 80% de la muestra tiene un tamaño de partícula igual o menor a 120 μm.

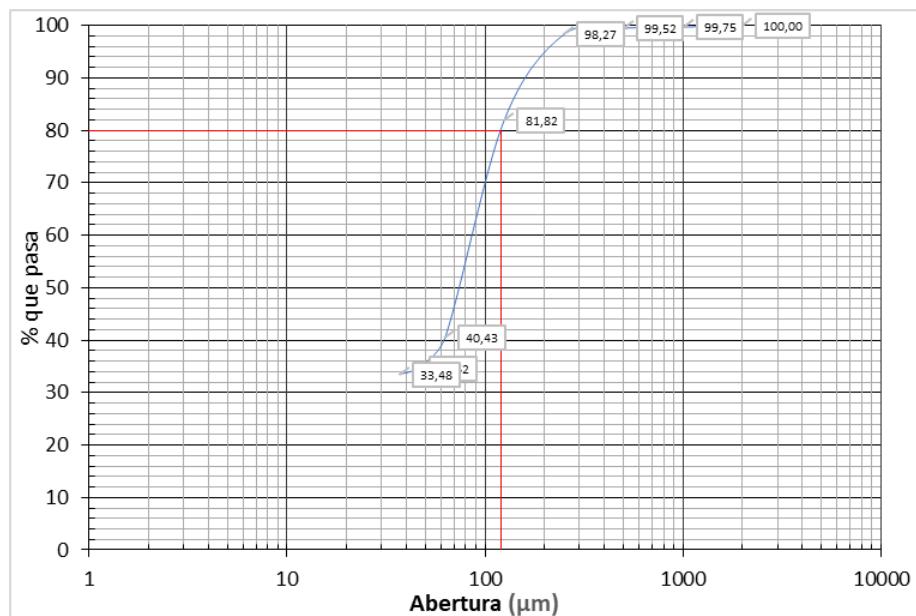


Figura 46. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda a 140 min (d80)

La figura 47, resume las curvas de distribución del tamaño de partícula resultantes de las cuatro pruebas (80, 100, 120 y 140 min), en el eje x muestra el tamaño de partícula en μm y en el eje y se muestra el porcentaje (%) acumulado de masa retenida en cada tamaño de pantalla (%Ac(+)).

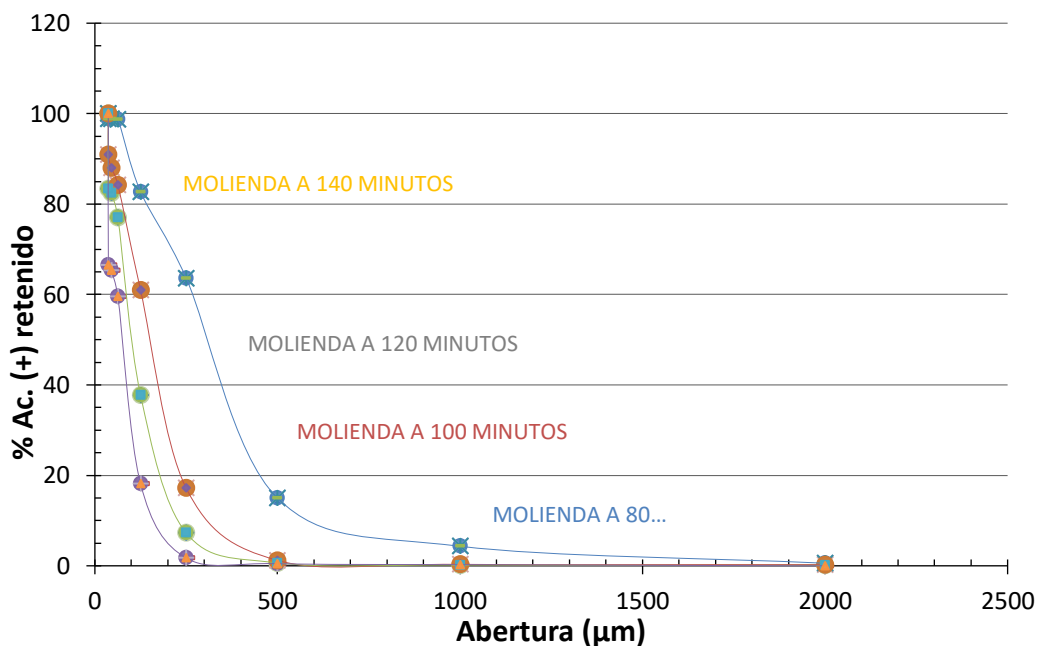


Figura 47. Curvas granulométricas resultantes de los cuatro tiempos de molienda

4.1.5. Molienda de verificación (tiempo de molienda de 120 min)

Para la verificación y validación de los resultados obtenidos, se realizó el ensayo S#5, reproduciendo al ensayo con los parámetros con los que se obtuvo el mejor rendimiento y extracción de oro (S#3); con las mismas condiciones estándar de funcionamiento. Los resultados de la prueba de verificación mostraron gran similitud con los obtenidos en S#3 (ver Tabla 6 y Figura 43).

La Tabla 6, muestra los resultados del análisis granulométrico de la molienda de verificación, con un tiempo de molienda de 120 min para la muestra S#5.

Tabla 7. Ensayo granulométrico de verificación, tiempo de molienda 120 min

		Arena: 76,36 %		Finos: 23,64 %	
				Au extraído: 54,74 %	
Ensayo # 5		Tiempo de molienda 120'			
Malla #	Abertura (μm)	Peso (g)	% Peso	% Ac. (+) retenido	% Ac.(-) que pasa
10	2000	0,22	0,09	0,09	99,91
18	1000	0,72	0,29	0,38	99,62
35	500	1,54	0,62	1,00	99,00
60	250	18,39	7,38	8,38	91,62
120	125	73,67	29,57	37,95	62,05
230	63	95,72	38,42	76,36	23,64
325	45	15,85	6,36	82,73	17,27
400	37	2,57	1,03	83,76	16,24
lamas	37	40,47	16,24	100,00	0,00
TOTAL		249,15	100,00		

En el ensayo de verificación (muestra de mineral S#5) sometida a un tiempo de molienda de 120 min, se consiguen los siguientes resultados:

- El **83,76% de la masa** de la muestra se retiene en la malla #400, que tiene una abertura de 37 μm, similar al 83,43% del ensayo S#3.
- El **99,91% de la masa** pasa a través de la malla #10, que tiene una abertura de 2000 μm, similar al 99,90% del ensayo S#3.

La replicación del tiempo de molienda óptimo (120 min) en la muestra S#5 (con recuperación similar a S#3) valida la confiabilidad de los resultados obtenidos. En tal sentido, el tiempo de molienda óptimo para la recuperación de oro en las muestras analizadas parece ser de 120 min. En este tamaño de grano específico mencionado, se ha determinado que un **83,76% de la masa** del mineral pasa a través de la malla 120, similar al 81,82% del ensayo S#3 (ver Tabla 7 y Figura 48).

En la figura 48, se muestra la curva semilogarítmica normal de distribución del tamaño

de partícula resultante para el ensayo de verificación con un tiempo de molienda de 120 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm) y el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa retenida en cada malla (%Ac(+)).

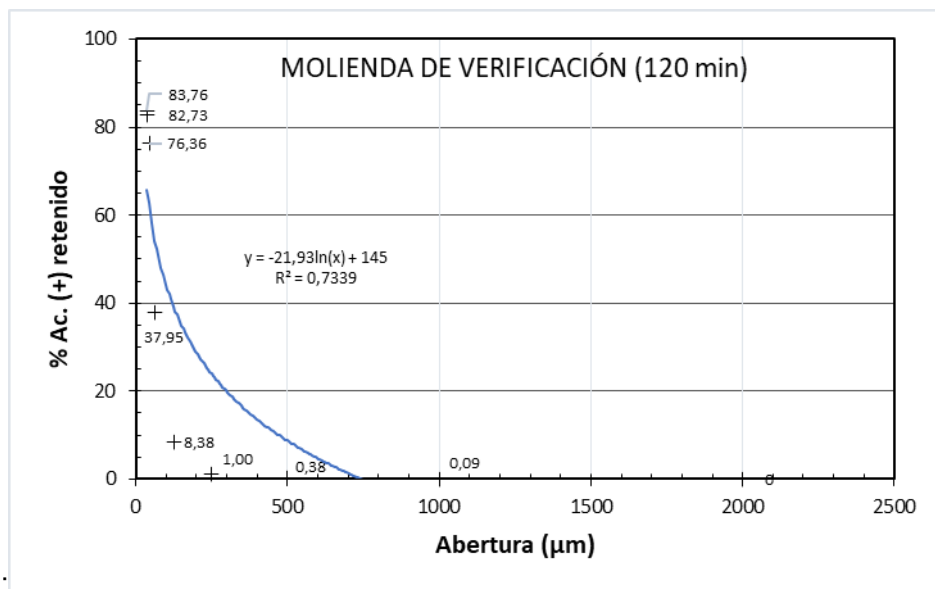


Figura 48. Curva semilogarítmica % Ac. (+) de masa retenido, molienda de verificación

En la figura 49, la curva granulométrica representa la distribución del tamaño de partícula para en ensayo de verificación, con un tiempo de molienda de 120 min; el eje x muestra el tamaño de partícula (μm) y el eje y muestra el porcentaje (%) acumulado de masa que pasa por cada tamiz (%Ac(-)). El d80 indica que el 80% de la muestra tiene un tamaño de partícula igual o menor a 180 μm .

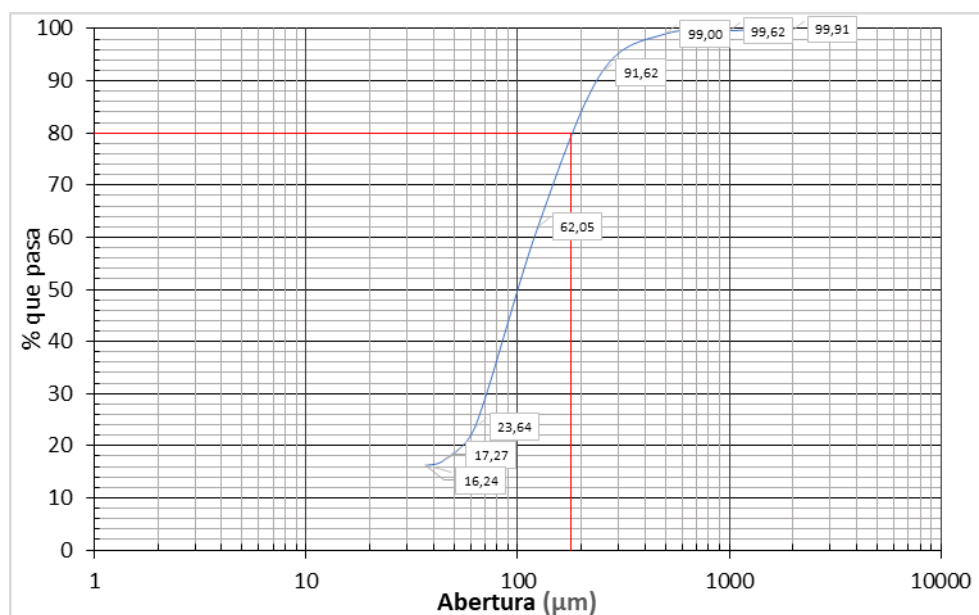


Figura 49. Curva granulométrica % Ac. (-) pasante, molienda de verificación (d80)

Según los resultados de los ensayos S#3 y S#5, se determina que el mineral de mena de Nambija tiene un d80 de 180 µm. Por lo tanto, se recomienda utilizar una malla de molienda que permita el paso de partículas de este tamaño (ver Tabla 8).

Tabla 8. Resultados de las pruebas de distribución granulométrica

Prueba	Tiempo de molienda (min)	d80 (µm)
S#1	80	465
S#2	100	240
S#3	120	180
S#4	140	120
S#5	120	180

Una simple prueba de control de los tiempos de amalgamación y la proporción de mercurio utilizada también puede reducir las pérdidas, junto con un aumento en la recuperación de oro (García et al., 2015).

Sin embargo debe considerarse que, la amalgamación recupera el oro libre, y que muchas veces el oro que está unido a otros minerales no puede recuperarse mediante amalgamación (a pesar de las partículas finamente molidas, todavía puede haber oro que no esté completamente liberado y superficies oxidadas evitan que la partícula se amalgame. Las partículas de oro adecuadas para la amalgamación con mercurio generalmente tienen un tamaño de 0.2-0.3 mm, granos más pequeños no pueden humedecerse debido a la alta tensión superficial y la capilaridad negativa del Hg, lo que resulta en su pérdida en la pulpa.

Una vez definida la malla de molienda para el mineral de Nambija (80% de partículas igual o menor a 180 μm), se realizó el balance metalúrgico para determinar la recuperación de oro para cada prueba. En estos ensayos se maneja la misma cantidad de mercurio utilizada por los mineros 1 lb (454 g), a fin de mantener las condiciones estándar de operación.

La Tabla 9 muestra los resultados de las pruebas y el balance de la operación de molienda-amalgamación.

Tabla 9. Recuperación de oro por amalgamación en función del tiempo de molienda

Prueba	Tiempo de Molienda (min)	Au recuperado (g)	Au recuperado (g/t)	Au perdido en relaves (g/t)	Au extraído (%)
S#1	80	0,067	1,22	6,12	16,60
S#2	100	0,153	2,78	4,56	37,90
S#3	120	0,219	3,98	3,36	54,25
S#4	140	0,124	2,25	5,09	30,72
S#5	120	0,221	4,02	3,32	54,74

Esto determina que existe un tamaño de partícula mineral en el que se libera oro en mayor proporción cuando el tiempo de molienda es de 120 min (pruebas S#3 y S#5). El rendimiento promedio en la extracción de oro para las pruebas S#3 y S#5 es del **54,49%**.

En **conclusión**, el tamaño de grano adecuado para mejorar la extracción de oro del mineral de mena de Nambija es de malla 120 (125 μm), en este tamaño de grano específico se ha determinado que un 62,12% de la masa del mineral pasa a través de la malla 120 (promedio de las pruebas S#3 y S#5); con respecto al tamaño de grano mineral el d80 es de 180 μm ., obtenido con un tiempo de molienda de 120 minutos (Tablas 4 y 6).

4.2. DETERMINACIÓN DEL APORTE ADECUADO DE MERCURIO

En principio, no se recomienda la dosificación de mercurio en la minería bajo ninguna circunstancia; conviene subrayar, que en la actualidad, el uso de mercurio en la minería está prohibido o severamente restringido en la mayoría de los países. Sin embargo, para efectos de la investigación, es necesario determinar la relación mercurio/mineral a utilizar en un tiempo de amalgamación adecuado para lograr la menor contaminación posible.

En relación con el aporte de mercurio, se estableció un balance para estimar las pérdidas, mismo que consistió en medir (pesar) la cantidad de mercurio introducido y el recuperado al finalizar la molienda - amalgamación y por deducción determinar las pérdidas del proceso en cada uno de los ensayos (Pantoja et al., 2005). Los mineros para la operación en un molino amalgamador “chancha”, utilizan 1 lb (454 g/Hg) de mercurio por cada ciclo de (2 horas de trabajo) para 55 Kg de material (mineral); a continuación, se prueba realizar 2 ensayos (S#6 y S#7), reduciendo el suministro de mercurio para ver el comportamiento. Finalmente se replica el mejor ensayo (S#8) para validación de resultados.

4.2.1. Dosificación de mercurio en el molino de barras

Se realizaron dos pruebas adicionales para evaluar los resultados de reducir la cantidad de mercurio utilizada por los mineros durante el proceso de amalgamación (S#6 y S#7). En las pruebas

S#3 y S#5, donde se administraron 454 g (100%) de Hg, el porcentaje de Au extraído fue del 54,74%. En la prueba S#6, donde se adicionaron 340,5 g (reduciendo un 25% la cantidad de Hg añadida), la extracción de oro aumentó hasta alcanzar el 56,48%; y, en el caso, de la prueba S#7 en la que se añadieron 227 g (reducción de un 50% de la cantidad de Hg usada por los mineros), el rendimiento bajó al 45,33%. Sin duda, es posible lograr un mejor rendimiento al reducir la cantidad de Hg adicionada por los mineros hasta en un 25%.

Para corroborar los resultados obtenidos, se realizó una prueba de verificación (S#8) utilizando los mismos parámetros base de la prueba más exitosa (S#6), alimentando 340,5 g de Hg al ciclo. Los resultados de esta prueba mostraron un porcentaje de oro (Au) extraído de 57,47%, lo cual es consistente con lo obtenido en la prueba S#6 (ver Tabla 10).

Tabla 10. Dosificación de mercurio y rendimiento de la operación

Prueba	Tiempo de molienda (min)	Entrada de Hg (g)	Au Recuperado (g)	Grado Au (g/t)	Au perdido en relaves (g/t)	Au extraído (%)
S#3	120	454,0	0,219	3,98	3,36	54,25
S#5	120	454,0	0,221	4,02	3,32	54,74
S#6	120	340,5	0,228	4,15	3,19	56,48
S#7	120	227,0	0,183	3,33	4,01	45,33
S#8	120	340,5	0,232	4,22	3,12	57,47

En base a los resultados de las pruebas S#6 y S#8, se determinó que para lograr una mejor recuperación de oro del mineral de Nambija, se deben alimentar 340,5 g de mercurio (Hg) a cada ciclo de molienda-amalgamación en el molino de barras "chancha" (ver Tabla 9). Esto permite reducir en un 25% la cantidad de mercurio utilizada actualmente por los mineros artesanales en Nambija, y lograr un mejor rendimiento con una recuperación de oro del $57 \pm 0,5\%$.

Para comprobar estadísticamente las diferencias observadas, se realizó el test de Tukey para comparaciones múltiples de medias con un intervalo de confianza del 95 %. Los resultados se pueden observar en las tablas 11 y 12. Como variables independientes se han escogido el tiempo

de moliendo y la cantidad de mercurio introducido y, como variable dependiente, el porcentaje de oro recuperado. En resumen, se puede decir que existen diferencias significativas entre la estimación de la media del porcentaje de oro recuperado tanto con el tiempo de molienda como con la cantidad de mercurio introducido en todos los casos, concluyendo que la mejor opción sería la de 120 minutos de molienda y con 340,5 gramos de mercurio.

Tabla 11. Test de Tukey. Tiempo de molienda (min)

Molienda (min)	diff	lwr	upr	p valor
100-80	21.3	15.89	26.71	0.002614
120-80	37.05	32.86	41.25	0.000001
140-80	14.12	8.71	19.53	0.007886
120-100	15.75	11.56	19.95	0.003107
140-100	-7.18	-12.59	-1.77	0.028959
140-120	-22.93	-27.13	-18.74	0.000399

Tabla 12. Test de Tukey. Mercurio introducido (g)

Hg (g)	diff	lwr	upr	p valor
340.5-227	11.65	7.66	15.63	0.006
454-227	8.66	5.1	12.22	0.009
454-340.5	-2.98	-5.71	-0.26	0.042

4.3. MONITOREO DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE AMALGAMACIÓN A NIVEL MACRO EN PLANTA

En base a los resultados obtenidos en las pruebas previas de molienda-amalgamación en el molino de barras (55 Kg de material), se realizó un seguimiento a nivel macro a las operaciones de molienda-amalgamación en la planta de beneficio MiningAndos S.A. que consta de 2 secciones (en cada sección hay 2 molinos de ruedas tipo chileno). La cantidad de proceso en cada sección generalmente es de 250 toneladas de mineral y/o hasta cuando se termine el mineral almacenado

en la tolva; en tanto que, el tiempo estimado para completar el ciclo de proceso es de 8 días (incluido el día de liquidación o lavado de molino).

Dentro del área minera para el proceso molienda – amalgamación, generalmente se utiliza el molino chileno, que es una tecnología comparativamente barata y accesible para pequeños mineros o sociedades mineras. La capacidad de molienda es relativamente baja, ya que en promedio un molino procesa entre 15 a 20 ton/día, en dependencia de la dureza de la roca; aunado a que el proceso puede ser lento en razón de que requiere mano de obra constante ya que los molinos son alimentados manualmente; y también, por el lavado de cobijas y bayetas dispuestos en los canalones utilizadas para la recuperación del oro que escapa o sale del molino durante el proceso.

