



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



OPTIMIZACIÓN DE LA AMALGAMACIÓN DEL ORO EN LA
PLANTA CONCENTRADORA B Y Z LUNAR DE ORO
RINCONADA PUNO

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ZENON CHAMBI CHURA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2013



DEDICATORIA

A mis queridos padres Sr. Francisco Chambi y Sra. Honorata Chura que me dio la vida y quiso hacer de su hijo un profesional exitoso.

A mi esposa Carmela Nina Luque que me apoyó incondicionalmente en mi formación profesional.

A mi hija Grissel Mayde que es el porqué de mi vida.

Zenon Chambi Chura



AGRADECIMIENTOS

Mi especial agradecimiento y reconocimiento a las autoridades, docentes, personal administrativo y estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería Geológica e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional del Altiplano.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Dante Atilio Salas Ávila por su colaboración en el desarrollo del presente trabajo.

Mi agradecimiento especial al Ingeniero Emerson Sanga Cama Gerente General de JJ MANUFACTURAS INDUSTRIALES, por su apoyo incondicional.

A todos los que apoyaron directa o indirectamente durante la elaboración del presente estudio.

Zenon Chambi Chura



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

RESUMEN 10

ABSTRACT..... 11

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES 13

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 15

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO 16

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... 16

1.4.1. Objetivo general..... 16

1.4.2. Objetivos específicos 17

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO 18

2.1.1. Oro 18

2.1.2. Minerales auríferos 20



a)	Oro grueso.....	20
b)	Oro microscópico.....	21
c)	Oro invisible.....	21
	2.1.3. Mineralogía de menas auríferas.....	21
a)	Yacimientos primarios.....	22
b)	Yacimientos secundarios.....	22
	2.1.4. Minerales refractarios.....	23
	2.1.5. Principales usos de oro.....	24
	2.1.6. Amalgamación.....	25
	2.1.7. Reactivación del mercurio.....	28
	2.1.8. Tratamiento de la amalgama.....	28
2.2.	TECNICAS DE AMALGAMACION.....	29
	2.2.1. Historia y antecedentes técnicos.....	29
	2.2.2. La aplicación de la amalgamación en la pequeña minería aurífera.....	31
	2.2.2. Procesos aplicados a la separación de amalgama y minerales acompañantes.....	40
	2.2.3. Pérdidas de mercurio durante los procesos tradicionales.....	46
2.3.	MARCO CONCEPTUAL.....	50
	2.3.1. Aspectos generales.....	50
	2.3.2. Procesos gravimétricos utilizados para la recuperación del oro.....	51
	2.3.3. Optimización del proceso de amalgamación.....	77
	2.3.4. Otros equipos para separar amalgama de las colas de amalgamación.....	100



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.....	108
3.1.1. Generalidades.....	108
3.1.2. Ubicación	109
3.1.3. Diseño de molino trapiche	111

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V. CONCLUSIONES	120
VI. RECOMENDACIONES:.....	121
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
ANEXOS.....	125

Área: Proyectos y Diseño de Plantas Metalúrgicas

Línea: Optimización de la Amalgamación del Oro

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 05 de setiembre 2013



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Molino Trapiche con planchas amalgamadoras.	35
Figura N° 2: Canaletas con riflería.	35
Figura N° 3: Molino/amalgamador de piedra (típicamente trabajo de niños o mujeres) (Nazca, Perú).	36
Figura N° 4: Amalgamación manual dentro de una batea metálica grande.	39
Figura N° 5: Amalgamación manual (con una piedra chica dentro de una grande, la piedra grande ya fue utilizada para este propósito en el tiempo de la Colonia).	40
Figura N° 6: Exprimir el mercurio líquido manualmente con un trapo	42
Figura N° 7: "Quema" de la amalgama al aire libre.	45
Figura N° 8: Retorta de fabricación industrial.	45
Figura N° 9: (Canaleta) experimental; alta turbulencia: tradicional, baja turbulencia: modificada.	56
Figura N° 10: Canaletas con diferentes pisos (alfombras, metal expandido) para diferentes tamaños de carga clasificados por un tromel en la salida de un molino a bolas.	56
Figura N° 11: Jig tipo "Denver Mineral Jig" en un circuito de molienda.	61
Figura N° 12: Mesa concentración gravimétrica.	65
Figura N° 13: Concentrador espiral.	69
Figura N° 14: Tambor amalgamador.	90
Figura N° 15: Separador hidráulico.	99
Figura N° 16: Batea automática	100



Figura N° 17: Armado de Estructura.....	114
Figura N° 18: Armado de Estructura del Trapiche.....	115
Figura N° 19: Cremallera para eje Principal	115
Figura N° 20: Ruedas Trituradoras, Tina de Concentración	116
Figura N° 21: Equipo con Instalación Concluida.....	116
Figura N° 22: Partes de Trapiche	117



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Propiedades Físicas y Químicas de oro.....	18
Tabla N° 2: Aleaciones de Oro con distintas especies.	20
Tabla N° 3: Principales Procesos de Amalgamación utilizados en la pequeña minería aurífera.....	32



RESUMEN

El trabajo de “Optimización de la amalgamación del oro en la Planta Concentradora B y Z Lunar de Oro Rinconada Puno”; La Planta Concentradora B y Z Lunar de Oro Rinconada Puno, presenta un problema, debido a que no hay una óptima recuperación en la amalgamación en planta, razón por la cual se plantea la implementación del Trapiche (molino abierto) dentro del proceso de molienda con la finalidad de aumentar la eficiencia en lo referente a la recuperación. Mediante la incorporación de un sistema de remolienda y amalgamación semicontinua permitirá mejorar la recuperación y por lo tanto la eficiencia esto permitirá disminuir costos en la producción, lo cual beneficiará a la Planta Concentradora B y Z por que la minería es una Gestión de Costos. Con el uso de un trapiche los problemas existentes en el tratamiento de concentrados serán mucho más rentables económicamente y al mismo tiempo el tratamiento metalúrgico de estos y el control de los parámetros de operación serán más eficientes. Una alternativa de solución es el empleo de un sistema de remolienda y amalgamación semicontinua, que consiste en molino, trapiche y amalgamador. Con esto elevaremos el rendimiento de la producción alcanzando las metas programadas; y lo mismo para el tratamiento de concentrados en un circuito Semi-Continuo con amalgamación; con descargas de cada 2 Hrs. de tratamiento y así reducir los costos de producción. Para optimizar se plantea la implementación del nuevo sistema, se analizarán las siguientes variables de operación, la granulometría, densidad y tiempo de amalgamación en el trapiche el que permitirá evaluar el rendimiento de la recuperación de oro a distintas condiciones.

Palabras Clave: Amalgamación, Planta concentradora, Optimización, Oro, Trapiche.



ABSTRACT

The work of "Optimization of gold amalgamation in the Rinconada Puno Gold Lunar ByZ Concentrator Plant"; The ByZ Lunar Gold Concentrating Plant Rinconada Puno, presents a problem, because there is no optimal recovery in the amalgamation in the plant, which is why the implementation of the Trapiche (open mill) in the milling process is considered proposal to increase efficiency in relation to recovery. By upgrading a semi-continuous towing and amalgamation system, recovery and therefore efficiency can be improved so production costs are reduced, which benefit from Concentrator Plant ByZ by mining is a Cost Management With the use of a trap, the problems of problems in the treatment of concentrates will be much more economically profitable and at the same time the metallurgical treatment of these and the control of the operating parameters will be more efficient. An alternative solution is the use of a semi-continuous amalgamation and amalgamation system, consisting of mill, trapiche and amalgamator. With this we will increase the production yield reaching the programmed goals; and the same for the treatment of concentrates in Semi-Continuous circuit with amalgamation; with downloads every 2 Hrs. of treatment and thus reduce production costs. To optimize the implementation of the new system, consider the following operating variables, granulometry, density and amalgamation time in the mill, which will detect the evaluation of gold recovery performance at different conditions.

Key Words: Amalgamation, Concentration plant, Gold, Optimization, Trapiche.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En la Planta Concentradora B y Z Lunar de Oro Rinconada Puno la amalgamación del oro presenta un problema, debido a que no hay una óptima recuperación en la amalgamación en planta, razón por la cual se plantea la implementación del Trapiche (molino abierto) dentro del proceso de molienda con la finalidad de aumentar la eficiencia en lo referente a la recuperación.

Los trapiches son máquinas de molienda como de amalgamación y deslamador de minerales. En la molienda incluye todas las etapas (primaria, secundaria, terciaria), funciona haciendo girar dos ruedas pesadas sobre una pista. Los primeros trapiches fueron hechos de piedra de granito y giraban gracias a la tracción ejercida por animales, como la mula y el caballo.

El presente estudio trata de la optimización de los procesos de recuperación del Oro en la planta concentradora Minera B y Z Lunar de Oro Rinconada Puno, debido ha que no hay una buena recuperación en la amalgamación en planta, se plantea la implementación del Trapiche (molino abierto) dentro del proceso de molienda con la finalidad de aumentar la eficiencia en lo referente a la recuperación.