El mineral de mena triturado es alimentado a través de una abertura diseñada para el efecto, la carga se realiza de forma manual con una pala (20 paladas por carga, que representan aproximadamente 50 Kg de mineral). El molino necesita para su efectivo funcionamiento una alimentación constante de agua, que generalmente es de 0,62 L/s (1 pulgada). Una vez iniciada la molienda se añade mercurio al inicio del proceso y consecutivamente se adiciona el mercurio diariamente hasta que se termina el ciclo de molienda.

Como complemento a la variable -Dosificación de mercurio, se hizo el seguimiento a nivel macro del ciclo molienda/amalgamación (molinos chilenos) de la planta de beneficio MiningAndos S.A.; ya que estos utilizan mercurio directamente en sus molinos para realizar la molienda y amalgamación simultánea. Se monitorea un ciclo completo de molienda (8 días), en las 2 secciones (Prueba 1), para evidenciar los procesos de recuperación de amalgama (Au + Hg) y recuperación de Hg con las condiciones estándar como lo procesan los mineros.

Con relación al proceso de molienda-amalgamación en la planta de beneficio., se consideraron los siguientes parámetros: **1)** el tiempo de molienda requerido para el procesamiento, ya que la duración de la molienda puede variar dependiendo de la dureza del mineral y del tamaño

de partícula deseado **2)** el volumen de mineral procesado, este parámetro puede variar dependiendo de la capacidad de la planta de beneficio y de la demanda de producción; y, **3)** el mercurio total alimentado y recuperado al final de cada operación en las dos secciones, por cuanto, durante el proceso, se agrega mercurio al mineral y luego se recupera para su reutilización o tratamiento adecuado. Es importante controlar la cantidad de mercurio utilizado y asegurar su recuperación para minimizar los impactos ambientales y los riesgos para la salud.

Inicialmente, se tomó como base la cantidad de mercurio agregada por los mineros para el beneficio del mineral en los molinos chilenos (prueba 1); De la misma manera, se realizaron pruebas para reducir la adición diaria de mercurio en un 20% en la planta de beneficio. Estas pruebas se basaron en la cantidad de mercurio agregada por los mineros en los molinos chilenos y se replicaron tres ciclos de molienda adicionales.

Las soluciones emergentes propuestas en la intervención deben potenciar la reducción y limitación del uso del mercurio en el área minera. Estas soluciones se definieron en base a las conclusiones y resultados de los procesos aplicados en la gestión del mercurio, con el objetivo de minimizar y/o mitigar sus efectos.

Los procedimientos identificados de manipulación y recuperación de Hg son: **1)** la concentración y recuperación de Au-Hg después del proceso de molienda – amalgamación **2)** la destilación y recuperación de Hg (evaporado) de la amalgama en la quema (retorta); y, **3)** la recuperación de oro de las arenas (relaves) producto del bayeteado y de las arenas concentradas en los tanques de sedimentación.

4.3.1. Concentración y recuperación de Au-Hg del molino chileno

Una vez finalizado el ciclo de molienda y/o terminado el material en tolva a procesar **1)** Se inicia el proceso de refinado y de descarga del molino. Este proceso puede durar alrededor de 3

horas, durante las cuales se completa la molienda y se reduce la cantidad de concentrado que queda en el interior del molino **2)** Una vez finalizado el refinado, se procede a sacar el concentrado que contiene la amalgama y el mercurio que quedan en el interior del molino. Antes de la extracción, es común realizar un tamizaje del concentrado (ver Figura 20). Una vez tamizado, el concentrado se deposita en tinajas (ver Figura 48) **3)** El siguiente paso es el baldeado (ver Figura 21), que tiene como objetivo concentrar la amalgama y el mercurio excedente del proceso. En esta etapa, es opcional el uso de un concentrador genérico centrífugo (ver Figura 22) **4)** Después del baldeado, se realiza el platoneo o bateo del concentrado obtenido en el paso anterior (ver Figura 23). Este proceso tiene como finalidad obtener la amalgama y recuperar el exceso de mercurio. Durante el platoneo, se utilizan técnicas de separación y agitación para lograr la obtención deseada **5)** Una vez obtenida la amalgama, se procede al lavado y liberación de impurezas (ver Figura 26). Este paso tiene como objetivo eliminar cualquier impureza presente en la amalgama, dejando únicamente el producto deseado **6)** El último paso del proceso es el quemado de la amalgama (ver Figuras 28 y 29). Durante este proceso, se lleva a cabo la separación y obtención del producto final (oro).

Otra técnica generalizada es el tratamiento posterior a los relaves que quedan del proceso de concentración (para recuperar el oro que no se recuperó en primera instancia). Este trabajo lo hacen manualmente con la ayuda de un canalón (ver Figura 49). El concentrado final se platonea.

Las Figuras 50 y 51 se refieren a la liquidación o finalización del ciclo de molienda amalgamación.



Figura 50. concentración mineral (lavado del molino)



Figura 51. Laboreo tradicional, recuperación de amalgama y mercurio de relaves

Con el fin de mejorar la gestión de la actividad minera, y con el objetivo de reducir las pérdidas de mercurio y tratar de mejorar la recuperación de oro, se implementaron algunas acciones. La estrategia consistió en introducir medidas para reducir el uso de mercurio sin cambios

significativos en la infraestructura, se probó introducir un nuevo equipo (concentrador genérico centrífugo) para concentrar el oro (Pantoja et al.,2005). El concentrador genérico centrífugo ofrece una mayor eficiencia en la recuperación de oro y una mayor capacidad de procesamiento en comparación con el baldeo de arena, gracias a su capacidad para recuperar partículas finas de oro y su diseño versátil que permite procesar grandes volúmenes de material.

En la intervención, para mejorar el proceso, se llevaron a cabo las siguientes acciones complementarias: **1)** En base a los ensayos realizados (granulometría óptima), se realiza el cambio de la malla de descarga en los molinos, debido a que los mineros están usando una malla inadecuada (malla #60); y a que, el tamaño de grano con el que se obtiene la mejor recuperación de oro para el mineral en el sector es la malla #120 (muy fina), razón por lo cual se probó y utilizó una malla #100 para evitar problemas de obturación o taponamiento de la malla (lo ideal sería el utilizar 2 en serie, #100 y #120), **2)** La alimentación de mineral al molino se regularizó a 20 paladas ($\approx$ 50 Kg por carga) cada 20 minutos optimizando la molienda y para evitar la sobremolienda (exceso de mineral fino), con la consiguiente pulverización del Hg. En las pruebas, el caudal de agua se mantuvo constante 0,62 L/s (1 pulgada).

Los resultados obtenidos en las pruebas 2, 3 y 4 en los molinos chilenos muestran que es posible reducir la adición y/o alimentación de mercurio hasta en un 18% en un molino chileno, sin afectar la extracción de oro. Esto es consecuente con los resultados obtenidos en los ensayos en el molino de barras, donde se logró una reducción del 25% en la adición de mercurio. La diferencia entre la reducción en los molinos de barras y en los molinos chilenos se debe principalmente a las características propias de funcionamiento, operación y tamaño de cada uno de estos equipos.

Además, se evidencia que, con las acciones implementadas con la intervención, la cantidad de mercurio recuperado al final del proceso de concentración aumentó de 24,20% a 35,63% en la Sección 1 (prueba 2) y de 29,08% (prueba 1) a 36,48% (prueba 3) en la Sección 2 (ver Tabla 13).

Tabla 13. Balance de mercurio del proceso de molienda-amalgamación (molino)

Sección 1				
Prueba	Tiempo de molienda (h)	Mineral procesado (Ton)	Hg Alimentado (g)	Hg recuperado (%)
1	157	226	3372,97	24,20
2	160	250	2800,20	35,63
3	154	250	2800,09	35,11
4	157	250	2800,05	33,61
Sección 2				
1	150	215	3455,38	29,08
2	161	250	2800,15	34,81
3	156	250	2800,07	36,48
4	153	250	2800,13	35,52

Finalmente, después de reducir la adición de mercurio y las consiguientes pérdidas (al estar trabajando los mineros con exceso de mercurio), la extracción de oro no se vio afectada, esto es consistente con lo que se observó en las pruebas de molinos de barras. Lo que representa un beneficio económico para los mineros, considerando que 1 lb (454 g) de Hg, en el área minera cuesta o se comercializa en alrededor de USD 45.

4.3.2. Destilación y recuperación de mercurio en retorta

En el proceso de la separación de oro y mercurio, generalmente se pierde el mercurio que forma parte de la amalgama, si no se utiliza algún método de recuperación (retorta). Las retortas son dispositivos que capturan y reciclan el mercurio residual y se utiliza tradicionalmente en la pequeña minería y minería artesanal para extraer oro del mineral de mena (ver Figura 28). El proceso, conocido también como refogado, implica el calentar la amalgama de oro y mercurio en la retorta; el mercurio se evapora y se condensa en un recipiente separado, mientras que la esponja de oro queda en la retorta (Londoña, J.H. 2007).

El porcentaje de mercurio en la amalgama mayormente depende de la granulometría del oro, del textil utilizado y de la manera como se exprime la amalgama para separar el mercurio residual o libre (ver Figura 25). Generalmente, el oro fino debido a la gran superficie que presenta, atrapa más mercurio por kg de amalgama que el oro grueso. Las relaciones Au/Hg medidas en diferentes minas varían entre 0.5 Hg : 1 Au hasta 2 Hg : 1 Au.

Las pérdidas de Hg durante la limpieza de la esponja de oro (producto de la quema de amalgama), son muy variables (dependiendo de la granulometría del oro, tamaño de la esponja de oro; y, el tiempo y temperatura de la quema etc., y pueden alcanzar hasta algunos porcentajes del peso de oro. Generalmente los compradores requeman la bola de oro para asegurarse que la misma esté bien quemada y sin restos de mercurio en su interior y/o funden el oro que compran para eliminar impurezas y/o mercurio residual (GAMA).

Por lo anteriormente expuesto, la destilación de mercurio mediante una retorta para condensar el vapor de Hg es ampliamente recomendada para recuperar el mercurio de la amalgama y así evitar su dispersión al medio ambiente. Dicho esto, el tiempo de combustión en la retorta utilizada por los mineros para evaporar el mercurio de la amalgama es de 45 min (Prueba 1).

En el proceso de destilación y recuperación de mercurio en retorta, se han realizado pruebas para evaluar el efecto del tiempo de combustión en la cantidad de mercurio recuperado y el porcentaje de mercurio no recuperado. Estas pruebas muestran resultados interesantes cuando se aumenta el tiempo de combustión en un 25% (a 60 minutos), ya que se observa un aumento del mercurio recuperado y una reducción del porcentaje del mercurio no recuperado.

En la Tabla 14 se muestran los resultados del porcentaje de mercurio recuperado de la amalgama y el Hg perdido y/o no recuperado al final del proceso de destilación. Las variaciones en el peso de las amalgamas y el contenido de mercurio recuperado y perdido dependen del tiempo de quemado en la retorta, de la cantidad de oro amalgamado y de si es oro grueso o fino.

Tabla 14. Balance de mercurio recuperado de la amalgama y extracción de Au

Sección 1					
Prueba	Amalgama (g)	Quema en retorta (min)	Au recuperado (%)	Hg recuperado (%)	Hg perdido (%)
1	1342,36	45	21,57	88,03	11,97
2	1411,02	60	28,91	89,23	10,77
3	1274,37	60	27,85	93,98	6,02
4	1357,94	60	29,34	93,09	6,91
Sección 2					
1	1257,21	45	32,05	93,65	6,35
2	1309,50	60	29,61	97,50	2,50
3	1475,64	60	29,59	97,92	2,08
4	1339,24	60	31,78	97,34	2,66

Los resultados obtenidos parecen mostrar que hubo un aumento en la cantidad de mercurio recuperado cuando se incrementó el tiempo de combustión en la retorta a 60 min. Además, se observó una reducción en el porcentaje de mercurio no recuperado, pasando del 11,97% (amalgama prueba 1) al 6,02% (amalgama prueba 3) en el caso de las amalgamas obtenidas en los molinos de la Sección 1. En el caso de las amalgamas obtenidas en la Sección 2, el porcentaje de mercurio no recuperado se redujo del 6,35% (amalgama prueba 1) al 2,08% (amalgama prueba 3) en el mejor de los casos.

El aumento de la recuperación de mercurio con retortas durante el quemado genera un impacto positivo en el medio ambiente y en la salud de los mineros y la población circundante. Esta técnica ayuda a limitar el mercurio que se libera en la atmósfera durante la quema de la amalgama, reduciendo así su impacto negativo. Además, el mercurio recuperado en el proceso puede ser reactivado y reutilizado, lo que supone un ahorro para los mineros; sin embargo, los pequeños mineros prefieren utilizar mercurio nuevo en lugar de mercurio recuperado, al que consideran "cansado" razón por la cual es desechado.

4.3.3. Recuperación de oro de la arena del bayetas y tanque de sedimentación

En principio, se recuperan la amalgama y el mercurio presentes en los relaves almacenados producto del bayeteado; y, de la arena acumulada (concentrado) en los tanques de sedimentación. Es importante destacar que estos procesos de recuperación se llevan a cabo para recuperar el oro que se escapa del proceso de amalgamación y sale del molino en los relaves.

Para el proceso de recuperación de oro y mercurio residual de la arena de relave producto del bayeteado (retenida en la fibra de vidrio y/o alfombras dispuestas a lo largo de los canalones), se llevan a cabo varias etapas:

1) Recuperación del oro mediante baldeado y/o canalón: Para recuperar el oro, se utiliza el baldeado y/o el pasado de las arenas por canalón (ver Figuras 23 y 51). Otra opción es el uso del concentrador centrífugo (Figura 24). Estos métodos permiten concentrar la amalgama y el mercurio presente en la arena y separar (el oro) de otros minerales presentes.

2) Platoneo (bateo) del producto: Después de concentrar la arena, se realiza el platoneo o bateo del producto para separar la amalgama y el mercurio residual. Este proceso permite obtener el oro y separarlo de otros elementos presentes en la mezcla. El bateo consiste en separar la amalgama del material más fino y/o menos denso realizando movimientos circulares en un recipiente convexo en forma de plato.

3) Lavado de la amalgama y quemado en la retorta: Una vez separada la amalgama, se procede al lavado de la misma para eliminar impurezas. Posteriormente, la amalgama se quema en una retorta para separar el mercurio y obtener el oro puro.

En cuanto al bayeteado, los mineros lo realizan con una frecuencia de lavado de cada 3 horas para las dos primeras alfombras y cada 8 horas para todas las alfombras. El número de alfombras varía en relación al tamaño del canalón. En el caso analizado, son un total de 10 alfombras y/o cobijas dispuestas a lo largo del canalón.

Inicialmente, se analizó como ensayo 1 el laboreo realizado por los mineros, seguidamente con el fin de mejorar el proceso y la recuperación, se reajustó el tiempo de bayeteado a 0,5 h para las dos primeras alfombras y cada 6 horas para todas las alfombras y cobijas, reajustando el tiempo para el bayeteado (ensayo 2), y con el objetivo de concentrar más relaves. La medida implementada evidenció, según lo previsto, un aumento en el volumen de arena acumulada con respecto a la prueba 1; del mismo modo, se repitió el proceso otras dos veces (ensayos 3 y 4) en las mismas condiciones de la prueba 2. Por último, para la recuperación se ensayó el procesamiento de los relaves acumulados en un concentrador genérico (mini concentrador centrífugo), este proceso los mineros lo realizaban mediante la técnica del baldeado y/o utilizando un canalón. Finalmente el producto se platonea (paneo) para obtener la amalgama y el mercurio.

Los resultados muestran un incremento en la recuperación de oro (amalgama) y mercurio residual al procesar la arena de las bayetas. El mercurio recuperado fluctúa entre el 10,08% recuperado en el ensayo 1 y el 13,01% en la mejor prueba (ensayo 4) en la Sección 1; y, de entre 10,46% (ensayo 1) y el 13,22% en la mejor prueba (ensayo 4) en la Sección 2. Este aumento como se ha mencionado se puede atribuir a la cantidad de arena almacenada al reajustar el tiempo de bayeteado y al uso y eficiencia del concentrador centrífugo.

En relación a los tanques de sedimentación, estos se ubican al final de los canalones en cada sección y se utilizan como última opción para recuperar el oro no atrapado por el mercurio al interior del molino chileno y que se pasa y/o no se recobra en los canalones.

En cuanto al proceso para la recuperación del oro (amalgama) y mercurio residual de la arena de relave acumulada en los tanques de sedimentación, este es similar al aplicado para la recuperación del oro de la arena de bayetas; por lo cual se procedió de manera similar a como se procesaron los relaves del bayeteado; por tanto, estos relaves se procesaron en el mini concentrador centrífugo y el producto concentrado final se platonea (bateo manual) para separar

la amalgama.

En los resultados hubo un incremento en la recuperación de oro (amalgama) y mercurio residual al procesar la arena de los tanques de sedimentación, El mercurio recuperado fluctúa entre el 8,74% recuperado en el ensayo 1 y el 10,75% de la mejor prueba (ensayo 4) en la Sección 1 y de entre 8,53% (ensayo 1) y 12,18% en la mejor prueba (ensayo 4) en la Sección 2. Este aumento como se ha mencionado se puede atribuir a la eficiencia del concentrador centrífugo para el proceso.

Al evaluar los dos procesos, se evidencia un aumento en la recuperación de oro y mercurio de los relaves producto del bayeteado en las dos secciones. Además, se consigue mejorar la recuperación de oro de la arena concentrada de los tanques de sedimentación, posiblemente debido a la utilización del concentrador centrífugo (véase la Tabla 15).

Tabla 15. Balance de mercurio recuperado del bayeteado y de los tanques de sedimentación y del rendimiento con respecto al ensayo 1 en las 2 secciones de molinos.

Sección 1				
Ensayo	Recuperación de Au (bayetas) (g)	Recuperación de Hg (bayetas) (%)	Recuperación de Au (tanque de arena) (g)	Recuperación de Hg (tanque de arena) (%)
1	8,76	10,08	3,17	8,74
2	10,28	12,78	4,53	10,20
3	14,51	11,95	5,21	10,59
4	13,96	13,01	5,38	10,75
Sección 2				
1	6,41	10,46	4,09	8,53
2	8,59	15,75	5,26	9,13
3	9,16	12,83	6,07	8,57
4	11,87	13,22	7,52	12,18

En la Figura 52 se representa el Au (g) recuperado de la arena acumulada producto

del bayeteado, así mismo del Au (g) recuperado del tanque de sedimentación (arena).