La incorporación de un sistema de remolienda y amalgamación semicontinua permitirá mejorar la recuperación y por tanto la eficiencia esto permitirá disminuir costos en la producción.

Para optimizar se plantea la implementación del nuevo sistema, se analizarán las siguientes variables de operación, la granulometría, densidad y tiempo de amalgamación



en el trapiche el que permitirá evaluar el rendimiento de la recuperación de oro a distintas condiciones.

1.1. ANTECEDENTES

La amalgamación es un proceso que se aplica para recuperar oro y plata nativa de materiales auríferos o argentíferos. El oro, la plata y sus compuestos son capaces de alearse con el mercurio. Dichas aleaciones se conocen como amalgama. La amalgamación en la minería aurífera sirve para recuperar el oro en forma de amalgama y así separarlo de los minerales acompañantes. La amalgama se forma por el contacto entre mercurio y oro en una pulpa con agua. El mercurio puede estar presente en forma de "perlas" dispersas en la pulpa o extendido sobre una superficie (planchas amalgamadoras). 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.

El oro libre (nativo) en un tamaño de grano entre 20-50 μm y 1-2mm es apropiado para la amalgamación. El oro grueso se puede recuperar fácilmente con métodos gravimétricos. En el proceso de amalgamación, el oro se disuelve mínimamente en el mercurio. La amalgama contiene generalmente partículas de oro superficialmente aleadas con el mercurio y ligadas entre sí por el mismo.

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



- 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; el objetivo de su uso es saponificar el aceite y la grasa. Otros agentes frecuentemente utilizados para mejorar el rendimiento de la amalgamación son: la panela (concentrado de caña de azúcar), el limón, trazas de cianuro, gasolina, etc.
- Tanto el aluminio o el cobre metálico de los detonadores o cables eléctricos, como el plomo metálico (en forma de perdigones o balas de cazador en la minería aluvial) y el zinc metálico de baterías 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). La adición dosificada de cal neutraliza parcialmente dichos efectos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La planta de beneficio Minera B Y Z Lunar de Oro Rinconada Puno trata mineral procedente de diferentes frentes de operación de las contratas en Lunar de Oro, el problema que se presenta es la recuperación, se puede tratar estos minerales por diversos métodos molienda en molinos amalgamadores, Trapiche que es un molino abierto, mesas gravimétricas, concentradores centrífugos, para luego ser amalgamados en molinos de amalgamación tipo batch que se realizan en la planta de beneficio Minera B Y Z Lunar de Oro Rinconada Puno, no permite una buena recuperación del oro. Además, a esto se le agrega el manipuleo directo del concentrado, ocasionando pérdida, requiriendo de una mayor cantidad de mano de obra, tiempo y costo.

Es por esto que al final del estudio planteo la utilización de procedimientos gravimétricos para evitar la contaminación ambiental en estos momentos coyunturales donde todos debemos de coadyuvar a la utilización de procesos que eviten en lo posible la producción de estos impactos ambientales para ello se utilizará el concentrador Falcón, el relave que se producirá se puede tratar por flotación, como bien sabemos en la concentración gravimétrica no se va a utilizar reactivos y por lo tanto la contaminación ambiental va a ser mínima. Obviamente el presente es un estudio preliminar que nos va a servir como base para hacer el estudio definitivo de tratamiento de estos minerales.

¿Será factible optimizar la amalgamación del oro en la planta de beneficio Minera B Y Z Lunar de Oro Rinconada Puno?



1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

En nuestra región la minería artesanal, la pequeña minería realiza la extracción del Oro por medio de la amalgamación, siendo necesario la participación de profesionales del área en la optimización debido a que no hay una eficiente recuperación en planta, la recuperación por sistema de remolienda y amalgamación discontinua en molinos amalgamadores o batch, solo es del 62%.

Ocasionando que haya pérdida de oro en el relave por lo tanto también pérdidas de energía, mano de obra y por consiguiente se eleva el costo de producción.

Mejorando el circuito, utilizando el trapiche los problemas existentes en el tratamiento de concentrados serán mucho más rentables económicamente y al mismo tiempo el tratamiento metalúrgico de estos y el control de los parámetros de operación serán más eficientes.

Una alternativa de solución es el empleo de un sistema de remolienda y amalgamación semicontinua, que consiste en molino, trapiche y amalgamador.

Con esto elevaremos el rendimiento de la producción alcanzando las metas programadas; y lo mismo para el tratamiento de concentrados en un circuito semi-continuo con amalgamación; con descargas de cada 2 Hrs. de tratamiento y así reducir los costos de producción.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Optimizar la amalgamación del oro, en la planta de tratamiento B Y Z Lunar de Oro Rinconada Puno.



1.4.2. Objetivos específicos

- a. Evaluar la granulometría de la molienda del concentrado gravimétrico que se alimenta al trapiche.
- b. Determinar los tiempos de amalgamación en el Trapiche para diferentes leyes.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Oro

Latín (aurum = oro, aura = brillo). Es un metal amarillo brillante, en láminas muy delgadas es azul o verde, de raya amarillo dorado, en estado natural se denomina oro puro de 24 quilates, es maleable, es demasiado blando para ser usado en joyería y acuñar moneda, por lo que se alea siempre para aumentar su dureza sobre todo su durabilidad para tales fines con plata y cobre. (Linares Gutiérrez, 2001)

2.1.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Tabla N° 1: Propiedades Físicas y Químicas de oro.

Nombre (Oro)	Valor/Unidad
Símbolo químico	Au
Color	Amarrillo
Peso Atómico	197g/mol
Número Atómico	79
Estado de oxidación	3, 1
Densidad Específica	19.3g/cm ³
Punto de Fusión	1063°C
Punto de ebullición	2530°C
Calor de vaporización	81.08Kcal/g-átomo
Calor de fusión, cal/gr.	16.3
Dureza	2.5- 3 (Mohs)
Radio atómico	1.46 Angstroms
Radio iónico.	1.37 Angstroms



Potencial normal	1.498 voltios
Resistencia Eléctrica	2.25 Ohm.
Electronegatividad	2.4Pauling
Conductividad térmica	2.7x10Kcal/°K m s
Módulo de elasticidad	7.6- 8.16x109Kg/m2

Fuente: HENLEY, K.J., (1975), Mineralogía de mineral de oro y su relación con el tratamiento metalúrgico: Mineral, Science and Engineering, vol. 7, no. 4, pp. 289-312.

2.1.1.2. PROPIEDADES QUÍMICAS

- El oro es fácilmente soluble en agua regia, que produce cloro naciente.
- El oro disuelve en ácido clorhídrico en presencia de sustancias orgánicas.
- El oro es disuelto por cloruros férricos u cúpricos.
- El oro es algo soluble en una solución de carbonato de sodio al 10%
- El oro es soluble en soluciones diluida de cianuro de sodio.

2.1.1.3. PROPIEDADES MECÁNICAS

El oro es uno de los metales más dúctiles y se puede laminar hasta obtener hojas (panes de oro) de un espesor de 0.0001 mm, las cuales dejan pasar la luz tomando un color verde azulado, pero con la luz reflejada presenta su color característico. Se puede estirar en hilos finísimos, con un gramo se consigue un hilo de 2000 metros de longitud. (Quiroz Nuñez, 1998)

2.1.2. Minerales auríferos

2.1.2.1. Aleaciones naturales

Tabla N° 2: Aleaciones de Oro con distintas especies.

Nombre	Formula Química
<ul style="list-style-type: none">• Oro argentífero (electrum)• Oro cuprífero (cuproaururo)• Oro paladífero (porpesita)• Oro rodonífero (rodita)• Oro irídico• Oro platinífero• Oro bismutífero• Amalgama de oro• Maldonita• Auricúprico• Paladio cupriáurico	(Au, Ag) (Au, Cu) (Au, Pd) (Au, Rh) (Au, Ir) (Au, Pt) (Au, Bi) (Au ₂ Hg ₃) (Au ₂ Bi) (AuCu ₃) (Cu, Pd) 3Au ₂
SULFUROS <ul style="list-style-type: none">• Uytembogardita	(Au ₃ AuS ₂)
TELUROS <ul style="list-style-type: none">• Calaverita• Krennerita• Montbrayita• Muthmannita• Silvanita• Kostavita• Nagyagita	(Au, Ag) Te ₂ (Au, Ag) Te ₂ (Au, Sb) 2Te ₃ (Au, Ag) Te (Au, Ag) Te ₄ (Au, Cu) Te ₄ (Pb ₅ Au (Te, Sb) 4S ₅)
ANTIMONIUIROS <ul style="list-style-type: none">• Aurostibita	(AuSb ₂)
SELENIUIROS <ul style="list-style-type: none">• Fischesserita	(AuAg ₂ Se ₂)

Fuente: HENLEY, K.J., (1975), Mineralogía de mineral de oro y su relación con el tratamiento metalúrgico: Mineral, Science and Engineering, vol. 7, no. 4, pp. 289-312.