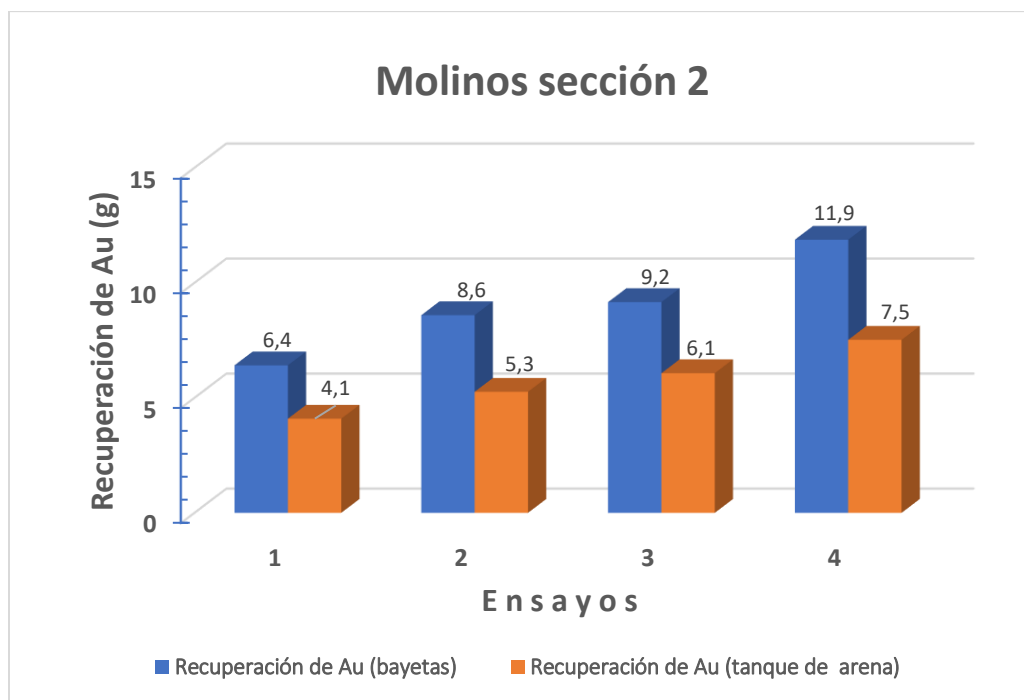
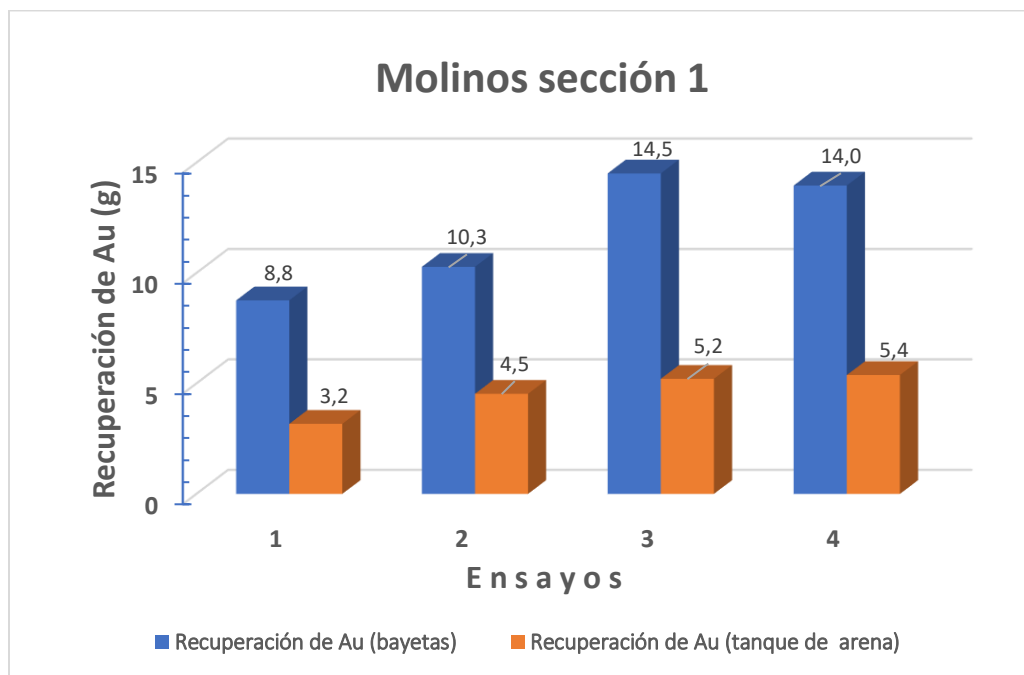


Figura 52. Recuperación de oro de bayetas y del tanque de arena, para las pruebas 1, 2, 3 y 4: a) Sección 1; b) Sección 2

La Figura 53 representa el porcentaje de Hg recuperado de la arena acumulada producto del bayeteado, así mismo del Hg recuperado del tanque de sedimentación (arena).

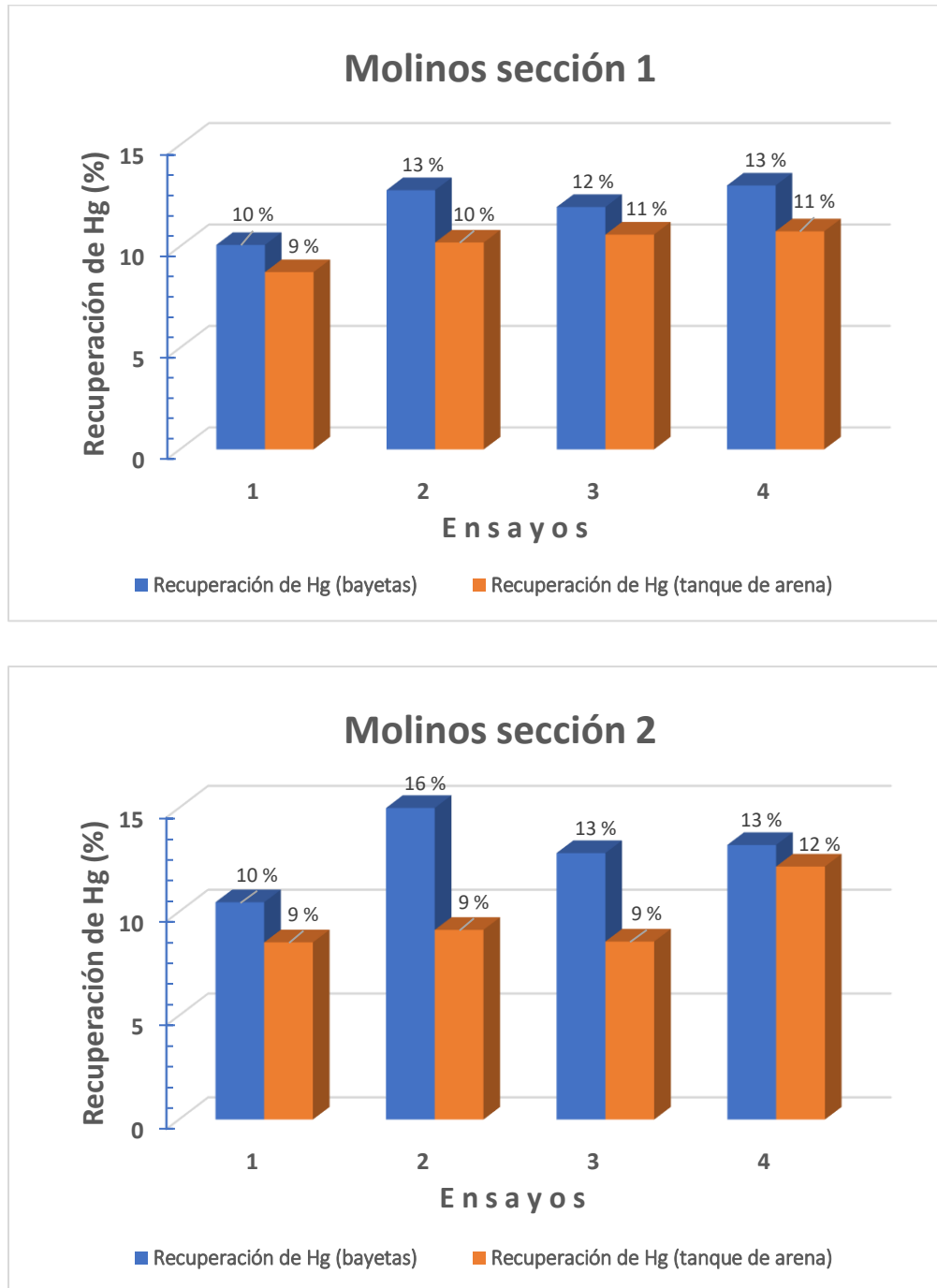


Figura 53. Porcentaje de recuperación de Hg de bayetas y del tanque de arena, para las pruebas 1, 2, 3 y 4: a) Sección 1; b) Sección 2

4.3.4. Eficiencia operativa en los molinos chilenos

Según los resultados de las pruebas realizadas en los molinos chilenos, con los cambios efectuados en la intervención se observó un aumento significativo en la recuperación de amalgama y mercurio residual en los ciclos de molienda, amalgamación y concentración en los ensayos 2, 3 y 4. Esto indica que las pérdidas de mercurio se reducen en comparación con las pruebas iniciales realizadas con los procesos tradicionales (ensayo 1) en cada sección de molinos. Esta reducción de pérdidas de mercurio tiene un impacto positivo en la optimización de la concentración y la recuperación del mineral.

En el ensayo 1, se observaron los siguientes resultados:

- **Sección 1:** Se alimentó un total de 3372,97 g de mercurio (100% del mercurio usado por los mineros). Se recuperaron 2343,28 g de mercurio (69,47%), mientras que se perdieron 1029,69 g de mercurio (30,53%) en el proceso (molienda, concentración, relaves y quemado).
- **Sección 2:** Se alimentó un total de 3455,38 g de mercurio (100% del mercurio usado por los mineros). Se recuperaron 2435,62 g de mercurio (70,49%), mientras que se perdieron 1019,76 g de mercurio (29,51%) en el proceso.

En el ensayo 2, se observaron los siguientes resultados:

- **Sección 1:** Se alimentó un total de 2800,20 g de mercurio (83% del mercurio usado por los mineros) al ciclo de molienda/amalgamación. Se recuperaron 2492,25 g de mercurio (89%) al final del proceso, lo que representa una pérdida de 307,95 g de mercurio (11%).
- **Sección 2:** Se alimentó un total de 2800,15 g de mercurio (81% del mercurio usado por los mineros). Se recuperaron 2560,64 g de mercurio (91,45%) al final del proceso, lo que representa una pérdida de 239,51 g de mercurio (8,55%).

En el ensayo 3, se observaron los siguientes resultados:

- **Sección 1:** Se alimentó un total de 2800,09 g de mercurio (83% del mercurio usado por los mineros) al ciclo de molienda/amalgamación. Se recuperaron 2457,02 g de mercurio (87,75%) al final del proceso, lo que representa una pérdida de 343,07 g de mercurio (12,25%).
- **Sección 2:** Se alimentó un total de 2800,07 g de mercurio (81% del mercurio usado por los mineros). Se recuperaron 2628,87 g de mercurio (93,89%) al final del proceso, lo que representa una pérdida de 171,20 g de mercurio (6,11%).

En el ensayo 4, se observaron los siguientes resultados:

- **Sección 1:** Se alimentó un total de 2800,05 g de mercurio (83% del mercurio usado por los mineros) al ciclo de molienda/amalgamación. Se recuperaron 2472,07 g de mercurio (88,29%) al final del proceso, lo que representa una pérdida de 327,98 g de mercurio (11,71%).
- **Sección 2:** Se alimentó un total de 2800,13 g de mercurio (81% del mercurio usado por los mineros). Se recuperaron 2583,82 g de mercurio (92,28%) al final del proceso, lo que representa una pérdida de 216,31 g de mercurio (7,72%).

Estos resultados indican que, en general, se logró una mayor recuperación de mercurio en los ensayos 2, 3 y 4 con una media del 88,35% y una desviación estándar del 0,56% en los molinos de la Sección 1; en tanto que en los molinos de la Sección 2, la media es del 92,54% y la desviación estándar es del 2,17%. Además, las pérdidas de mercurio se redujeron significativamente, lo que tiene un impacto positivo en la optimización de la concentración y la recuperación del mineral.

En general, en la tabla 16 se resume el porcentaje total de mercurio recuperado y perdido post intervención; como se observa, en los ensayos 2, 3 y 4 las pérdidas de mercurio se

redujeron con respecto al ensayo inicial con los procesos tradicionales (ensayo 1) en las dos secciones de molinos.

Tabla 16. Balance de recuperación y pérdidas de mercurio de los ensayos molienda-amalgamación

Sección 1				
Ensayo	Hg total recuperado del proceso (g)	Hg recuperado (%)	Hg total perdido en el proceso (g)	Hg perdido (%)
1	2343,28	69,47	1029,69	30,53
2	2492,25	89,00	307,95	11,00
3	2457,02	87,75	343,07	12,25
4	2472,07	88,29	327,98	11,71
Sección 2				
1	2435,62	70,49	1019,76	29,51
2	2560,64	91,45	239,51	8,55
3	2628,87	93,89	171,20	6,11
4	2583,82	92,28	216,31	7,72

Los resultados obtenidos indican que hubo un incremento significativo del mercurio recuperado en el proceso de molienda amalgamación, con respecto al ensayo inicial con los procedimientos tradicionales y la dosificación utilizada por los mineros:

- **Sección 1:** En el ensayo 1 con los procedimientos tradicionales, se recupera el 69,47% del mercurio alimentado, perdiéndose en el proceso un 30,53%. En tanto que en los ensayos 2, 3 y 4 con la intervención y reduciendo en un 18% (promedio) la cantidad de mercurio alimentado a los molinos, la recuperación de mercurio se incrementa hasta alcanzar entre un 87,75% y un 89% del mercurio total añadido.
- **Sección 2:** En el ensayo 1 con los procedimientos tradicionales, se recupera el 70,49% del mercurio alimentado, perdiéndose en el proceso un 29,51%. En tanto que en los ensayos 2, 3 y 4 con la intervención y reduciendo en un 18% (promedio) la cantidad de mercurio alimentado a los molinos, la recuperación de mercurio se incrementa hasta

alcanzas entre 91,45% y un 93,89% del mercurio total añadido (ver Figura 54).

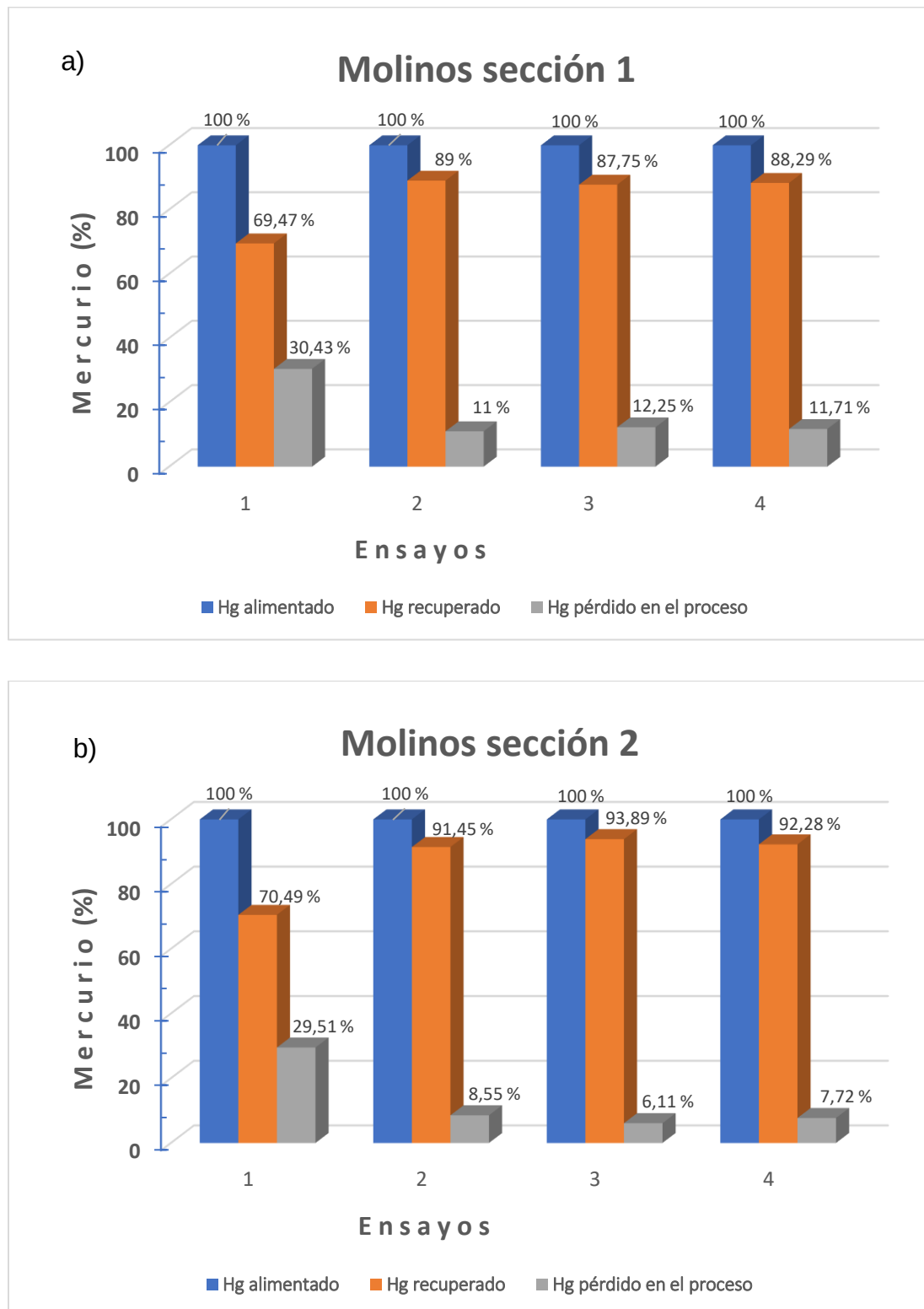


Figura 54. Balances de Hg para las pruebas 1, 2, 3 y 4: a) Sección 1; b) Sección 2

En cuanto al oro extraído y recuperado del mineral de mena del área Nambija se tienen los siguientes resultados:

- **Sección 1:** En el ensayo 1 con los procedimientos tradicionales, se recupera un 26,68% del oro contenido en el mineral. En tanto que en los ensayos 2, 3 y 4 con la intervención y probando a reducir la cantidad de mercurio alimentado en los molinos en un 18% (promedio), se mejora la extracción y recuperación de oro. Los resultados oscilan entre un 29,98% hasta un 33,82%.
- **Sección 2:** En el ensayo 1 con los procedimientos tradicionales, se recupera un 27,02% del oro contenido en el mineral. En tanto que en los ensayos 2, 3 y 4 con la intervención y reduciendo la cantidad de mercurio alimentado en los molinos en un 18% (promedio), se mejora la extracción y recuperación de oro. Los resultados oscilan entre un 32,12% hasta un 36,16%.

Al interpretar la graficas obtenidas en las Figuras 55 y 56, se concluye que aumenta el porcentaje de oro extraído al reducir en un 18% la cantidad de mercurio aportado al ciclo de molienda en los molinos chilenos. Esto supone un considerable ahorro mensual para los mineros.

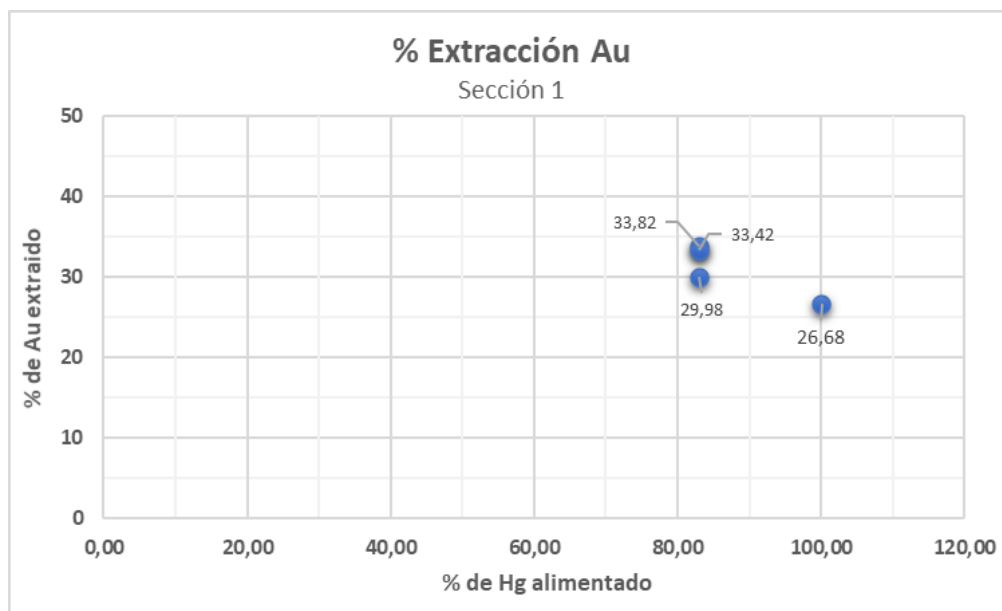


Figura 55. Porcentaje (%) de extracción de oro, en relación al porcentaje (%) de mercurio alimentado, para las pruebas 1, 2, 3 y 4, en la Sección 1

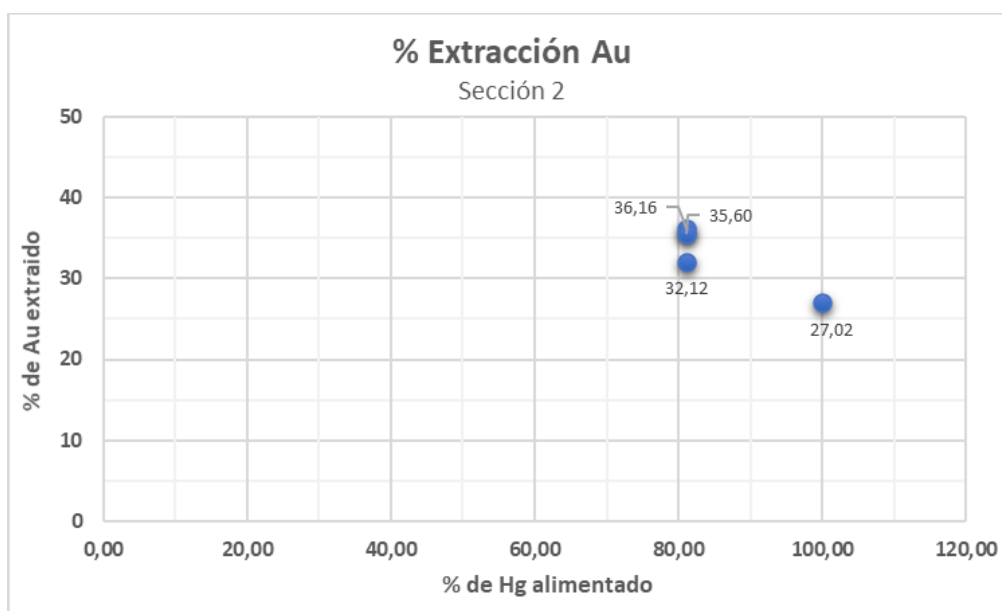


Figura 56. Porcentaje (%) de extracción de oro, en relación al porcentaje (%) de mercurio alimentado, para las pruebas 1, 2, 3 y 4, en la Sección 2

Finalmente, las diferencias y fluctuaciones en los resultados de los ensayos 2, 3 y 4 son una posible consecuencia de la operación y/o alimentación de mineral a cada molino (lo que implica paradas por mantenimiento y/o daños, la falta de agua para el proceso, etc.), esto determina el por qué en cada ciclo de molienda, en cada sección y/o molino se procesa más o menos mineral.