2.1.2.2. Ocurrencias de oro

a) Oro grueso

cuyo tamaño está entre 100 a 1000 micrones, por haberse encontrado en muchos puntos de la Concentradora; sin embargo, es el oro que se puede controlar con facilidad.



b) Oro microscópico

cuyo tamaño está entre 10 a 100 micrones, su tratamiento por flotación o cianuración ha alcanzado bastante éxito.

c) Oro invisible

conocido en la metalurgia casera como Oro Volador tiene un tamaño por debajo de los 10 micrones, su recuperación depende mucho de la forma como se encuentra en la naturaleza. Aquellas partículas de oro invisible que están en rocas diseminadas.

2.1.3. Mineralogía de menas auríferas

- Menas de óxidos simples que contienen partículas finas de oro nativo, ya sea en cuarzo o ganga de piedra caliza
- Menas de sulfuros simples en el que el oro está asociado con pequeñas cantidades de pirita y arsenopirita.
- Material aluvial o placer. compuestos por areniscas y grava no consolidada, están en los cauces de los ríos.
- Menas complejas refractarias en las que las especies minerales que contienen oro no son solubles en el cianuro. Son de recuperación complicada porque requiere la destrucción de la matriz que los encapsula, mediante la tostación, ataque ácido en autoclaves con bacterias.
- Menas de metales comunes, en el que los metales preciosos están como subproductos de un proceso metalúrgico como el cobre, plata y plomo.



2.1.3.1. Yacimientos auríferas

a) Yacimientos primarios

- Segregaciones magmáticas: Formadas por la consolidación de magmas fundidos. Estos depósitos se conocen también con el nombre de “orto magmáticos”.
- Depósitos pirometasomáticos: Formados a temperaturas y presiones altas en las rocas invadidas, cerca de los contactos de intrusivos ígneos, por fluidos térmicos que emanan de las rocas invasoras.
- Depósitos hipotermales: Son filones y depósitos formados por fluidos térmicos a grandes profundidades a temperaturas y presiones altas.

b) Yacimientos secundarios

- Depósitos mesotermales: La mineralización se presenta como vetas, stockwork y diseminado, con pirita-arsenopirita-calcopirita, localmente con estibina
- Depósitos epitermales: Filones y depósitos formados por fluidos térmicos a poca profundidad, a temperaturas y presiones relativamente bajas.
- Depósitos sedimentarios: Formados por procesos de degradación. Estos se refieren a los placeres de oro. Las aguas termales contienen mayor cantidad de oro que otras aguas.
- Depósitos diseminados: Los yacimientos de este tipo han sido puestos en explotación recientemente. Consisten en diseminados de oro en granos muy finos en calizas, dolomitas carbonáceas y limosas. El oro que mayormente es sub-microscópico, está acompañado de sílice, pirita y otros sulfuros.
- Oro como Subproducto: Donde el oro es el constituyente menor común de la mena y puede ser recuperado durante los procesos de fundición y refinación de los



concentrados de los metales base. A pesar de que el contenido de oro en estas menas es bajo.

2.1.4. Minerales refractarios

La recuperación de metales preciosos a partir de minerales refractarios ha recibido una importante atención debido a la disminución de los recursos de los depósitos fácilmente realizables y la naturaleza compleja de los minerales en la que el oro está encerrado en varios minerales sulfurados.

Al menos el 80% del oro no puede ser extraído por métodos tradicionales, una causa muy frecuente es la refractariedad es la difusión en los minerales de sulfuro como arsenopirita y pirita. Minerales de este tipo requieren un proceso de pretratamiento para alterar o destruir la matriz de sulfuros y hacer que el oro accesible para el cianuro y el oxígeno.

Algunas opciones de Pre-Tratamiento son:

- Tostación
- Bio-oxidación
- Oxidación a Presión.
- Molienda ultra fina

Los procesos de tratamiento de mineral refractarios pueden ser precedidos por la concentración (por lo general de flotación de sulfuro). La tostación se utiliza para oxidar tanto el carbono orgánico y azufre a altas temperaturas con el aire y/ o el oxígeno. La Bio-oxidación implica el uso de bacterias que promueven las reacciones de oxidación en un medio acuoso. La Oxidación a Presión es un proceso acuoso para la eliminación del azufre se lleva a cabo en una autoclave continua, operando a altas presiones y temperaturas algo



más elevadas. La molienda ultra fina se puede utilizar cuando la liberación de partículas de oro de la matriz mineral circundante es la característica básica del mineral refractario.