4.3.5. Otras Pérdidas de mercurio en planta

Como dato anexo se puede citar que pueden existir pérdidas de mercurio por deficiencias en el armado e instalación de los molinos tipo chileno. En la figura 57, se puede observar que al levantar las bases del molino se encuentra mercurio disperso por toda el área de la base. En este sentido es importante el tener en cuenta la calidad del armado e instalación del equipo, que a su vez va a estar en dependencia de la experiencia y habilidad de los constructores. En este caso, el molino se desmanteló para retirarlo y llevarlo para ser instalado en otro sector.



Figura 57. Pérdidas de mercurio por el deficiente armado e instalación de un molino tipo chileno

En esta ocasión se logró recuperar un total de 30 libras de mercurio (ver Figura 58). El tiempo aproximado de funcionamiento y operación del molino fue de aproximadamente 5 años. Este factor también puede influir e incide en las pérdidas de mercurio dentro del proceso molienda - amalgamación.



Figura 58. Recuperación de mercurio presente en las bases del molino

4.4. ANÁLISIS DE CALIDAD DE LOS EFLUENTES

El análisis de la calidad del agua es fundamental para identificar y cuantificar los contaminantes presentes en los efluentes, afluentes y drenaje principal dentro del área minera de Nambija. Este proceso implica la medición de diversos parámetros físicos y químicos para determinar las condiciones y la carga contaminante. En el caso específico de Nambija, se realizaron mediciones "*in situ*" en los puntos de muestreo para determinar los parámetros fisicoquímicos como el pH, el oxígeno disuelto (OD), la conductividad, los sólidos suspendidos totales (TDS) y la salinidad. Sin embargo, los valores obtenidos para plomo, cobre, zinc, hierro y mercurio no serían válidos debido a que el límite de detección del equipo utilizado es superior a

lo que indica la legislación ecuatoriana. Por lo tanto, se recomienda a futuro la utilización de equipos de análisis más sensibles, como ICP-AES o ICP-MS, para poder cuantificar adecuadamente estos metales pesados. Como se mencionó anteriormente, es importante destacar que es algo que debía hacerse y que se hizo todo lo posible para cumplir con el objetivo propuesto con los medios disponibles, aunque no fue suficiente. El avance realizado en cuanto al análisis de calidad de los efluentes se adjunta y puede revisarse en anexos (anexo 8.1).

5. CONCLUSIONES

1. Los resultados de las pruebas granulométricas y de recuperación mineral en un molino amalgamador de barras “chancha”, muestran que la fracción mineral que libera el oro en una mayor proporción ocurre cuando al menos el 62,12% del material pasa a través de la malla #120 (125 μm) y el tamaño de partícula d80 es igual o menor a 180 μm . Esto significa que existe un tamaño de partícula mineral en el que se libera el oro en mayor proporción cuando el tiempo de molienda es de 120 minutos.
2. En base a los resultados de las pruebas se determinó que para lograr una mejor recuperación de oro del mineral procesado, en el molino de barras "chancha" se deben alimentar 340,5 g de mercurio (Hg) a cada ciclo de molienda - amalgamación. Esto permite reducir en un 25% la cantidad de mercurio utilizada actualmente por los mineros artesanales en Nambija; con una recuperación de oro del $57 \pm 0,5\%$.
3. El test de Tukey establece que existen diferencias significativas entre la estimación de la media del porcentaje de oro recuperado tanto con el tiempo de molienda como con la cantidad de mercurio introducido en todos los casos, concluyendo que la mejor opción sería la de 120 minutos de molienda y con 340,5 gramos de mercurio.
4. Los resultados en las pruebas en los molinos chilenos muestran que es posible reducir la adición de mercurio hasta en un 18% en un molino chileno, al aplicar esta reducción, se observó que la concentración mineral y el rendimiento del molino no se vieron afectados. La diferencia entre la reducción en los molinos de barras y en los molinos chilenos se debe principalmente a las características propias de funcionamiento, operación, capacidad de procesamiento (tamaño) de cada uno de estos equipos.
5. En la intervención para mejorar el proceso de concentración y recuperación de Au-Hg, se implementaron dos acciones específicas: 1. El cambio de las mallas de descarga de los

molinos a malla # 100 y 2. Se estableció un régimen de alimentación regular al molino (20 minutos). Esta medida busca mantener un flujo constante de mineral al molino, lo que contribuye a una molienda más eficiente y a una mejor recuperación de oro y mercurio. Se evidencia que la cantidad de mercurio recuperado al final del proceso de concentración aumentó del 24% (prueba 1) al 36% (prueba 2) en la Sección 1; y, del 29% (prueba 1) al 36% (prueba 3) en la Sección 2.

6. En el proceso de destilación y recuperación de mercurio en retorta, se hicieron ensayos para evaluar el efecto del tiempo de combustión en la cantidad de mercurio recuperado y no recuperado. Los resultados de las pruebas indican que al incrementar el tiempo de combustión en la retorta en un 25% (a 60 minutos), se observa un aumento en la cantidad de mercurio recuperado, lo que significa que al prolongar el tiempo de combustión, se logra una mayor eficiencia en la recuperación del mercurio; en tanto que, el porcentaje de mercurio no recuperado se redujo del 12% (prueba 1) al 6% (prueba 3) en el mejor caso en los molinos de la Sección 1 y del 6% (prueba 1) al 2% (prueba 3) en los molinos de la Sección 2.
7. En lo relacionado a la recuperación de oro de las arenas producto del bayeteado, los resultados muestran un incremento en la recuperación de oro (amalgama) y mercurio residual al procesar la arena de las bayetas. El mercurio recuperado fluctúa entre el 10% recuperado en el ensayo 1 y el 13% en la mejor prueba (ensayo 4) en la Sección 1; y, de entre el 10% (ensayo 1) y el 13% (ensayo 4) en la Sección 2. Este aumento como se ha mencionado se puede atribuir a la cantidad de arena almacenada al reajustar el tiempo de bayeteado y al uso y eficiencia del concentrador centrífugo.
8. En relación a la recuperación de oro de la arena concentrada en los tanques de sedimentación, hubo un incremento en la recuperación de oro (amalgama) y mercurio residual al procesar la arena de los tanques de sedimentación, El mercurio recuperado fluctúa entre el 9% recuperado en el ensayo 1 y el 11% de la mejor prueba (ensayo 4) en la

Sección 1 y de entre 9% (ensayo 1) y 12% en la mejor prueba (ensayo 4) en la Sección 2. Este aumento como se ha mencionado se puede atribuir a la eficiencia del concentrador centrífugo para el proceso.

9. Los resultados de los análisis indican que se logró una mayor recuperación de mercurio en los ensayos 2, 3 y 4, con una media del 88 % de Hg en la Sección 1 y una media del 92 % de Hg en la Sección 2. La desviación estándar en la Sección 1 fue del 0,56%, mientras que en la Sección 2 fue del 2,17%; las pérdidas de mercurio se redujeron significativamente, lo que tiene un impacto positivo en la optimización de la concentración y la recuperación del mineral.
10. Se ha demostrado con la intervención que es posible aplicar alternativas simples y viables que pueden mejorar el desempeño operativo de los molinos chilenos en la minería artesanal. Estas opciones pueden aumentar la recuperación de oro hasta en un 9 % e incluso reducir las pérdidas de mercurio en el proceso en hasta un 20 % en promedio, el resultado puede influir en la reducción del uso del mercurio en el país.

6. LINEAS FUTURAS

En relación a las propuestas futuras para el área minera de Nambija, se tienen las siguientes:

1. Realizar estudios complementarios para optimizar el proceso de molienda y amalgamación. Una posible opción es probar un sistema de mallas en serie (mallas #100 y #120), para analizar su efecto en la extracción y recuperación de oro. En base a que se ha determinado que el tamaño de grano específico para la liberación de oro del mineral de Nambija se alcanza cuando un 62 % de la masa del mineral pasa a través de la malla 120. La optimización del proceso de amalgamación en la pequeña minería del oro puede ayudar a mejorar la recuperación del oro y reducir las pérdidas de mercurio.
2. Existen limitaciones y desafíos en la reducción de la carga contaminante en los efluentes mineros del área minera de Nambija, razón por la cuál es necesario cuantificar las concentraciones de metales pesados en los efluentes para evaluar el impacto ambiental a fin de tomar las medidas adecuadas, considerando que cada situación minera es única y puede requerir enfoques específicos para abordar los desafíos ambientales.

La eliminación de la amalgamación en la minería a pequeña escala es un objetivo importante debido a los riesgos asociados. Se presentan algunas líneas futuras que se están explorando para abordar el desafío:

1. Optimizar los procesos de recuperación de oro, utilizando métodos más seguros y eficaces que puedan reducir la dependencia de la amalgamación. Las tecnologías alternativas a desarrollar son:

- Cianuración a pequeña escala: Para lo cual debe buscar adaptar la tecnología de cianuración para su uso en operaciones de pequeña escala (con énfasis en la seguridad y la eficiencia).
 - Lixiviación con soluciones alternativas: Investigar y desarrollar lixiviantes no tóxicos y/o menos tóxicos que puedan reemplazar al mercurio en la extracción de oro.
 - Concentración por gravedad: Implementar métodos gravimétricos de concentración (gravedad), más eficientes para recuperar oro sin necesidad de mercurio.
 - Investigación de tecnologías emergentes: Continuar la investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras para la extracción de oro sin mercurio.
2. Es fundamental brindar capacitación y asistencia técnica a los mineros promoviendo técnicas y tecnologías alternativas a la amalgamación, más seguras y sostenibles para la extracción de minerales, con:
- Programas de capacitación: Brindar capacitación a los mineros a pequeña escala (artesanales y pequeña minería); sobre las nuevas tecnologías disponibles, las prácticas de seguridad y los métodos de extracción sostenibles sin mercurio.
 - Asistencia técnica: Ofrecer apoyo técnico a los mineros para la implementación de tecnologías alternativas más limpias, sostenibles y la mejora de sus operaciones.
 - Campañas de concienciación: Participar a las comunidades y sectores de influencia sobre los riesgos del mercurio y la importancia de la minería responsable.
3. Acceso a Financiamiento y tecnología para que los mineros a pequeña escala puedan adoptar tecnologías más limpias y sostenibles. Esto puede incluir la implementación de

programas de financiamiento y la colaboración con organizaciones internacionales y gubernamentales para proporcionar equipos y tecnologías más seguras.

- Microcréditos y préstamos: Facilitar el acceso a financiamiento para que los mineros a pequeña escala puedan invertir en tecnologías limpias.
 - Subvenciones e incentivos: Brindar apoyo financiero para la adopción de tecnologías alternativas y la eliminación gradual de la amalgamación.
4. La formalización del sector a fin de fortalecer las regulaciones y el cumplimiento en la minería a pequeña escala, para garantizar que se adopten prácticas más seguras y sostenibles. Lo que implica la implementación de medidas de monitoreo y control, así como la aplicación de sanciones en caso de incumplimiento, con:
- La regularización de la pequeña minería: Al implementar marcos legales que reconozcan y brinden apoyo a la pequeña minería responsable.
 - Promoción de la formalización: Incentivar a los mineros a formalizar sus operaciones para acceder a mejores prácticas, financiamiento y asistencia técnica.
5. La cooperación internacional a fin de fomentar la colaboración entre países y organizaciones para compartir conocimientos y experiencias en la eliminación de la amalgamación; aunado a, la asistencia financiera y técnica para apoyar a los países en desarrollo en la implementación de estrategias para la eliminación del mercurio en la minería.

En resumen, eliminar la amalgamación en la minería a pequeña escala es un objetivo prioritario debido a los riesgos asociados con el uso de mercurio; y un, desafío complejo que requiere un enfoque multifacético. Es importante el destacar que la eliminación del mercurio en la minería a

pequeña escala es un proceso gradual que requiere tiempo y esfuerzo, sin embargo los beneficios son considerables y justificados.

NOTAS FINALES

El control de los tiempos de amalgamación y la proporción de mercurio utilizado también puede reducir las pérdidas, conjuntamente con un aumento de la recuperación de oro (Pantoja et al., 2005), lo que implica un mayor beneficio económico para los mineros. Sin embargo, desde el punto de vista técnico-económico se debe considerar la ineficiencia del proceso, lo absurdo de amalgamar toda la mena en un circuito abierto, la baja recuperación mineral (Au) y lo nocivo que resulta el proceso de amalgamación para el medio ambiente y por ende de la población circundante; Por lo tanto, se debe restringir la amalgamación, consecuentemente se deben buscar e implementar alternativas de recuperación más económicas y amigables con el medio ambiente: moler el mineral, concentrarlo y amalgamar solo el concentrado, la otra alternativa podría ser venderlo a una planta de cianuración.

En relación con las implicaciones, un uso eficiente de los recursos mineros puede reducir; y en cierta medida, controlar el uso de mercurio en los procesos de concentración y beneficio mineral (oro). La propuesta señalada en este estudio es factible y puede tener un impacto positivo en la reducción de las emisiones antropogénicas de mercurio como medida de mitigación dentro del sector minero de Nambija, lo que sin duda puede ser replicado en otros yacimientos auríferos donde se realiza este tipo de minería.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. A. Sana, C. De Brouwer, and H. Hien, "Conocimiento y percepciones de los riesgos para la salud y el medio ambiente relacionados con la minería artesanal de oro por parte de los mineros artesanales en Burkina Faso: una encuesta transversal", *Pan African Medical Journal*, vol. 27, pp. 1–15, 2017, doi: 10.11604/pamj.2017.27.280.12080.
2. E. Mwandiringana and J. Ye, "Mining what is not mine: Artisanal gold mining in Gwanda, Zimbabwe," *Extractive Industries and Society*, vol. 13, no. December 2021, p. 101217, 2023, doi: 10.1016/j.exis.2023.101217.
3. F. Vergara-Murillo, S. González-Ospino, N. Cepeda-Ortega, F. Pomares-Herrera, and B. Johnson-Restrepo, "Efectos adversos para la salud y exposición al mercurio en una comunidad colombiana de minería de oro artesanal y de pequeña escala", *Toxics*, vol. 10, no. 12, p. 723, 2022, doi: 10.3390/toxics10120723.
4. A. Delgado Jiménez, N. M. Smith, and E. A. Holley, "Capitales en la minería artesanal y de pequeña escala en Marmato, Colombia: Uso del marco de medios de vida sostenibles para informar la formalización," *Extr Ind Soc*, vol. 12, p. 101157, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.EXIS.2022.101157.
5. S. Jiménez-Oyola et al., "Evaluación probabilística de múltiples vías de riesgo para la salud humana debido a metales pesados (loides) en un área tradicional de minería de oro en Ecuador", *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 224, p. 112629, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.112629.
6. V. Bester, "Hacia un sector sostenible de minería artesanal de oro en Sudáfrica: iniciativas de desarrollo propuestas", *J Rural Stud*, vol. 97, pp. 375–384, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.JRURSTUD.2022.12.029.
7. M. M. Veiga and A. J. Gunson, "Concentración por gravedad en la minería artesanal de oro", *Minerals*, vol. 10, no. 11, p. 1026, Nov. 2020, doi: 10.3390/MIN10111026.
8. A. N. Manzila, T. Moyo, and J. Petersen, "A Study on the Applicability of Agitated Cyanide Leaching and Thiosulphate Leaching for Gold Extraction in Artisanal and Small-Scale Gold Mining", *Minerals*, vol. 12, no. 10, p. 1291, Oct. 2022, doi: 10.3390/MIN12101291.
9. J. Jonkman and M. de Theije, "Amalgamación: enredos sociales, tecnológicos y legales en regiones mineras de oro a pequeña escala en Colombia y Surinam," *Geoforum*, vol. 128, pp. 202–212, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.GEOFORUM.2021.10.017.
10. P. de Almeida Rodrigues, R. G. Ferrari, L. N. dos Santos, and C. A. Conte Junior, "Mercury in aquatic fauna contamination: A systematic review on its dynamics and potential health risks",

- Journal of Environmental Sciences*, vol. 84, pp. 205–218, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.JES.2019.02.018.
11. S. Jiménez-Oyola et al., “Evaluación del riesgo de exposición humana por múltiples vías mediante modelos bayesianos en el distrito minero de mercurio históricamente más grande”, *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 201, no. March, 2020, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110833.
 12. P. Torkaman et al., “Leaching gold with cassava: An option to eliminate mercury use in artisanal gold mining,” *J Clean Prod*, vol. 311, p. 127531, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.127531.
 13. P. Alfonso et al., “The importance of mineralogical knowledge in the sustainability of artisanal gold mining: A mid- South Peru case,” *Minerals*, vol. 9, no. 6, 2019, doi: 10.3390/min9060345.
 14. O. Lydia, A. Godwin, and L. Isaac, ““No hemos hecho nada malo’: Percepciones de los jóvenes mineros sobre las consecuencias ambientales de la minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) en Ghana”, *Extr Ind Soc*, vol. 12, p. 101179, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.EXIS.2022.101179.
 15. L. Sánchez-Vázquez, M. G. Espinosa-Quezada, and M. B. Eguiguren-Riofrío, “‘Golden reality’ or the ‘reality of gold’: Artisanal mining and socio-environmental conflict in Chinapintza, Ecuador,” *Extractive Industries and Society*, vol. 3, no. 1, pp. 124–128, 2016, doi: 10.1016/j.exis.2015.11.004.
 16. S. Kosai, K. Nakajima, and E. Yamasue, “Mercury mitigation and unintended consequences in artisanal and small-scale gold mining,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 188, p. 106708, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2022.106708.
 17. C. Mestanza-Ramón et al., “Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM): Management and Socioenvironmental Impacts in the Northern Amazon of Ecuador,” *Sustainability*, vol. 14, no. 11, p. 6854, Jun. 2022, doi: 10.3390/SU14116854.
 18. A. O. Gonçalves, B. G. Marshall, R. J. Kaplan, J. Moreno-Chavez, and M. M. Veiga, “Evidence of reduced mercury loss and increased use of cyanidation at gold processing centers in southern Ecuador,” *J Clean Prod*, vol. 165, pp. 836–845, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.07.097.
 19. V. L. Morgan, E. S. McLamore, M. Correll, and G. A. Kiker, “Emerging mercury mitigation solutions for artisanal small-scale gold mining communities evaluated through a multicriteria decision analysis approach”, *Environ Syst Decis*, vol. 41, no. 3, pp. 413–424, 2021, doi: 10.1007/s10669-021-09808-0.
 20. U. Cruz and E. Vega, “Caracterización de la contaminación ambiental asociada al proceso de amalgamación basado en la pérdida de mercurio”, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 835, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/835/1/012010.