2.1.5. Principales usos de oro

El oro como metal precioso es usado principalmente en joyería y bisutería, pero sus aplicaciones no se limitan a la estética y la moda también lo encontramos en la electrónica, medicina, odontología, artes plásticas e inversión.

2.1.5.1. Oro en la naturaleza

El oro se presenta en la naturaleza bajo diversas formas: en filones de rocas auríferas, asociado a otros metales (por ejemplo, el cobre) y en forma de polvo o de gránulos redondeados o achatados conocidos como pepitas; en depósitos de arena y lechos fluviales (placeres auríferos).

2.1.5.2. Extracción del oro

El oro es un metal inactivo, por lo que se encuentra en su mayor parte en estado natural. En ocasiones se encuentra como telururo de oro. Debido a su alta densidad, el oro metálico puede concentrarse en charolas. En esta operación, la arena y la grava que contienen oro se agitan con agua en una batea. Las partículas más ligeras se derraman y las densas pepas de oro permanecen en el fondo.

2.1.5.3. Caracterización del oro

El oro se caracteriza por las siguientes propiedades:

- a) Su alto peso específico.
- b) Su gran maleabilidad.
- c) Su permeabilidad por el mercurio en el agua.



- d) Su solubilidad en cianuros alcalinos.
- e) Su resistencia a la corrosión y oxidación.
- f) Su coloración amarillo rojizo que cambia de tonalidad según los elementos aleantes.

2.1.6. Amalgamación

La amalgamación es un proceso de concentración en el cual los metales nativos son separados de los minerales no metálicos que forman la ganga, en razón de su mojabilidad selectiva a los minerales no metálicos.

Entre los metales amalgamables figuran el zinc, estaño, cobre, cadmio, plomo, bismuto y sodio.

El oro es ligeramente soluble en mercurio (aproximadamente 0.06% a 20°C y 15.7% a 100°C), habiéndose logrado aislar los dos compuestos de oro-mercurio, cuya composición es: $Au_{19}Hg_4$ y $Au_{19}Hg_3$.

La densidad del oro 19.2, cuarzo es 2.6, del mercurio 13.5 Gramos/cm³.

2.1.6.1. Amalgamación batch

Esta prueba se efectúa en un molino de bolas pequeño de laboratorio, sin soleras, que trabajan a velocidades bajas. El molino debe de operar durante las pruebas con solo dos o tres bolas grandes o bien con una sola barra de acero.

La densidad de la pulpa depende del objetivo de la prueba. Por ejemplo, si desea dispersar el mercurio, la densidad apropiada es de 80% pero si se quiere mantener el charco de mercurio sin dispersión, la densidad aconsejada es de 20 a 40 % de sólidos.



El tiempo de la prueba varía de menos de una hora hasta varias horas. Una vez terminada la prueba, el mercurio se separa con una chúa o un clasificador hidráulico (elutriador) la cola se ensaya por oro.

2.1.6.2. Cinética de la amalgamación.

Esta prueba se realiza en un molino de bolas pequeño de laboratorio, se trabaja a velocidades bajas. El molino debe operar durante las pruebas con solo dos o tres bolas grandes o bien con una sola barra de acero.

La densidad de la pulpa depende del objetivo de la prueba, por ejemplo, si desea dispersar el mercurio, la densidad apropiada es 80 % pero si quiere mantener el charco de mercurio sin dispersión, la densidad aconsejable es de 20% a 40 % de sólidos.

El tiempo de prueba varía de menos de una hora hasta varias horas.

Una vez terminada la prueba, el mercurio se separa con una chúa o con un clasificador hidráulico (elutriador) y las colas se ensayan por oro.

2.1.6.3. Termodinámica de la amalgamación

La afinidad de amalgamación del mercurio para los metales aumenta con la temperatura, por ejemplo, el arsénico y el antimonio requieren de calor para formar amalgamas en el caso del antimonio se rompe al enfriarse.

El mercurio químicamente puro tiene muy débil poder de amalgamación; su energía aumenta cuando está cargado, es decir cuando contiene a la temperatura ordinaria, la cantidad de 0.10% de oro que no puede separarse por una filtración en una gamuza o en un filtro prensa. Un resultado similar puede obtenerse con



pequeñas cantidades de metales ordinarios como zinc, plomo y cobre, pero todo exceso es dañino, porque marea el mercurio ocasionando que se divida en finos globulitos.