21. P. Torkaman and M. M. Veiga, "Comparación de la cianuración con la amalgamación de una muestra de minería de oro artesanal colombiana: sugerencia de un proceso simplificado de precipitación de zinc", *Extr Ind Soc*, vol. 13, p. 101208, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.EXIS.2022.101208.
22. J. J. Hinton, M. M. Veiga, and A. T. C. Veiga, "Clean artisanal gold mining: a utopian approach?", *J Clean Prod*, vol. 11, no. 2, pp. 99–115, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0959-6526(02)00031-8.
23. P. Semsari Parapari, M. Parian, and J. Rosenkranz, "Quantitative analysis of ore texture breakage characteristics affected by loading mechanism: Fragmentation and mineral liberation", *Miner Eng*, vol. 182, no. April, p. 107561, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107561.
24. G. T. Carling et al., "Concentraciones de partículas y oligoelementos disueltos en tres ríos del sur de Ecuador impactados por la minería artesanal de oro", *Water Air Soil Pollut*, vol. 224, no. 2, Feb. 2013, doi: 10.1007/S11270-012-1415-Y.
25. J. D. Appleton, T. M. Williams, H. Orbea, and M. Carrasco, "Fluvial Contamination Associated with Artisanal Gold Mining in the Ponce Enríquez, Portovelo-Zaruma and Nambija Areas, Ecuador", *Water Air Soil Pollut*, 2001, doi: 10.1023/A:1011965430757.
26. M. E. Ramírez Requelme, J. F. F. Ramos, R. S. Angélica, and E. S. Brabo, "Evaluación de la contaminación por Hg en suelos y sedimentos de arroyos en el distrito mineral de Nambija, Amazonía ecuatoriana (ejemplo de un área impactada afectada por la minería artesanal de oro)", *Applied Geochemistry*, vol. 18, no. 3, pp. 371–381, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0883-2927(02)00088-4.
27. MAE-PRAS Ministerio del Ambiente de Ecuador, "Programa de reparación ambiental y social - Diagnóstico Socioambiental de la zona minera Nambija", Quito-Ecuador, 2015.
28. Ministerio del Ambiente, FMAM-Fondo para el Medio Ambiente Mundial, ONUDI, and AGC-Artisanal Gold Council, "Línea de base nacional para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala de Oro en Ecuador, conforme la convención de Minamata sobre Mercurio," 2020, pp. 8–89.
29. Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, *Guía de buenas prácticas de la esmeralda colombiana*. 2020.
30. D. Buitrón O., D. Barona D., F. Iturra M., and J. L. F., "Validación del método para la determinación de oro por ensayo al fuego combinado con espectrometría de absorción atómica en muestras geológicas mineras metalúrgicas", *InfoAnalítica*, vol. 9, no. 1, pp. 119–136, 2021, doi: 10.26807/ia.v9i1.188.

31. F. B. Magalhães, C. de Freitas Carvalho, E. L. Corrêa Netto Carvalho, M. I. Yoshida, and C. Gouvêa dos-Santos, "Rendering wastes obtained from gold analysis by the lead-fusion fire-test method non-hazardous", *J Environ Manage*, vol. 110, pp. 110–115, 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.06.028.
32. A. Hajinia and T. Heidari, "Determinación fluorométrica sensible del oro en muestras geológicas mediante la preconcentración de prueba de fuego junto con un dispositivo analítico basado en papel microfluídico", *Microchemical Journal*, vol. 164, no. January, p. 105923, 2021, doi: 10.1016/j.microc.2021.105923.
33. O. J. R. Baena, G. Aristizábal, M. S. Pimentel, C. A. Flórez, and C. E. Argumedo, "Gestión de residuos y eliminación de mercurio en relaves de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala en el municipio andino de Antioquia, Colombia", *Mine Water Environ*, vol. 40, no. 1, pp. 250–256, Mar. 2021, doi: 10.1007/S10230-020-00728-0/METRICS.
34. INEN-Instituto Ecuatoriano de Normalización, *Norma Técnica Ecuatoriana-INEN 2169: 2013 Agua, calidad del agua, muestreo, manejo y conservación de muestras*. 2013, p. 26. [Online]. Available: <http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/NTE-INEN-2169-AGUA.-CALIDAD-DEL-AGUA.-MUESTREO.-MANEJO-Y-CONSERVACIÓN-DE-MUESTRAS.pdf>
35. E. M. Pérez-García, J. Bouchard, and Poulin, "Integrating online mineral liberation data into process control and optimisation systems for grinding–separation plants," *J Process Control*, vol. 105, pp. 169–178, 2021, doi: 10.1016/j.jprocont.2021.07.014.
36. O. Altun and D. Altun, "Estimation of mineral liberation distribution functions to be used in modelling of impact and attrition grinding," *Miner Eng*, vol. 173, p. 107236, 2021, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107236.
37. Ministerio de Energía y Minas del Perú, "Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético," p. 112, 2022, [Online]. Available: <https://www.sonami.cl/v2/informacion-de-la-mineria/mineria-metalica/>
38. Chas. F. Jackson and J. H. Hedges, *Metal-Mining Practice*. Washington DC, 1939.
39. L. P. García, Y. C. Llópiz, and L. R. G. Puyáns, "MODELO MATEMÁTICO PARA DESCRIBIR LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA FASE DISPERSA DE LAS SUSPENSIONES DE LATERITA," *Tecnología Química*, vol. XXIX, no., pp. 83–91, 2009, Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761010>
40. G. K. Pantoja-Barrios, E. K. Molina-Ramírez, S. N. Fuentes-Torres, F. A. Ramírez, J. Mojica, and J. I. Londoño-Escobar, "Metodología geometalúrgica para mejorar el proceso de extracción de oro en pequeña escala de la mina Gualconda en Nariño – Colombia.," *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 143–152., 2020.

41. O. García, M. M. Veiga, P. Cordy, O. E. Suescún, J. M. Molina, and M. Roeser, "Minería artesanal de oro en Antioquia, Colombia: un caso exitoso de reducción de mercurio", *J Clean Prod*, vol. 90, pp. 244–252, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2014.11.032.
42. T. F. Pantoja, R. R. Álvarez, and A. A.S. Rodríguez, "Métodos para reducir la contaminación por mercurio en pequeñas explotaciones mineras auríferas", *Revista de metalurgia*, no. 0, pp. 194–203, 2005.
43. Ministerio del Ambiente, FMAM-Fondo para el Medio Ambiente Mundial, ONUDI, and AGC-Artisanal Gold Council, "Línea de base nacional para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala de Oro en Ecuador, conforme la convención de Minamata sobre Mercurio," 2020, pp. 8–89.
44. Ministerio del Ambiente. (2015). Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes:Recurso agua." Quito, p. 131.
45. Veiga, M., & Baker, R. (2004). Global Mercury Project. *Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by Artisanal and Small-scale Gold Miners. United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria.*
46. Veiga, M. M., Maxson, P. A., & Hylander, L. D. (2006). Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining. *Journal of cleaner production*, 14(3-4), 436-447.
47. Easdon Michael, (2004), "Nambija Gold Project", technical report prepared for Oromonte Resources Inc. Zamora, Ecuador.
48. O. Davila, (1997), Geological Exploration of Nambija Mines, preliminary Phase Nambija Project, prepared for Canuc Resources Corporation and Andos S.A., By Benar Minerals Services Ltd.
49. J. W. Baldock. (1982). Geología del Ecuador. *Boletín de Explicación del Mapa geológico de la República del Ecuador. Dirección General de Geología y Minas, Quito*, 70.
50. Ley de Minería del Ecuador (Ley 45), Registro Oficial Suplemento 517 de 29 – ene – 2009, última modificación 24–nov–2011, estado vigente.
51. RICTHISARM. (1997). "Estudio sobre el estado ambiental de los Condominios Nambija. Al 31 de marzo de 1997. Estudio contratado por la Compañía Minera ANDOS S.A., Zamora Chinchipe, Ecuador.
52. Carrillo, F., Zenteno, R., & Rubín, L. (2010). Tecnologías limpias aplicables a la explotación de oro. *La Paz: PIEB.*
53. Proyecto GAMA. <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/7/7-1-2-2.htm>
54. Fontboté L., Vallance J., Markowski A., Chiradía M. (2005). Oxidized Gold Skarns in the Nambija District, Ecuador. *Geoscienceworld*. <https://doi.org/10.5382/SP.11.19>.

55. INACAP. Flotación por espuma, Procesamiento de minerales de menas sulfuradas. <https://www.studocu.com/cl/document/universidad-tecnologica-de-chile/metalurgia-extractiva-ii/informe-metalurgia-flotacion-hafemann-cariceo/17936058>.
56. Carrillo, F., Zenteno, R., & Rubín, L. (2010). Tecnologías limpias aplicables a la explotación de oro. *La Paz: PIEB*.
57. Bel Roset, G. (2022). *Afecciones ambientales producidas por la minería artesanal de oro de Bolivia* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
58. Fajardo Rodríguez, F. A. (2015). Convenio de Minamata sobre el mercurio-implicaciones jurídicas de la ratificación: el caso de la Ley 1658 de 2013.
59. Lavandaio, E. O. L. (2014). Conozcamos más sobre minería.
60. Ros, A. (2017). Recopilación sobre la metalurgia del oro.
61. Huarca Garate, A., & Mantilla Ataucuri, D. O. (2023). Optimización de la concentración de cianuro y granulometría del mineral en la extracción del oro por el proceso carbón en lixiviación en la empresa minera FIDAMI SA Sancos-Ayacucho.
62. Ichavautis Nuñez, A. (2014). Recuperación de mercurio y oro de las colas de amalgamación en la minería.
63. Huayhua, E. (2003). Experiencia de introducción de tecnología apropiada en una operación minera artesanal. *Villas Boas, R., Aranibar, A. Pequeña minería y minería artesanal en Iberoamérica. Río de Janeiro: CETEM/CYTED/CONACYT*, 141-152.
64. Romero Garcia, J. O. (2020). Extracción de oro mediante el proceso de lixiviación con el reactivo sandioss del yacimiento minero Chocrocoña, Llusco Chumbivilcas, región Cusco.
65. AMBIENTAL, M. E. C. Y. T. (2011). *Evaluación de cuatro métodos para recuperación de oro a partir de un mineral refractario* (Doctoral dissertation, CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS).
66. Parra, A. M., Hernandez, M. C. V., & Molina, J. C. S. (2018). Impacto ambiental sobre el recurso hídrico, una consecuencia del procesamiento del oro.
67. Julio, T., & Arnobis, W. (2020). Estrategia ambiental para optimizar la explotación minera en el corregimiento de Animas Altas Sur de Bolívar.
68. Van Hoof, B., Monroy, N., & Saer, A. (2018). *Producción más limpia: paradigma de gestión ambiental*. Universidad de los Andes.
69. Sepúlveda, T. V. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. Instituto Nacional de Ecología.
70. López Pérez, K. Y., & Gutiérrez Amaya, L. J. (2022). *Minería de oro artesanal y seguridad y salud en el trabajo* (Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Minuto de Dios).

71. Forns Sant, P. (2020). *La explotación del oro en el río Mapiri: sistema actual y mejoras* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
72. Arminta Qjehuarucho, L., & Vargas Huaman, D. N. (2022). Extracción de oro del mineral aurífero por lixiviación en columnas con reactivos bromuro de potasio y ácido bromhídrico en la Unidad Minera UTUNSA–Anabi-Haquira Apurímac.
73. Vásconez Carrasco, Marcelo, & Torres León, Leonardo. (2018). Minería en el Ecuador: sostenibilidad y licitud. *Revista Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina* , 6(2), 83-103. Recuperado en 18 de febrero de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-01322018000200006&lng=es&tlng=es.
74. <https://es.statista.com/estadisticas/634823/produccion-minera-de-oro-mundial/>
75. Lupo Canahuire, W., & Utani Poma, W. (2014). Recuperación del cobre por flotación de los minerales sulfurados del yacimiento Sulfubamba-Apurímac.

A N E X O S

8. ANEXOS

8.1. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LOS EFLUENTES

El análisis de la calidad es crucial, ya que permite identificar y cuantificar los contaminantes presentes en los efluentes, afluentes y drenaje principal; este proceso, implica la medición de diversos parámetros físicos y químicos, para determinar las condiciones y la carga contaminante. Los efluentes deben cumplir con los parámetros establecidos en la normativa ambiental.

Las aguas de efluentes minero-sanitarios y los vertidos descargados en las diferentes quebradas, desembocan finalmente en la quebrada del Fierro (receptora), misma que constituye el drenaje principal del área minera (ver Figura 59).



Figura 59. Quebrada del “El Fierro”, drenaje principal del área minera Nambija

En este sentido, estos drenajes pueden adquirir otra connotación y cobrar aún más importancia cuando, por causas exógenas, las aguas se salen de sus cauces normales (lluvia),

y/o son desviadas por laboreos mineros, conformándose en efluentes artificiales con la consecuente afectación al área circundante por donde atraviesan (ver Figura 60).



Figura 60. Drenaje secundario, afectado por efluente minero-sanitarios

Una parte de los relaves descargados, son aprovechados por unos mineros denominados en el sitio “canaleros” y se reprocesan aguas abajo de la quebrada de El Fierro receptora de los afluentes y efluentes naturales y artificiales del área minera; quienes las encauzan a un sistema de canalones dispuestos para recuperar el oro, la amalgama y el mercurio que se escapa de los procesos de concentración en las colas o relaves. Estos canalones se ubican en el sector La Soledad (ver Figuras 61 y 62); siendo los días lluviosos los más favorables para este laboreo ya que se incrementa el caudal con el consecuente arrastre de sedimentos.



Figura 61. Sector "La Soledad"



Figura 62. Canalones dispuestos en el sector "La Soledad", quebrada del Fierro

8.1.1. Parámetros físico – químicos *in situ*

En lo referente a las muestras de agua, los parámetros fisicoquímicos se midieron *in situ* en los puntos de muestreo definidos previamente, ver mapa con la ubicación de los puntos de muestreo (Figura 38).

Previo a la recogida de cada muestra de agua, se midieron “*in situ*” en cada punto de muestreo los parámetros fisicoquímicos: pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad, total de sólidos suspendidos (TDS) y salinidad (ver Tabla 17 y Figura 63).



Figura 63. Medición de los parámetros físico-químicos en drenajes

Tabla 17. Valores de parámetros físico-químicos medidos, *in situ*

Muestra	pH	OD (mg/L)	Conduc (μ S/cm)	TDS (mg/L)	Salinidad (0/00)	Observaciones
CN-01	6,30	17,65	3,01	0,90	0,00	pH. ligeramente ácido
CN-02	7,21	13,45	2,49	1259,00	1,30	pH. Neutro
CN-03	6,47	13,80	2,33	1179,00	1,22	pH. ligeramente ácido
CN-04	6,40	7,40	693,00	338,00	0,30	pH. ligeramente ácido
CS-05	6,53	9,63	4,20	2,19	2,24	pH. ligeramente ácido

CS-06	6,49	9,12	4,13	2,15	2,17	pH. ligeramente ácido
CS-07	7,43	9,18	4,81	2,52	2,68	pH. ligeramente alcalino
CS-08	8,67	37,00	2,75	1414,00	1,49	pH. Alcalino

Las alteraciones provocadas por las descargas de los efluentes mineros en los drenajes del área minera son visibles (ver Figura 64). En cuanto a la calidad de las muestras de agua, se observa una alteración en los parámetros de pH, OD (oxígeno disuelto) y TDS (sólidos disueltos totales) debido al vertido de aguas contaminadas por la minería aurífera. En el caso de las muestras CN-01, CN-03, CN-04, CS-05 y CS-06, el pH del agua es ligeramente ácido. La muestra CN-02 tiene un pH neutro. La muestra CS-07 es ligeramente alcalina y la muestra CS-08 es alcalina. Según la legislación ecuatoriana establecida en la Tabla 9 del TULSMA (Ministerio del Ambiente, 2015), el pH de todas las muestras se encuentra dentro de los límites permisibles (6 a 9) para la descarga en cuerpos de agua dulce en Ecuador.



Figura 64. Afluente afectado por el vertimiento de residuos mineros

8.1.2. Resultados muestreo pre optimización

Los resultados del análisis de la calidad de los efluentes se comparan con los parámetros establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana (MAE-TULSMA, 2015), que determina los límites máximos permitidos. La Tabla 15 presenta los resultados de los análisis de metales pesados (Cu, Zn, Fe, Pb, As y Hg), para las muestras tomadas en los drenajes en contacto con residuos mineros, para definir su carga contaminante previo a la intervención. En el Condominio minero Norte: La muestra CN-01 se toma en un drenaje cercano a una planta de beneficio “Los chilenos”, las muestras CN-02, CN-03 se toman en efluentes mineros; y, la CN-04 es tomada en la quebrada de Fierro (drenaje principal del área minera). En tanto que, en el Condominio minero Sur: la muestra CS-05 se toma en el drenaje principal receptor (quebrada del Fierro), la muestra CS-06, se toma en un drenaje cercano a una planta de beneficio mineral MiningAndos S.A., para determinar su grado de afectación, la muestra CS-07, se toma en un efluente minero; y, la muestra CS-08, se la toma en un drenaje secundario. Estas muestras se colectaron el día 6 de febrero del 2020. El contenido de metales pesados se detalla en la Tabla 18.

Tabla 18. Resultados de los análisis de metales pesados de las muestras base de agua

Muestra	Arsénico mg/l	Plomo mg/l	Cobre mg/l	Zinc mg/l	Hierro mg/l	Mercurio mg/l
CN-01	< LDD	0,06	< LDD	0,19	12,32	< LDD
CN-02	< LDD	0,10	< LDD	< LDD	8,40	< LDD
CN-03	< LDD	0,11	< LDD	< LDD	14,09	< LDD
CN-04	< LDD	0,05	< LDD	0,13	11,25	< LDD
CS-05	< LDD	0,03	< LDD	0,22	10,41	< LDD
CS-06	< LDD	0,06	< LDD	0,11	12,33	< LDD
CS-07	< LDD	0,09	< LDD	< LDD	10,74	< LDD
CS-08	< LDD	0,17	< LDD	< LDD	11,17	< LDD
TULSMA	0,05	0,001	0,005	<0,005	0,30	0,0002
LDD	0,005	0,005	0,4	0,1	0,4	0,005

Límite máximo permisible Tabla 2 Anexo 1. Acuerdo ministerial 097 - A. TULSMA

LDD: Límite de detección del equipo

8.1.3. Resultados muestreo post optimización

La Tabla 19 presenta los resultados de los análisis de metales pesados (Cu, Zn, Fe, Pb, As y Hg), para las muestras tomadas en los drenajes en contacto con los efluentes y residuos mineros, posterior a la intervención. Al parecer las muestras con mayor carga contaminante en el Condominio minero Norte parecen ser las muestras CN-02, CN-03 (efluentes mineros); y, la muestra CN-04 tomada en el drenaje principal del área minera. En tanto que, en el Condominio minero Sur: la muestra CS-06, se toma en el drenaje cercano a una planta de beneficio MiningAndos S.A. donde se realizaron las pruebas y ensayos, para determinar su cambio y/o grado de afectación, la muestra CS-07 (efluente minero). Estas muestras se colectaron el día 20 de mayo del 2021, coincidentes con las pruebas de amalgamación que se realizaron en los molinos chilenos.

Tabla 19. Resultados de análisis de metales pesados en muestreo de agua post intervención

Muestra	Arsénico mg/l	Plomo mg/l	Cobre mg/l	Zinc mg/l	Hierro mg/l	Mercurio mg/l
CN-01	< LDD	0,04	< LDD	0,11	10,42	< LDD
CN-02	< LDD	0,12	< LDD	< LDD	7,69	< LDD
CN-03	< LDD	0,09	< LDD	0,08	11,21	< LDD
CN-04	< LDD	0,03	< LDD	0,10	9,27	< LDD
CS-05	< LDD	0,01	< LDD	0,25	8,31	< LDD
CS-06	< LDD	0,04	< LDD	0,14	11,18	< LDD
CS-07	< LDD	0,07	< LDD	0,09	8,72	< LDD
CS-08	< LDD	0,21	< LDD	6,84	10,03	< LDD
TULSMA	0,05	0,001	0,005	<0,005	0,30	0,0002
LDD	0,005	0,005	0,4	0,1	0,4	0,005

Límite máximo permisible Tabla 2 Anexo 1. Acuerdo ministerial 097 - A. TULSMA

LDD: Límite de detección del equipo

Los efluentes mineros en el área minera de Nambija son una fuente significativa de carga contaminante, esto se puede observar en las Figuras 59 y 60. Sin embargo, los valores de plomo,

cobre, zinc, hierro y mercurio no serían válidos debido a que el límite de detección del equipo utilizado es superior a lo que indica la legislación ecuatoriana.