2.1.6.4. Mercurio

Elemento químico, símbolo Hg. Es un metal noble, soluble únicamente en soluciones oxidantes. El mercurio sólido es tan suave como el plomo. El metal y sus compuestos son muy tóxicos. El mercurio forma soluciones llamadas amalgamas con algunos metales (por ejemplo, oro, plata, platino, uranio, cobre, plomo, sodio y potasio).

- Peso atómico : 200.61
- Valencia : +1, +2
- Peso Específico : 13.595 a 4°C
- Punto de Fusión : 38.85 °C
- Punto de Ebullición : 357.25 °C

El metal es líquido a la temperatura ordinaria, no oxida en el aire a la temperatura ordinaria, pero se combina lentamente con el oxígeno cuando se expone al aire a una temperatura cerca de su punto de ebullición.

El mercurio forma con muchos metales amalgamas líquidas, cuando la proporción del otro metal es pequeña, pero pastosas y hasta sólidas al aumentar dicha proporción. Las amalgamas de estaño, plata y oro se usan en odontología

Minerales de mercurio:

- Cinabrio Hg S % de Hg = 86.2



Su color varía de rojo escarlata a rojo café. Peso específico es 8.1 los elementos con los que está asociado son Si, Ca, Fe, C, Cu, As, Sb, Pb, Ag, Au. Se decomponen en ácido sulfúrico caliente.

Mercurio nativo. Hg Peso específico 13.6 el elemento con el que está asociado es la plata se descompone en ácido nítrico.

2.1.7. Reactivación del mercurio

Antes en los inicios el mercurio cuando era utilizado en sucesivas operaciones este perdía su capacidad reactiva al cual se le denomina (mercurio cansado), era lavado precariamente con algún detergente o jugo de limón y finalmente desechado.

El mercurio se purifica por destilación y tratamiento por destilado con ácido.

En primer lugar, se elimina las impurezas groseras que se encuentran en suspensión, para cuyo efecto se exprime el mercurio en gamuza lona de tejido apretando u otra tela o un filtro-prensa. Enseguida, se agrega cal para sacar los ácidos grasos y limaduras de hierro y para eliminar el azufre se coloca en una destiladora.

2.1.8. Tratamiento de la amalgama.

Una retorta es un recipiente similar a un crisol, con un mecanismo para abrir y cerrar el mismo, un tubo de salida en la cabeza del recipiente, es decir, en la tapa, y un cuello que apunta hacia abajo, similar a un tubo, que sirve como condensador. Ella sirve para destilar la amalgama y recuperar el mercurio condensado.

Se consiguen mejores resultados aplicando una capa fina de cal, tiza, arcilla o talco al interior del crisol antes de que se lo cargue con amalgama.



2.2. TECNICAS DE AMALGAMACION

2.2.1. Historia y antecedentes técnicos

La amalgamación es un proceso que se aplica para recuperar oro y plata nativa de materiales auríferos o argentíferos. El oro, la plata y varios otros metales y sus compuestos son capaces de alearse con el mercurio. Dichas aleaciones se conocen como amalgamas. La amalgamación en la minería aurífera sirve para recuperar el oro en forma de amalgama y así separarlo de los minerales acompañantes. La amalgama se forma por el contacto entre mercurio y oro en una pulpa con agua. El mercurio puede estar presente en forma de "perlas" dispersas en la pulpa o extendido sobre una superficie (planchas amalgamadoras). 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.

El oro libre (nativo) en un tamaño de grano entre 20-50 μm y 1-2mm es apropiado para la amalgamación. El oro grueso se puede recuperar fácilmente con métodos gravimétricos. En el proceso de amalgamación, el oro se disuelve mínimamente en el mercurio. La amalgama contiene generalmente partículas de oro superficialmente aleadas con el mercurio y ligadas entre si por el mismo.

En principio, todo el oro libre y limpio (p. ej. no cubierto por óxidos de fierro) 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 piritita 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. Otros agentes frecuentemente utilizados para mejorar el rendimiento de la amalgamación son: la panela (concentrado de caña de azúcar), el limón, trazas de cianuro, gasolina, etc.
- Tanto el aluminio o el cobre metálico de los detonadores o cables eléctricos, como el plomo metálico (en forma de perdigones o balas de cazador en la minería aluvial) y el zinc metálico de baterías 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.

2.2.2. La aplicación de la amalgamación en la pequeña minería aurífera

3.1.1.1. Procesos aplicados de amalgamación

La amalgamación se utiliza tanto en la pequeña minería primaria (de vetas o filones) como en la pequeña minería aluvial. Se puede diferenciar dos tipos de técnicas principales:

a) Amalgamación en "circuito abierto"

Significa que toda la carga (el 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 finísimas) o en forma de amalgama (partículas finas o flóculos) escapan con las colas, contaminando una gran cantidad de material.