Existen varias limitaciones que podrían haber afectado los resultados de los análisis de calidad de los drenajes y efluentes en el área minera de Nambija. Estas incluyen las fluctuaciones y flujos de agua, la variabilidad en las condiciones climáticas (muestreo en época lluviosa correspondiente a los meses de diciembre a marzo) y la dilución debido a la mezcla de aguas marginales, aguas residuales y relaves mineros que forman vertientes artificiales.

Dado que los resultados de plomo, zinc y hierro superan los límites permitidos por la normativa, se recomienda tomar medidas para reducir la carga contaminante de los efluentes antes de su descarga, esto puede incluir el tratamiento de los efluentes antes de su descarga, la implementación de sistemas de gestión ambiental y la adopción de prácticas más sostenibles en los procesos mineros como medida de mitigación.

Sería interesante obtener resultados para definir los contenidos de arsénico y mercurio, ya que se sabe que existe contaminación por mercurio utilizado en los procesos de molienda-amalgamación para la concentración y extracción de oro en las plantas de beneficio dentro del área minera. En el futuro, se podría buscar la estrategia y/o alternativa para comprobar su aporte y carga contaminante utilizando equipos de análisis más sensibles, como la ICP-AES (Espectroscopia de Emisión Atómica con Plasma Acoplado Inductivamente) o la ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente).

Es importante tomar medidas para reducir la carga contaminante en los efluentes mineros del área minera de Nambija y buscar alternativas más sostenibles en la industria minera para proteger el medio ambiente y la salud de la comunidad afectada. Además, es necesario cuantificar las concentraciones de metales pesados en los efluentes para evaluar el impacto ambiental y tomar medidas adecuadas, pese a las limitaciones debido a factores como la disponibilidad de recursos y la complejidad de los análisis.



**JV
METALS**

LABORATORIO QUÍMICO - METALÚRGICO
lab.jvmetals@gmail.com

Nombre: Ing. Richard González

Fecha de recepc: 10/02/2020 14:31

Fecha de entrega: 11/02/2020 9:13

Recp. N°

5026

RESULTADO DE ENSAYO

Detalle de muestra	"NAMBLA" Cod. 316		
Código Lab	5843		
Oro (g/ton)	7,34		
Plata (g/ton)	1,31		



LABORATORIO QUÍMICO METALÚRGICO
JV METALS
REPORTADO

A Vía principal, frente a la empresa eléctrica.
V EL PACHE - PORTOVELO - ELORO

e labjvmetal s@gmail.com



Diego Mora
PROPIETARIO
Ing José Bueno Malla
JEFE DE LABORATORIO

OFICINA: 2948 803

"0969 537 170



UNIVERSIDAD TECNICA PARTICULAR DE LOJA

LABORATORIO CETTIA-UTPL

Informe de Ensayo

FECHA DEL INFORME: 2020-02-14
INFORME No. 1032
SOLICITUD DE ANALISIS: 2614

INFORMACIÓN DEL CLIENTE:

NOMBRE: Ing. Richard González
DIRECCIÓN: San Rafael
TELÉFONO: 2577678 FAX: n/e E-mail: rsgv1969@gmail.com

DATOS GENERALES DE LAS MUESTRAS:

DESCRIPCIÓN:

Muestra1 Agua Efuyente Minero CN - A-01
Muestra2 Agua Efuyente Minero CN - A-02
Muestra3 Agua Efuyente Minero CN - A-03
Muestra4 Agua Efuyente Minero CN - A-04
Muestra5 Agua Efuyente Minero CS - A-05
Muestra6 Agua Efuyente Minero CS - A-06
Muestra7 Agua Efuyente Minero CS - A-07
Muestra8 Agua Efuyente Minero CS - A-08

CONDICIÓN: La muestra llega en botella plástica.
FECHA DE RECEPCIÓN: 2020-02-07

INFORMACIÓN GENERAL:

El informe de ensayo no se puede reproducir parcialmente, excepto en su totalidad con la aprobación escrita del laboratorio.

Los resultados representan exclusivamente la muestra (s) analizada (s).

U: Incertidumbre expandida con un 95% de confianza

UPC: Unidad formadora de colonias

HG: Horno de grafito

GH: Generador de hidruros

- Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes. Recurso Agua. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

INEN 1108 Agua Potable. Requisitos

n/a: No aplica.

n/d: No disponible.

n/e: No específica.

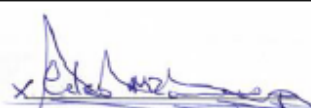
+/-: No desarrollo de colonias. Ausencia

RESULTADOS:

DETERMINACIÓN	FECHA DE ANALISIS		MÉTODO	UNIDAD	RESULTADOS	U	LDD	REQUISITOS DEL PRODUCTO		FUENTE DE LOS REQUISITOS O REFERENCIA
	INICIO	FIN						Min.	Max.	
Muestra 01										
Arsénico	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. HG	mg/L	0.06	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Llama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Llama	mg/L	0.19	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Llama	mg/L	12.32	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 02										
Arsénico	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. HG	mg/L	0.10	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Llama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Llama	mg/L	<LDD	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Llama	mg/L	8.40	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-

DETERMINACIÓN	FECHA DE ANALISIS		MÉTODO	UNIDAD	RESULTADOS	U	LDD	REQUISITOS DEL PRODUCTO		FUENTE DE LOS REQUISITOS O REFERENCIA
	INICIO	FIN						Mín.	Max.	
Muestra 03										
Arsénico	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. HG	mg/L	0.11	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	14.09	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 04										
Arsénico	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. HG	mg/L	0.05	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	0.13	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	11.25	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 05										
Arsénico	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. HG	mg/L	0.03	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	0.22	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	10.41	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 06										
Arsénico	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. HG	mg/L	0.06	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	0.11	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	12.33	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 07										
Arsénico	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. HG	mg/L	0.09	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	10.74	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 08										
Arsénico	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. HG	mg/L	0.17	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. Liama	mg/L	11.17	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2020-02-07	2020-02-14	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-


Ing. William Jacome
LÍDER DE CALIDAD


Ing. Miguel Guaman
LÍDER TÉCNICO (E)

FIN DEL INFORME





UNIVERSIDAD TECNICA PARTICULAR DE LOJA

LABORATORIO CETTIA-UTPL

Informe de Ensayo

FECHA DEL INFORME:	2021-05-28
INFORME No.	1108
SOLICITUD DE ANALISIS:	3417

INFORMACIÓN DEL CLIENTE:

NOMBRE:	Ing. Richard González
DIRECCIÓN:	San Rafael
TELÉFONO:	2577678
FAX:	n/e
E-mail:	rsgv1969@gmail.com

DATOS GENERALES DE LAS MUESTRAS:

DESCRIPCIÓN:	Muestra1 Agua Efluente Minero CN - A-01 Muestra2 Agua Efluente Minero CN - A-02 Muestra3 Agua Efluente Minero CN - A-03 Muestra4 Agua Efluente Minero CN - A-04 Muestra5 Agua Efluente Minero CS - A-05 Muestra6 Agua Efluente Minero CS - A-06 Muestra7 Agua Efluente Minero CS - A-07 Muestra8 Agua Efluente Minero CS - A-08
CONDICIÓN:	La muestra llega en botella plástica.
FECHA DE RECEPCIÓN:	2021-05-21

INFORMACIÓN GENERAL:

El Informe de ensayo no se puede reproducir parcialmente, excepto en su totalidad con la aprobación escrita del laboratorio.

Los resultados representan exclusivamente la muestra (s) analizada (s).

U: Incertidumbre expandida con un 95% de confianza

UFC: Unidad formadora de colonias

HG: Horno de grafito

GH: Generador de hidruros

- Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes. Recurso Agua. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

INEN 1105 Agua Potable. Requisitos

n/a: No aplica.

n/d: No disponible.

n/e: No específico.

+ 1: No desarrollo de colonias. Ausencia

RESULTADOS:

DETERMINACIÓN	FECHA DE ANALISIS		MÉTODO	UNIDAD	RESULTADOS	U	LDD	REQUISITOS DEL PRODUCTO		FUENTE DE LOS REQUISITOS O REFERENCIA
	INICIO	FIN						Mín.	Máx.	
Muestra 01										
Arsénico	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. HG	mg/L	0.04	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Llama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Llama	mg/L	0.11	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Llama	mg/L	10.42	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 02										
Arsénico	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. HG	mg/L	0.12	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Llama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Llama	mg/L	<LDD	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Llama	mg/L	7.69	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-

DETERMINACIÓN	FECHA DE ANALISIS		MÉTODO	UNIDAD	RESULTADOS	U	LDD	REQUISITO DEL PRODUCTO		FUENTE DE LOS REQUISITOS O REFERENCIA
	INICIO	FIN						Mín.	Max.	
Muestra 03										
Arsénico	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. HG	mg/L	0.09	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	0.08	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	11.21	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 04										
Arsénico	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. HG	mg/L	0.03	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	0.10	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	9.27	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 05										
Arsénico	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. HG	mg/L	0.01	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	0.25	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	8.31	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 06										
Arsénico	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. HG	mg/L	0.04	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	0.14	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	11.18	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 07										
Arsénico	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. HG	mg/L	0.07	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	0.09	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	8.72	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-
Muestra 08										
Arsénico	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.1	-
Plomo	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. HG	mg/L	0.21	n/d	0.005	-	0.2	-
Cobre	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	<LDD	n/d	0.4	-	1	-
Zinc	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	6.84	n/d	0.1	-	5	-
Hierro	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. Liama	mg/L	10.03	n/d	0.4	-	10	-
Mercurio	2021-05-24	2021-05-28	Absorción atómica. GH	mg/L	<LDD	n/d	0.005	-	0.005	-


 Ing. Miguel Jacome
 LÍDER DE CALIDAD


 Ing. Miguel Guaman
 LÍDER TÉCNICO (E)

FIN DEL INFORME



Article

Investigation of Gold Recovery and Mercury Losses in Whole Ore Amalgamation: Artisanal Gold Mining in Nambija, Ecuador

Richard González-Vásquez, María Jesús García-Martínez and David Bolonio



<https://doi.org/10.3390/min13111396>

Article

Investigation of Gold Recovery and Mercury Losses in Whole Ore Amalgamation: Artisanal Gold Mining in Nambija, Ecuador

Richard González-Vásquez, María Jesús García-Martínez  and David Bolonio 

Energy and Fuels Department, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, C. de Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, Spain; rgonzalezv@alumnos.upm.es (R.G.-V.); david.bolonio@upm.es (D.B.)

* Correspondence: mj.garcia@upm.es

Abstract: Mercury is a highly toxic pollutant that can negatively affect human health and the environment; informal mining is one of the main sources of anthropogenic mercury release due to the separation or concentration by amalgamation that is still used to recover gold directly from ore. In the Nambija mining district, there is still informal mining based on practically no technical knowledge, which uses amalgamation as a processing technique for gold recovery. The production tasks that directly affect the handling of mercury during the in situ grinding–amalgamation process are monitored here. Experimental grinding tests were initially carried out in a “chancha” bar mill for a range of ore sizes and as a function of time; then, experimental tests were performed at the macro-level on grinding cycles in Chilean mills. Considering the characteristics of the ore mineral and the operation of the Chilean mills, it was determined that it is possible to reduce the Hg input to mill by up to 20% (at source). Experimental grinding–amalgamation tests were carried out at different times along with a grain size analysis of the ore; the recovery establishes the grinding time and the fraction in which the gold is extracted in a greater proportion, which affects the control of the amalgamation times. The mercury dosage used by the miners in the amalgamation process should be reduced, considering trials where there is better gold recovery and with the purpose of also reducing mercury losses; eventually, it is possible to jointly achieve an increase in gold recovery.

Keywords: artisanal mining; mercury; grinding; amalgamation; grain size tests; optimization; Nambija mining district



Citation: González-Vásquez, R.; García-Martínez, M.J.; Bolonio, D. Investigation of Gold Recovery and Mercury Losses in Whole Ore Amalgamation: Artisanal Gold Mining in Nambija, Ecuador. *Minerals* **2023**, *13*, 1396. <https://doi.org/10.3390/min13111396>

Academic Editor: Carlos Hoffmann Sampaio

Received: 26 July 2023

Revised: 23 October 2023

Accepted: 23 October 2023

Published: 31 October 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Artisanal gold mining is an important extractive activity in several countries of the world [1], where it is considered as important an economic sector as large-scale mining [2]. It is estimated that more than 10 million people, including women and children, are directly involved in this activity. In addition, it produces about 10%–15% of the world's total gold (Au) [3,4], making it one of the most important sources of metallic minerals on the planet [5]. Studies have shown that this activity is economically important for rural communities and reducing poverty [6]. The informal mining practice of amalgamation, as determined by Ecuadorian legislation [7,8], is the predominant method of extracting Au [9]. Amalgamation is one of the oldest processes used in gold recovery [10]. Mercury is a nonessential and toxic element that occurs in nature in three forms: inorganic compounds, organic compounds, and elemental mercury, the latter being used in artisanal mining [11,12]. During the last decade, an increase in the use of Hg in informal mining has been reported [13].

In order to make artisanal and small-scale mining mercury-free, many measures must be implemented, which must be adapted to the characteristics of the ore [14]. This, added to inadequate working conditions, the use of deficient and polluting technologies [15], and the application of rudimentary procedures [16], has caused not only a decrease in mineral

recovery, but also an increase in the use of Hg in mineral processing, mainly in informal mining activities [17]. This is of concern in Ecuador, where, despite the use of Hg having been banned since 2015, it continues to be released into the environment via the process of gold extraction in artisanal mining, harming human health and ecosystems [18,19]. In certain mining operations, some progress has been made on the ground as Hg, which was previously extracted in the open air, can now be recovered using simple and economical retorts [7]. Retorts are devices that capture Hg vapor before it is emitted to the atmosphere during amalgamation and decomposition [20]. Although this process is of great help to recover Hg, losses during amalgamation and in tailings in more than 70 artisanal mining countries amount to 2000 t/a of Hg [21,22].

However, the negative effects of informal mining are not always attributable to poor technical practices, but sometimes to the socioeconomic circumstances of the miners [23]. Therefore, a very important aspect that even large-scale mining companies take into consideration is the degree of mineral liberation. Mineral liberation is one of the most important objectives of the grinding process [24]. Inefficient grinding can result in poor gold liberation. When mercury is added to the grinding circuit, mercury is pulverized (floured), losing its capacity to amalgamate free particles of gold. Most artisanal miners do not take this into consideration and add mercury into ball mills for whole-ore amalgamation, making this the most significant source of mercury pollution globally.

The Nambija mining district is, together with Portovelo and Ponce Enriquez, one of the three areas where subway gold mining is centered [25]. Most of the Au is extracted by the amalgamation method [26]. Currently, several Au deposits continue to be exploited by informal mining operations [27].

The method primarily used for gold extraction in the mining area of Nambija is amalgamation. The equipment generally used are: (1) bar mills (amalgamation), or “chanchas”, that work in an open circuit and can process up to 55 kg of ore per grinding–amalgamation cycle (usually 2 h depending on the ore fed); and (2) Chilean mills or “trapiche” that work in an open circuit. The processing starts with the crushing of the ore up to ϕ 2 cm, then this is fed to the Chilean mills manually. At the beginning of the milling, 454 g (1 lb) of Hg is added, and it is fed 454 g of Hg/day until the completion of the milling cycle, which is generally 8 days. In some cases, the choices of mills, grinding times, and Hg feeding are made arbitrarily and/or depending on the miller’s experience.

The objective of this article is the reduction of Hg use and the consequent reduction of Hg losses in the amalgamation process as a mitigation measure to limit its use and consumption; it is clear that the ideal is to not use mercury at all, but while this happens, it should be used responsibly. However, it should be taken into consideration how inefficient and polluting the amalgamation process is and the senselessness of amalgamating all the ore in an open circuit, as well as the low mineral recovery (Au) even if grinding times are adjusted. In conclusion, more efficient and environmentally friendly alternatives for gold recovery should be sought and implemented.

The results of this research are viable and can have a positive impact on the reduction of mercury release in the mining area, so they could be replicated in other settlements where this type of mining is carried out.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The Nambija mining district is located in the southeastern region of Ecuador, 25 km from the city of Zamora, in the parish of San Carlos de las Minas on the western flank of the Nanguipa mountain range (Figure 1). It comprises the northern and southern condominiums of a 69-hectare mining concession legally granted by the Ecuadorian state. The terrain is rugged, with altitudes varying between 1500 and 2100 m above sea level. The climate is typical of the inter-Andean region, with temperatures ranging between 18 and 24 °C and annual rainfall between 200 and 300 mm. The main economic activity in Nambija is mining [28]. However, informal mining activities, a lack of technical guidance in

operations [27], and the rudimentary processes used for Au extraction [29] have resulted in large amounts of waste and tailings throughout the surrounding sector. Mining wastewater laden with a high content of heavy metals and the emission of mercury into the environment have altered the quality and physicochemical properties of the soil and water.

Nambija is geologically constituted by marine sedimentary formations of the Mesozoic age intruded by the Zamora batholith; it is considered a Skarn-type deposit. The gold-bearing mineral contains almost exclusively native gold with granulometries ranging between 60 and 120 mesh; it is mineralogically associated with quartz, is quite pure, and can reach a grade of 94%.

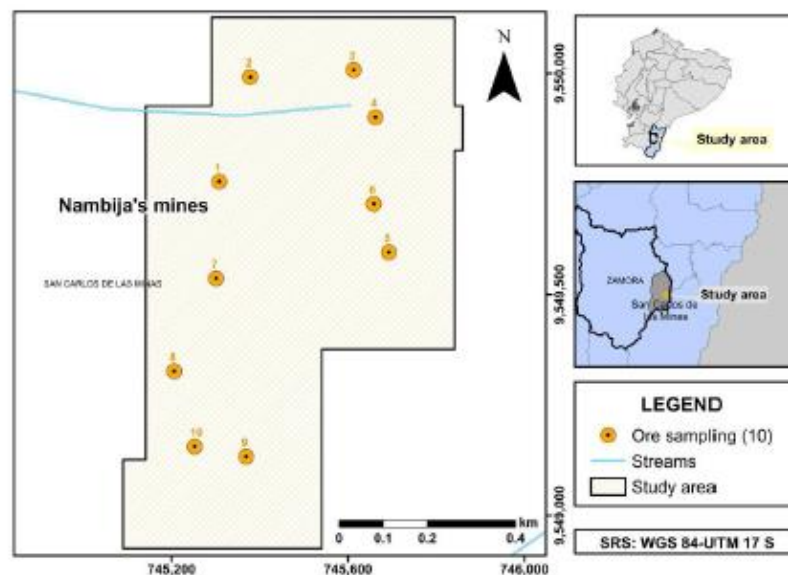


Figure 1. Location of the study area and location of the sampling sites in the mining district of Nambija.

2.2. Sampling and Data Analysis

Ten sampling points were established in the study area to collect ore (Figure 1). The ore sample consisted of 10 subsamples of approximately 45 kg each.

The objective of the sampling was to achieve homogeneity of the ore processed in the mining area. For the tests, sampling was carried out at 8 mining fronts and in 2 old rock dumps (ore with lower grades) that were being worked by the miners in the area at the time. A total of 450 kg of samples were collected. The subsamples collected at the mining faces, which were used to obtain the representative sample, were taken from the accumulated crushed mineral stock from the hoppers (stockpile). Likewise, the subsamples collected in the dumps were crushed until a fraction of $\phi \pm 1$ cm was obtained. The sampling method used was Chip Sampling, which is commonly used for ore-grade control in productive mines [30]. The representative sample was disaggregated, homogenized, and quartered before analysis, resulting in eight samples of 55 kg each (S#1, S#2, S#3, S#4, S#5, S#6, S#7, and S#8). The samples were analyzed at the Chemical Metallurgical Laboratory JV Metals, located in El Pache, Portovelo, Ecuador. The method used to determine the head grade (feet) of the mineral sample was the Fire Assay [31]. This method consists of melting the sample with reagents and fluxes to detect metals such as gold and silver. It is one of the most widely used techniques in Au prospecting worldwide [32–34].

2.3. Determination of the Adequate Grinding Mesh Size

The characterization of the degree of liberation of the mineral of interest as a function of particle size is a key variable [35] that helps to determine the adequate grinding size to obtain higher gold recovery [36]. The amalgamation tests were conducted in a 1.30 m long octagonal (metal) rod mill with a total capacity of 0.297 m³ and a speed of 70 rpm. This mill, commonly called a “chancha” or amalgamating cylinder because it is used to perform the amalgamation process, is a device that uses steel bars to reduce the size of the minerals [37]. It works by the impact and friction that occurs between the bars against the particles of the material to be fractionated. The standard and constant technical parameters during the tests to ensure the proper operation of the mill were a circulating load of 55 kg of sample, a grinding load of 120 kg of bars, a pulp solid-to-liquid ratio of 1/1, a mercury addition of 1 lb (454 g), and a bar of brown sugar. Brown sugar is an additive used to improve amalgam formation by keeping Hg coalescence, avoiding the formation of fine droplets. Once the amalgamation process was completed, the amalgam was separated from the pulp by washing. The adequate particle size was determined through the grinding/amalgamation process for samples S#1, S#2, S#3, S#4, and S#5. Samples S#1, S#2, S#3, and S#4 were subjected to 80, 100, 120, and 140 min of grinding, respectively. Subsequently, test 5 was replicated and subjected to the grinding time where the highest Au recovery of the first 4 tests was obtained (sample S#3), in order to validate the results. Next, 250 g samples were taken from the tailings after the mineral concentration of each grinding test to perform dry and wet particle size tests using the Chip Sampling method. This method consists of taking material from geometrically distributed points in the mineral mass, either linearly or forming a regular mesh in two dimensions [38]. The particle size curve was performed using the Gates-Gaudin-Schuhmann (G-G-S) distribution function, taking into account the total weight and the retained weight. This function describes the particle size distributions by comparing the values of the cumulative passing percentage with the mesh opening [39]. The mesh sizes used for the particle size curve were #10 (2000 µm), #18 (1000 µm), #35 (500 µm), #60 (250 µm), #120 (125 µm), #230 (63 µm), #325 (45 µm), and #400 (37 µm). The particle size distribution curve made it possible to visualize the homogeneous or heterogeneous tendency of the grain sizes (diameters) of the particles. Based on the results obtained in each test, the ore grade of each test was calculated. Finally, the head grade and tailings grade were balanced and analyzed. The valid head grade (grade of the ore coming from the mine and entering the plant) of the ore sample was 7.34 g Au/t.

2.4. Reducing Mercury Inputs

To determine the adequate mercury input, the amount of Hg used by the miners was taken as an initial reference. Thus, samples S#3 and S#5 (samples with better Au recovery) were fed with 454 g of mercury (100%), while samples S#6 and S#7 were tested to reduce the Hg fed and received 340.5 g (75%) and 227 g (50%), respectively. The standard operating conditions considered in the previous section were kept constant, with a grinding time of 120 min (more efficient) and the mercury input as a variable parameter. Then, the amount of Au recovered in the process and the Au present in the tailings were determined in order to establish the efficiency and to reduce the mercury input for the mineral beneficiation of the mining area. Finally, S#8 was tested with the input that gave the best results to verify and validate the results obtained.

2.5. Monitoring the Efficiency of the Gold Amalgamation

As a complementary step, and based on results obtained from previous tests on the amalgamation mill, a macro-level follow-up of the grinding-amalgamation operations of the MiningAndos S.A. mineral beneficiation plant, located in the Mapasingue sector within the Condominio Minero Sur de Nambija, was carried out. The plant consists of two sections, each with two open-circuit Chilean-type wheel mills. Initially, two mills were built to process the ore from the sector, which was of high grade at the time. However, due to the change in mining conditions, the rise in the price of gold, and the variation in grade,

it was decided to double production by building two more mills to compensate and work lower-grade ores. A Chilean mill consists of a main shaft with arms that move the wheels in circles to grind the ore. They apply three effects in their operation: friction, pressure, and shear. Initially, an 8-day grinding cycle was monitored to observe the processes and phases of amalgam recovery and the methods and techniques used for mercury recovery. In addition, the feeding of material (ore) to the mills is performed arbitrarily, when the mills are unloaded and/or relying on the expertise of the miller. Miners typically add 454 g of mercury to each mill at the start of the operation and continue to add 454 g of Hg/day until the grinding cycle is complete. Subsequently, tests 2, 3, and 4 were conducted, based on the initial standard procedure and reducing the daily mercury feed in order. The constant parameters considered in these tests were: ore feed, constant water flow to the circuit (solid–liquid ratio), initial Hg input, and daily mercury feed. Amalgam and mercury recovery processes and techniques were identified to optimize and/or reduce losses. The main procedures identified for the handling and recovery of mercury were concentration after the grinding–amalgamation process; during the burning of amalgam in retorts; and in tailings (panning) and sedimentation tanks.

3. Results and Discussion

3.1. Adequate Grinding Mesh

The grinding size reduction ratio is determined empirically, evaluating at what size a higher percentage of gold recovery is obtained [40]. The results obtained in the particle size tests determine the adequate grinding mesh based on the calculated standard deviations (see Table 1).

Table 1. Results of the particle size distribution tests.

Test	Grinding Time (min)	d80 (µm)
S#1	80	465
S#2	100	240
S#3	120	180
S#4	140	120
S#5	120	180

Tables S1–S4 (see the Supplementary Materials) show the results of the grain size analysis with grinding times of 80, 100, 120, and 140 min for samples S#1, S#2, S#3, and S#4, respectively. The particle size distribution curves resulting from the four tests (80, 100, 120, and 140 min) are defined in a semi-logarithmic log-normal graph, where the x-axis shows the particle size in µm and the y-axis shows the accumulated % of mass retained in each screen size (%Ac(+)); see Figure 2.

The ore sample with a grinding time of 120 min (S#3) has 83.43% of the mass retained in 400 mesh (37 µm) and 99.90% passing 10 mesh (2000 µm). The most adequate gold liberation to allow mercury trapping in the amalgamation process seems to be around 120 mesh (125 µm), whereas the % mass accumulated at this grain size is 62.18%, (Table S3 and Figure 2). The grain size analysis resulting from this test indicates that 80% of the particles (d80) are below 180 µm. With this milling time, a higher proportion of gold is recovered; as can be seen, the yield in this test was 54.25%.

A simple control test of the amalgamation times and the proportion of mercury used can also reduce losses, together with an increase in gold recovery [41].

For verification and validation of the results obtained, test #5 was carried out, reproducing the test with the parameters with which the best performance was obtained (test #3), with the same standard operating conditions. The results of the verification test showed great similarity to those obtained in test #3.

Once the grinding mesh was defined for the Nambija ore, a metallurgical balance test was performed to determine the gold recovery for each test.

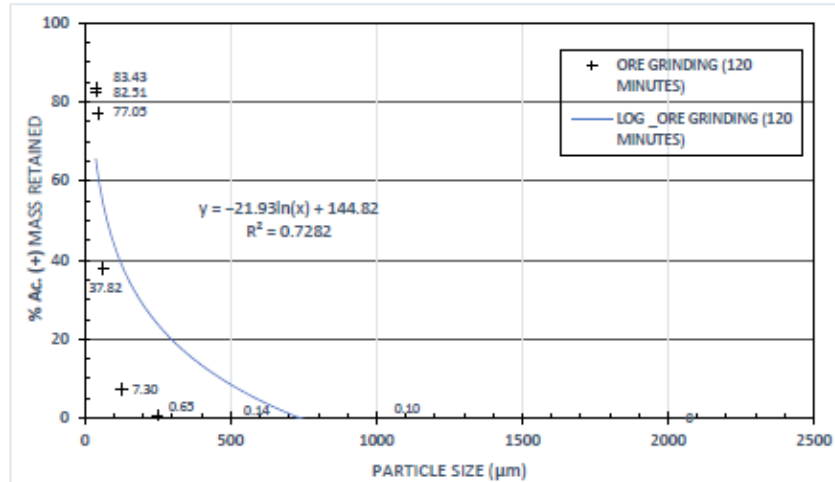


Figure 2. Grain size analysis of Nambija ore grinding for 120 min (mineral liberation).

Table 2 shows the results of the tests and the balance of the grinding–amalgamation operation for each test.

Table 2. Gold recovery by amalgamation as a function of grinding time.

Test	Grinding Time (min)	Gold Recovered (g)	Gold Recovered (g/t)	Au Lost with Tailings (g/t)	Gold Extracted (%)
S#1	80	0.067	1.22	6.12	16.60
S#2	100	0.153	2.78	4.56	37.90
S#3	120	0.219	3.98	3.36	54.25
S#4	140	0.124	2.25	5.09	30.72
S#5	120	0.221	4.02	3.32	54.74

This determines that there is a mineral particle size that liberates gold in a greater proportion when the grinding time is 120 min (tests S#3 and S#5); with respect to the mineral grain size $d_{80} = 180 \mu\text{m}$, the average yield for tests S#3 and S#5 is 54.49%.

In conclusion, the adequate grain size for improving gold amalgamation is 120 mesh, which corresponds to an accumulated passing $Ac(-)$ % of 62.12% (average of S#3 and S#5 tests), with a 120-min grinding time (Tables S3 and S5).

3.2. Mercury Dosing in the Rod Mill

It is necessary to determine the ratio of mercury/mineral to be used in an adequate amalgamation time to achieve the least possible contamination [11]. In relation to mercury input, a balance was established to estimate losses; this consisted of measuring (weighing) the amount of mercury introduced in the amalgamation process [42]; two additional tests were conducted to test reducing the amount of mercury used by the miners (S#6 and S#7). In tests S#3 and S#5, where 454 g (100%) of Hg was fed, the % Au extracted achieved was 54.74%; in test S#6, where 340.5 g (−25%) of Hg was added, this increased to 56.48%; in the case of test S#7, in which 227 g (−50%) of Hg was added, the yield dropped to 45.33%. Undoubtedly, it is possible to achieve better performance and reduce the amount of Hg added by the miners by up to 25%. To corroborate the results obtained, a verification test (S#8) was performed using the input of the most successful test (S#6), feeding 340.5 g of

Hg to the cycle. The results in this test showed a % of Au extracted of 57.47%, which is consistent with that obtained in test S#6 (see Table 3).

Table 3. Mercury (Hg) input and performance.

Test	Grinding Time (min)	Hg Input (g)	Au Recovered (g)	Gold Grade (g/t)	Lost with Tailings (g/t)	Efficiency (%)
S#3	120	454.0	0.219	3.98	3.36	54.25
S#5	120	454.0	0.221	4.02	3.32	54.74
S#6	120	340.5	0.228	4.15	3.19	56.48
S#7	120	227.0	0.183	3.33	4.01	45.33
S#8	120	340.5	0.232	4.22	3.12	57.47

In principle, the results of tests S#6 and S#8 define the mercury (Hg) input that allows for achieving a better recovery of gold (Au) from the ore; to process the ore in the mill/amalgamator, 340.5 g of Hg must be fed to each grinding cycle (see Table 2).

3.3. Monitoring and Optimization of the Use of Mercury in the Plant

In relation to the amalgamation grinding process at the beneficiation plant (Miningandoss SA), the following parameters were considered: (1) the grinding time required for processing, (2) the volume of ore processed, and (3) the total mercury fed and recovered at the end of each operation in the two sections. Initially, the amount of mercury added by the miners for ore beneficiation in Chilean mills (test 1) was taken as a base; in the same way, it was tested to replicate three grinding cycles (tests 2, 3, and 4), reducing the mercury addition by 20%.

Once the grinding–amalgamation cycle is finished, miners remove the amalgam and excess mercury from the Chilean mills (see Figure 3).



Figure 3. Settlement of the grinding–amalgamation cycle: (a) mineral concentration (mill washing), (b) traditional amalgam and mercury recovery from tailings.

In order to improve the management of mining activity, and with the objective of reducing mercury losses while trying to improve gold recovery, actions were implemented. The strategy was to introduce measures to reduce mercury use without significant changes in infrastructure and then introduce new equipment to concentrate gold [43]. The following complementary actions were carried out: (1) A change in the discharge grain size in the mills, due to the use of an inadequate mesh (#60 mesh); due to the fact that the grain size with which the best gold recovery is obtained for the ore in the sector is the #120 mesh, a #100 mesh was used to avoid clogging problems. (2) The ore feed to the mill was regularized every 20 min in order to avoid overgrinding (excess of fine mineral), with consequent pulverization of the Hg. In the tests, the water flow was kept constant.

The results obtained show that it is possible to reduce the mercury addition to a Chilean mill by up to 20.00%, which is positive since it allows for reducing mercury consumption

at the source. Likewise, it is evident that, with the implemented actions, the amount of mercury recovered at the end of the concentration process increased from 24.20% to 35.63% (test 2) in Section 1 and from 29.08% (test 1) to 36.48% (test 3) in Section 2 (see Table 4).

Table 4. Mercury recovery from the grinding–amalgamation process.

Section 1				
Test	Grinding Time (h)	Ore Processed (Tn)	Hg Fed (g)	Hg Recovered (%)
1	157	226	3372.97	24.20
2	160	250	2800.20	35.63
3	154	250	2800.09	35.11
4	157	250	2800.05	33.61
Section 2				
1	150	215	3455.38	29.08
2	161	250	2800.15	34.81
3	156	250	2800.07	36.48
4	153	250	2800.13	35.52

Finally, after reducing the mercury addition and consequent loss, the gold extraction was not affected. This is consistent with what was observed in the bar mill tests. This means an economic benefit for miners, considering that 1 lb (454 g) of Hg in the mining area costs around USD 40.

3.3.1. Mercury Distillation in Retort

Mercury distillation using a retort to condense the Hg vapor is widely recommended to recover mercury from amalgam and thus avoid its dispersion into the environment. That said, the burning time in the retort used by the miners to evaporate mercury from the amalgam is 45 min (Test 1).

To improve the process, we tried increasing the retort burn time by 25% (tests 2, 3, and 4); consequently, the tests were followed with a retort burning time of 60 min.

Table 5 shows the results of the percentage of mercury recovered from the amalgam and the Hg lost and/or not recovered at the end of the distillation process. The variations in amalgam weights and mercury content are dependent on the amount and type of gold amalgamated (coarse or fine gold).

Table 5. Mercury recovered from the amalgam.

Section 1				
Test	Amalgam (g)	Au Recovered (%)	Hg Recovered (%)	Hg Lost (%)
1	1342.36	21.57	88.03	11.97
2	1411.02	28.91	89.23	10.77
3	1274.37	27.85	93.98	6.02
4	1357.94	29.34	93.09	6.91
Section 2				
1	1257.21	32.05	93.65	6.35
2	1309.5	29.61	97.5	2.5
3	1475.64	29.59	97.92	2.08
4	1339.24	31.78	97.34	2.66

The results obtained show that there was an increase in the amount of mercury recovered when the burning time in the retort was increased to 60 min; the percentage of unrecovered mercury was reduced from 11.97% (test 1) to 6.02% (test 3) in the best case in Section 1 and from 6.35% (test 1) to 2.08% (test 3) in the best case in Section 2. The

increase in mercury recovery with retorts during its decomposition has a positive impact on the environment and, mainly, on the health of the operators and surrounding people. In addition, the mercury recovered can also be recycled, saving money for miners.

3.3.2. Recovery of Gold from the Amalgamation and Sedimentation Boxes

In addition, the amalgam and mercury present in the stored tailings from the primary concentration process are recovered in the sluices and the amalgamation tailings in the sedimentation box; these processes are carried out to recover the gold that escapes from the amalgamation process and leaves the mill in the tailings.

To recover gold from the tailings collected in the sluices and sedimentation boxes, miners rework the tailings in a trough (Figure 4) and then concentrate it with pan or batea. The panning is one of the processes used to obtain the gold–mercury amalgam. It consists of separating the amalgam from the finer material by making circular movements in a convex pot-shaped container [44].

The concentrates retained in fiberglass and/or carpets on the sluices are washed off in a batea to be panned, concentrating the gold even more. This is performed by miners with a washing frequency of every 3 h for the first two carpets and every 8 h for all the carpets (test 1).

Test 1 was analyzed as performed by the miners; likewise, in order to improve recovery and improve this process, the panning time was readjusted to 0.5 h for the first two carpets and every 6 h for all the carpets, regularizing the panning (test 2), with the objective of concentrating more tailings. The implemented measure evidenced, as foreseen, an increase in the volume of accumulated sand with respect to test 1; similarly, it was performed with other tests (3 and 4) under the same conditions. However, for the recovery we tested reworking the accumulated tailings in a generic concentrator (a mini centrifugal concentrator), where the concentrate was panned to obtain the amalgam and mercury. This was evident from the increase in the recovery of gold and mercury from the panning tailings in the two sections (see Table 6).

Table 6. Recovery of amalgam and mercury product from sluices and sedimentation tanks, sections 1 and 2.

Section 1				
Test	Gold Recovery (Sluice) (g)	Hg Recovery (Sluice) (%)	Gold Recovery (Sand Tank) (g)	Hg Recovery (Sand Tank) (%)
1	8.76	10.08	3.17	8.74
2	10.28	12.78	4.53	10.2
3	14.51	11.95	5.21	10.59
4	13.96	13.01	5.38	10.75
Section 2				
1	6.41	10.46	4.09	8.53
2	8.59	15.75	5.26	9.13
3	9.16	12.83	6.07	8.57
4	11.87	13.22	7.52	12.18

Likewise, regarding the treatment and recovery of gold and mercury from the primary concentration tailings (each section has a storage tank), we proceeded in a similar way as with the tailings from the amalgamation tailings. The tailing storage tanks are used as a last alternative to recover the gold not trapped by the mercury. As in the previous case, these tailings were processed in the mini centrifugal concentrator, and the concentrate was panned.

Similarly, the results are consistent with what was observed when processing the tailings from the panning, since there was an increase in the recovery of gold (already amalgamated) and mercury when processing the sand from the sedimentation tanks,

ranging from 8.74% recovered in test 1 to 10.75% in the best case (test 4) in Section 1 and from 8.53% (test 1) to 12.18% in the best case (test 4) in Section 2. This increase can be attributed to the use of the centrifugal concentrator that replaces the manual tilling of the tailings in a chute.

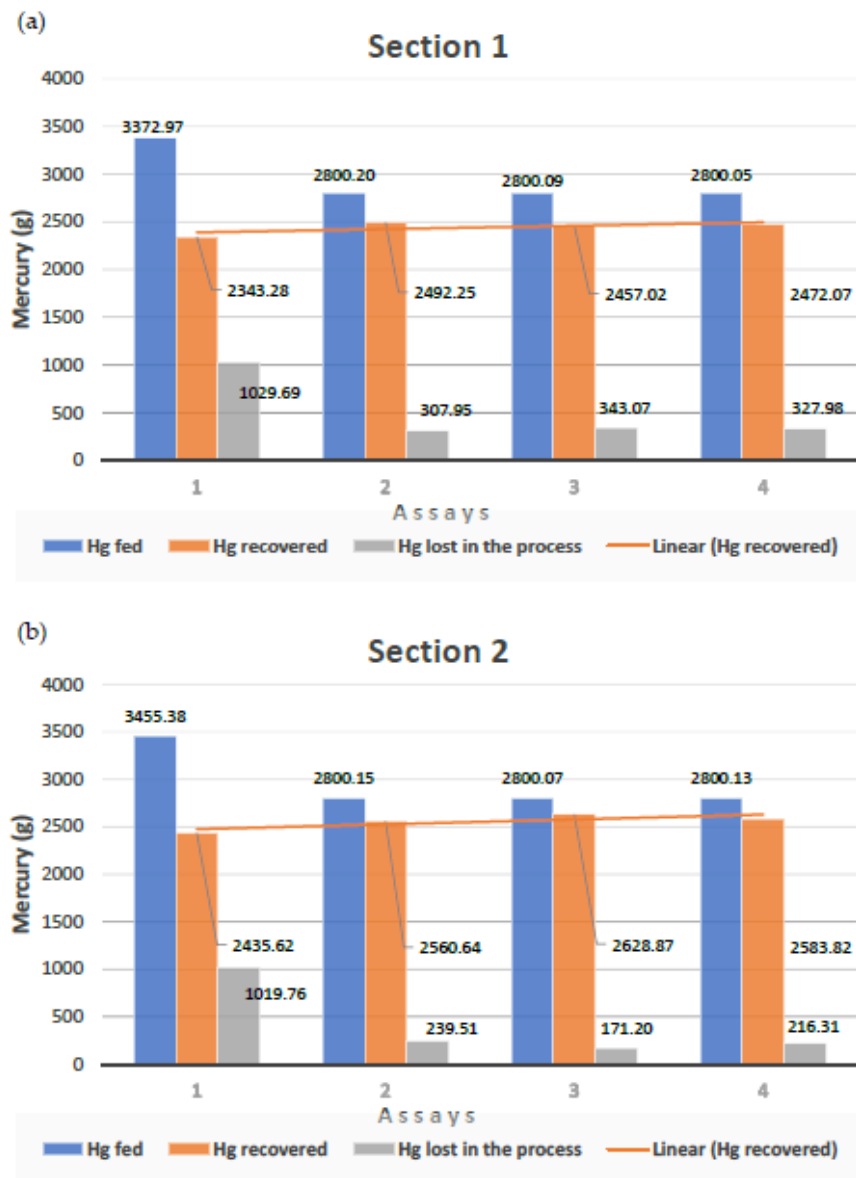


Figure 4. Mercury balances for tests 1, 2, 3, and 4: (a) Section 1; (b) Section 2.

The balances made to the grinding, amalgamation, and concentration cycle in tests 2, 3, and 4 determine a significant increase in amalgam and mercury recovered; it is evident

that mercury losses are reduced with respect to the initial tests in each section, which has a positive impact on the optimization of concentration and mineral use.

In general, Table 7 summarizes the total percentage of mercury recovered and lost; mercury losses were reduced from the initial test (test 1) in the two sections.

Table 7. Balance of recovery and mercury losses of the grinding-amalgamation tests.

Section 1				
Test	Total Hg Recovered from the Process (g)	Hg Recovered (%)	Total Hg Lost in the Process (g)	Hg Lost %
1	2343.28	69.47	1029.69	30.53
2	2492.25	89.00	307.95	11.00
3	2457.02	87.75	343.07	12.25
4	2472.07	88.29	327.98	11.71
Section 2				
1	2435.62	70.49	1019.76	29.51
2	2560.64	91.45	239.51	8.55
3	2628.87	93.89	171.20	6.11
4	2583.82	92.28	216.31	7.72

In summary, the results obtained indicate that there was a significant increase in the mercury recovered in the amalgamation process compared to that recovered in test 1 (input used by the miners), ranging from 87.75% to 89.00% in Section 1 and from 91.45% to 93.89% in Section 2 (Figure 4). The differences and fluctuations in the results of tests 2, 3, and 4 are a possible consequence of the operation and/or ore feed of each mill (involving stoppages for maintenance, which explains why some process more mineral than others).

4. Conclusions

The results of the grain size tests and mineral recovery show that the mineral fraction that liberates Au in greater proportion occurs when 62.12% of the material passes the #120 mesh (125 μ m), achieved with a grinding time of 120 min in an amalgamating mill ("chancha"). Regarding the mercury input for the ore processed, it was determined that the adequate input to feed a mill/amalgamator is 340.5 g, which allows for a 25% reduction of the Hg usually fed by the miners in each work cycle, with a gold recovery of $57 \pm 0.5\%$. Likewise, considering the characteristics of the ore mineral and the operation of the Chilean mills, it was determined that it is possible to reduce the Hg input to each mill by up to 20% (Hg reduction at the source). When applying this reduction, it was observed that neither the mineral concentration nor the mill performance was affected, and it is possible to apply simple and viable alternatives that can improve the operating performance, increase gold recovery up to 4.68%, and reduce Hg losses in the process by up to 20.36% on average.

The control of amalgamation times and proportion of mercury used can also reduce losses, together with an increase in gold recovery [43], which implies a greater economic benefit for miners. However, the inefficiency of the process, the senselessness of amalgamating all the ore in an open circuit, the low mineral recovery (Au), and the harmfulness of amalgamation to the surrounding environment and population should be considered; therefore, more economical and environmentally friendly alternatives for recovery should be sought and implemented: grinding the ore, concentrating and amalgamating only a little at a time (concentrate), or selling it to a cyanidation plant.

Undoubtedly, the efficient use of mining resources can reduce and, to some degree, control the use of mercury in the concentration and gold beneficiation processes. The proposal indicated in this study is feasible and can have a positive impact on the reduction of anthropogenic mercury emissions as a mitigation measure within the mining sector of Nambija so that it can be replicated in other gold deposits where this type of mining is carried out.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/min13111396/s1>, Table S1: Grain size analysis, grinding time (80 min), Table S2: Grain size analysis, grinding time (100 min), Table S3: Grain size analysis, grinding time (120 min); Table S4: Grain size analysis, grinding time (140 min), Table S5: Verification test, grinding time (120 min).

Author Contributions: R.G.-V.: Conceptualization, Investigation, Methodology, writing-original draft. M.J.G.-M.: Supervision, Methodology, Writing—review & editing. D.B.: Supervision, Validation, Writing—review & editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: All data are contained within the article or supplementary materials.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Sana, A.; Christophe, D.B.; Hien, H. Knowledge and perceptions of health and environmental risks related to artisanal gold mining by the artisanal miners in Burkina Faso: A cross-sectional survey. *Pan Afr. Med. J.* **2017**, *27*, 280. [CrossRef] [PubMed]
2. Mwanderingana, E.; Ye, J. Mining what is not mine: Artisanal gold mining in Gwanda, Zimbabwe. *Extr. Ind. Soc.* **2023**, *13*, 101217. [CrossRef]
3. Vergara-Murillo, E.; González-Ospino, S.; Cepeda-Ortega, N.; Pomares-Herrera, E.; Johnson-Restrepo, B. Adverse Health Effects and Mercury Exposure in a Colombian Artisanal and Small-Scale Gold Mining Community. *Toxics* **2022**, *10*, 723. [CrossRef] [PubMed]
4. Jiménez, A.D.; Smith, N.M.; Holley, E.A. Capitals in artisanal and small-scale mining in Marmato, Colombia: Using the sustainable livelihoods framework to inform formalization. *Extr. Ind. Soc.* **2022**, *12*, 101157. [CrossRef]
5. Jiménez-Oyola, S.; Chavez, E.; García-Martínez, M.-J.; Ortega, M.F.; Bolonio, D.; Guzmán-Martínez, F.; García-Garizabal, I.; Romero, P. Probabilistic multi-pathway human health risk assessment due to heavy metal(loid)s in a traditional gold mining area in Ecuador. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2021**, *224*, 112629. [CrossRef]
6. Bester, V. Towards a sustainable artisanal gold mining sector in South Africa: Proposed developmental initiatives. *J. Rural Stud.* **2023**, *97*, 375–384. [CrossRef]
7. Veiga, M.M.; Gunson, A.J. Gravity Concentration in Artisanal Gold Mining. *Minerals* **2020**, *10*, 1026. [CrossRef]
8. Manzila, A.N.; Moyo, T.; Petersen, J. A Study on the Applicability of Agitated Cyanide Leaching and Thiosulphate Leaching for Gold Extraction in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. *Minerals* **2022**, *12*, 1291. [CrossRef]
9. Jonkman, J.; de Theije, M. Amalgamation: Social, technological, and legal entanglements in small-scale gold-mining regions in Colombia and Suriname. *Geoforum* **2022**, *128*, 202–212. [CrossRef]
10. Rodrigues, P.d.A.; Ferrari, R.G.; dos Santos, L.N.; Junior, C.A.C. Mercury in aquatic fauna contamination: A systematic review on its dynamics and potential health risks. *J. Environ. Sci.* **2019**, *84*, 205–218. [CrossRef]
11. Jiménez-Oyola, S.; García-Martínez, M.-J.; Ortega, M.F.; Bolonio, D.; Rodríguez, C.; Esbrí, J.-M.; Llamas, J.F.; Higuera, P. Multi-pathway human exposure risk assessment using Bayesian modeling at the historically largest mercury mining district. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2020**, *201*, 110833. [CrossRef]
12. Torkaman, P.; Veiga, M.; Lima, L.d.A.; Oliveira, L.; Motta, J.; Jesus, J.; Lavkulich, L. Leaching gold with cassava: An option to eliminate mercury use in artisanal gold mining. *J. Clean. Prod.* **2021**, *311*, 127531. [CrossRef]
13. Alfonso, P.; Anticoi, H.; Yubero, T.; Bascompta, M.; Henao, L.; García-Valles, M.; Palacios, S.; Yáñez, J. The importance of mineralogical knowledge in the sustainability of artisanal gold mining: A Mid-South Peru case. *Minerals* **2019**, *9*, 345. [CrossRef]
14. Lydia, O.; Godwin, A.; Isaac, L. "We have done nothing wrong": Youth miners' perceptions of the environmental consequences of artisanal and small-scale mining (ASM) in Ghana. *Extr. Ind. Soc.* **2022**, *12*, 101179. [CrossRef]
15. Sánchez-Vázquez, L.; Espinosa-Quezada, M.G.; Eguiguren-Riofrío, M.B. "Golden reality" or the "reality of gold": Artisanal mining and socio-environmental conflict in Chinapintza, Ecuador. *Extr. Ind. Soc.* **2016**, *3*, 124–128. [CrossRef]
16. Kosai, S.; Nakajima, K.; Yamasue, E. Mercury mitigation and unintended consequences in artisanal and small-scale gold mining. *Resour. Conserv. Recycl.* **2023**, *188*, 106708. [CrossRef]
17. Mestanza-Ramón, C.; Mora-Silva, D.; D'orio, G.; Tapia-Segarra, E.; Gaibor, I.D.; Parra, J.F.E.; Velásquez, C.R.C.; Straface, S. Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM): Management and Socioenvironmental Impacts in the Northern Amazon of Ecuador. *Sustainability* **2022**, *14*, 6854. [CrossRef]
18. Gonçalves, A.O.; Marshall, B.G.; Kaplan, R.J.; Moreno-Chavez, J.; Veiga, M.M. Evidence of reduced mercury loss and increased use of cyanidation at gold processing centers in southern Ecuador. *J. Clean. Prod.* **2017**, *165*, 836–845. [CrossRef]
19. Morgan, V.L.; McLamore, E.S.; Correll, M.; Kiker, G.A. Emerging mercury mitigation solutions for artisanal small-scale gold mining communities evaluated through a multicriteria decision analysis approach. *Environ. Syst. Decis.* **2021**, *41*, 413–424. [CrossRef]

20. Cruz, U.; Vega, E. Characterization of Environmental Pollution Associated with the Amalgamation Process Based on the Loss of Mercury. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2021**, *835*, 012010. [CrossRef]
21. Torkaman, P.; Veiga, M. Comparing cyanidation with amalgamation of a Colombian artisanal gold mining sample: Suggestion of a simplified zinc precipitation process. *Extr. Ind. Soc.* **2023**, *13*, 101208. [CrossRef]
22. Hinton, J.J.; Veiga, M.M.; Veiga, A.T.C. Clean artisanal gold mining: A utopian approach? *J. Clean. Prod.* **2003**, *11*, 99–115. [CrossRef]
23. Parapari, P.S.; Parian, M.; Rosenkranz, J. Quantitative analysis of ore texture breakage characteristics affected by loading mechanism: Fragmentation and mineral liberation. *Miner. Eng.* **2022**, *182*, 107561. [CrossRef]
24. Carling, G.T.; Diaz, X.; Ponce, M.; Perez, L.; Nasimba, L.; Pazmino, E.; Rudd, A.; Merugu, S.; Fernandez, D.P.; Gale, B.K.; et al. Particulate and dissolved trace element concentrations in three southern Ecuador rivers impacted by artisanal gold mining. *Water Air Soil Pollut.* **2013**, *224*, 1415. [CrossRef]
25. Appleton, J.D.; Williams, T.M.; Orbea, H.; Carrasco, M. Fluvial Contamination Associated with Artisanal Gold Mining in the Ponce Enríquez, Portovelo-Zaruma and Nambija Areas, Ecuador. *Water Air Soil Pollut.* **2001**, *131*, 19–39. [CrossRef]
26. Requelme, M.R.; Ramos, J.; Angélica, R.; Brabo, E. Assessment of Hg-contamination in soils and stream sediments in the mineral district of Nambija, Ecuadorian Amazon (example of an impacted area affected by artisanal gold mining). *Appl. Geochem.* **2003**, *18*, 371–381. [CrossRef]
27. MAE-PRAS Ministerio del Ambiente de Ecuador. *Programa de Reparación Ambiental y Social—Diagnóstico Socioambiental de la Zona Minera Nambija*; MAE-PRAS Ministerio del Ambiente de Ecuador: Quito, Ecuador, 2015.
28. Ministerio de Energía y Minas. Reporte de Minería. 2016. Available online: <https://www.mem.gob.do/index.php/consultas-publicas> (accessed on 12 January 2020).
29. *Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana*; Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales: Bogotá, Colombia, 2020.
30. Diana Buitrón, O.; Diego Barona, D.; Francisco Iturra, M.; Johana León, F. Validación del método para la determinación de oro por ensayo al fuego combinado con espectrometría de absorción atómica en muestras geológicas mineras metalúrgicas. *InfoAnalítica* **2021**, *9*, 119–136. [CrossRef]
31. Magalhães, F.B.; Carvalho, C.d.F.; Carvalho, E.L.C.N.; Yoshida, M.I.; Dos-Santos, C.G. Rendering wastes obtained from gold analysis by the lead-fusion fire-assay method non-hazardous. *J. Environ. Manag.* **2012**, *110*, 110–115. [CrossRef]
32. Hajinia, A.; Heidari, T. Sensitive fluorometric determination of gold in geological samples using fire assay pre-concentration coupled with microfluidic paper-based analytical device. *Microchem. J.* **2021**, *164*, 105923. [CrossRef]
33. Baena, O.J.R.; Aristizábal, G.; Pimentel, M.S.; Flórez, C.A.; Argumedo, C.E. Waste Management and the Elimination of Mercury in Tailings from Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Andes Municipality of Antioquia, Colombia. *Mine Water Environ.* **2021**, *40*, 250–256. [CrossRef]
34. INEN-Instituto Ecuatoriano de Normalización. Norma Técnica Ecuatoriana-INEN 2169: 2013 Agua, Calidad del Agua, Muestreo, Manejo y Conservación de Muestras. 2013, p. 26. Available online: <http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/n-te-inen-2169-agua-calidad-del-agua-muestreo-manejo-y-conservacion-de-muestras.pdf> (accessed on 12 January 2020).
35. Pérez-García, E.; Bouchard, J.; Poulin, É. Integrating online mineral liberation data into process control and optimisation systems for grinding-separation plants. *J. Process Control* **2021**, *105*, 169–178. [CrossRef]
36. Altun, O.; Altun, D. Estimation of mineral liberation distribution functions to be used in modelling of impact and attrition milling. *Miner. Eng.* **2021**, *173*, 107236. [CrossRef]
37. Ministerio de Energía y Minas del Perú. Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético. 2022, p. 112. Available online: <https://www.sonami.cl/v2/informacion-de-la-mineria/mineria-metalica/> (accessed on 12 January 2020).
38. Jackson, C.F.; Hedges, J.H. *Metal-Mining Practice*; U.S. Bureau of Mines: Washington, DC, USA, 1939.
39. García, L.P.; Llópiz, Y.C.; Puyáns, L.R.G. Modelo Matemático Para Describir la Distribución Granulométrica de la Fase Dispersa de las Suspensiones de Laterita. *Tecnología Química* **2009**, *XXIX*, 83–91. Available online: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761010> (accessed on 4 May 2023).
40. Pantoja-Barrios, G.K.; Molina-Ramírez, E.K.; Fuentes-Torres, S.N.; Ramírez, F.A.; Mojica, J.; Londoño-Escobar, J.I. Metodología geometalúrgica para mejorar el proceso de extracción de oro en pequeña escala de la mina Gualconda en Nariño—Colombia. *Revista UIS Ingenierías* **2020**, *20*, 143–152. [CrossRef]
41. García, O.; Veiga, M.M.; Cordy, P.; Suescún, O.E.; Molina, J.M.; Roeser, M. Artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: A successful case of mercury reduction. *J. Clean. Prod.* **2015**, *90*, 244–252. [CrossRef]
42. Pantoja, T.F.; Álvarez, R.R.; Rodríguez, A.A.S. Methods to reduce mercury pollution in small gold mining operations. *Rev. Metal.* **2005**, *194*–203. [CrossRef]
43. FMAM-Fondo para el Medio Ambiente Mundial; ONUDI; AGC-Artisanal Gold Council. *Línea de Base Nacional Para la Minería Artesanal y en Pequeña Escala de Oro en Ecuador, Conforme la Convención de Minamata Sobre Mercurio*; Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica: Pichincha, Ecuador, 2020; pp. 8–89.
44. del Ambiente, M.-M. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua. *Quito* **2015**, *131*, 35–40.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

SUPPLEMENTARY MATERIALS

Table S1. Grain size analysis with grinding time (80 min).

Assay #1		(% Sand): 98.79		(% Fine sand): 1.21	
Mesh #	Opening diameter (μm)	Weight (g)	Weight (%)	% Ac. (+) retained	% Ac. (-) passing
10	2000	1.42	0.57	0.57	99.43
18	1000	9.34	3.75	4.33	95.67
35	500	26.52	10.66	14.99	85.01
60	250	121.06	48.66	63.65	36.35
120	125	47.49	19.09	82.74	17.26
230	63	39.92	16.05	98.79	1.21
325	45	0.09	0.04	98.82	1.18
400	37	0.115	0.05	98.87	1.13
−400	37	2.81	1.13	100.00	0.00
TOTAL		248.765	100.00		

Table S2. Grain size analysis with grinding time (100 min).

Assay #2		(% Sand): 84.29		(% Fine sand): 15.71	
Mesh #	Opening diameter (μm)	Weight (g)	Peso (%)	% Ac. (+) retained	% Ac. (-) passing
10	2000	0.68	0.27	0.27	99.73
18	1000	0.12	0.05	0.32	99.68
35	500	2.21	0.89	1.21	98.79
60	250	39.78	15.99	17.20	82.80
120	125	109.07	43.83	61.03	38.97
230	63	57.88	23.26	84.29	15.71
325	45	9.34	3.75	88.04	11.96
400	37	7.35	2.95	91.00	9.00
−400	37	22.40	9.00	100.00	0.00
TOTAL		248.83	100.00		

Table S3. Grain size analysis with grinding time (120 min).

Assay #3		(% Sand): 77.05		(% Fine sand): 22.95	
Mesh #	Opening diameter (μm)	Weight (g)	Weight (%)	% Ac. (+) re- tained	% Ac. (-) passing
10	2000	0.26	0.10	0.10	99.90
18	1000	0.09	0.04	0.14	99.86
35	500	1.27	0.51	0.65	99.35
60	250	16.58	6.65	7.30	92.70
120	125	76.07	30.52	37.82	62.18
230	63	97.81	39.24	77.05	22.95
325	45	13.61	5.46	82.51	17.49
400	37	2.29	0.92	83.43	16.57
−400	37	41.30	16.57	100.00	0.00
TOTAL		249.28	100.00		

Table S4. Grain size analysis with grinding time (140 min).

Assay #4		(%) Sands: 59.57		(%) Fine sand: 40.43	
Mesh #	Opening diameter (µm)	Weight (g)	Weight (%)	% Ac. (+) re-tained	% Ac. (-) passing
10	2000	0.01	0.00	0.00	100.00
18	1000	0.61	0.24	0.25	99.75
35	500	0.58	0.23	0.48	99.52
60	250	3.12	1.25	1.73	98.27
120	125	41.02	16.45	18.18	81.82
230	63	103.18	41.38	59.57	40.43
325	45	14.48	5.81	65.38	34.62
400	37	2.86	1.15	66.52	33.48
−400	37	83.47	33.48	100.00	0.00
TOTAL		249.33	100.00		

Table S5. Verification test with grinding time (120 min).

Assay #5		(%) Sands: 76.36		(%) Fine sand: 23.64	
Mesh	Opening diameter (µm)	Weight (g)	Weight (%)	% Ac. (+) re-tained	% Ac. (-) passing
10	2000	0.22	0.09	0.09	99.91
18	1000	0.72	0.29	0.38	99.62
35	500	1.54	0.62	1.00	99.00
60	250	18.39	7.38	8.38	91.62
120	125	73.67	29.57	37.95	62.05
230	63	95.72	38.42	76.36	23.64
325	45	15.85	6.36	82.73	17.27
400	37	2.57	1.03	83.76	16.24
−400	37	40.47	16.24	100.00	0.00
TOTAL		249.15	100.00		