Amalgamación de concentrados (o amalgamación en "circuito cerrado")

Esto significa que sólo una pequeña parte del material tratado (un "concentrado", generalmente producido gravimétricamente), se pone en contacto con el mercurio en un ambiente parcialmente o totalmente cerrado, donde la amalgamación se realiza sin la emisión de porción alguna de pulpa (p.ej. en un tambor amalgamador).



Para completar el proceso la amalgamación debe seguirse con los siguientes pasos:

separación amalgama / minerales acompañantes

separación mercurio libre / amalgama

separación oro / amalgama.

Tabla N° 3: Principales Procesos de Amalgamación utilizados en la pequeña minería aurífera

Proceso de amalgamación	En la pequeña minería primaria	En la pequeña minería aluvial	Utilizado mayormente en circuito abierto
In situ	No	Si	Si
En canaletas (sluiceboxes)	Si	Si	si
En molinos (trapiche, a bolas, de pisones, manuales)	Si	No	Si
En centrífugas (tipo Knelson)	Si	Si	Si
En jackpot	Si	Si	Si
En planchas amalgamadoras	Si	Si	Si
Manual	Si	Si	No
En tambores amalgamadores	Si	Si	No

En algunos casos en minería aluvial se utilizan también planchas amalgamadoras. Para esto se requiere eliminar las piedras gruesas, a fin de disminuir el efecto del arrastre mecánico.

El riesgo para la salud de los trabajadores que manejan planchas amalgamadoras es elevado, ya que el mercurio se evapora a temperaturas relativamente bajas. La evaporación durante la aplicación de mercurio a las planchas es tan grande, que la intoxicación de los trabajadores es significativa.

Las pérdidas de amalgama, oro y mercurio utilizando planchas amalgamadoras en circuito abierto pueden ser altas. Además, el riesgo de intoxicación de los operadores por



la evaporación del mercurio durante la preparación de las planchas es elevado. Por esto, éste proceso no se considera recomendable y debe ser evitado.

3.1.1.2. Amalgamación in situ

La amalgamación in situ se aplica solamente en la minería aluvial. El mercurio es echado directamente a la poza de excavación, luego con el movimiento y el transporte de la carga, el oro libre existente se amalgama parcialmente. Esta técnica es utilizada frecuentemente en minas aluviales que tienen el sistema monitor-bomba de gravacanaleta. La amalgamación se realiza tanto en la poza o tajo, como durante el paso de la pulpa por la bomba y la tubería hacia la canaleta. Por la fuerte agitación de la pulpa durante el transporte, una gran parte del mercurio se pulveriza y se pierde en las colas junto con los flóculos de amalgama. Ni el mercurio pulverizado, ni los flóculos de amalgama pueden ser recuperados eficientemente por la canaleta. Las pérdidas de mercurio son sumamente altas y la recuperación de oro fino es baja.

3.1.1.3. Amalgamación en canaletas

Al margen del uso de aparatos amalgamadores diseñados específicamente para este proceso, la amalgamación también puede realizarse en otros artefactos normalmente utilizados para la separación gravimétrica con agua; el artefacto más comúnmente utilizado es la canaleta. La amalgamación en canaletas es frecuentemente practicada tanto en la minería de oro aluvial como en la primaria.

El mercurio se coloca entre las rejillas de una canaleta o en depresiones del piso de la misma. La canaleta se opera entonces de la misma manera que para una separación gravimétrica normal. El oro fino, cuando tiene una superficie limpia, se amalgama en lugar de ser transportado fuera de la canaleta. Sin embargo en muchos casos, el oro pasa por la canaleta sin amalgamarse para luego perderse en las colas (porque la superficie del



oro o del mercurio está sucio). Este proceso al margen de producir una recuperación limitada emite grandes cantidades de mercurio. Muchas veces, la pulpa pasa por un barril de retención antes de llegar a la canaleta, donde se coloca mercurio para una amalgamación previa. Con este dispositivo adicional, las pérdidas de mercurio son aún más altas.

3.1.1.4. Amalgamación en molinos

En la minería primaria, el oro debe ser liberado previamente por trituración y molienda. Muchas veces aprovechan la etapa de molienda para realizar simultáneamente el proceso de amalgamación, es decir una combinación de molienda amalgamación. Aquí, el mercurio se vierte dentro el equipo de molienda y la amalgamación del oro se lleva a cabo en circuito abierto. Este tipo de amalgamación se realiza en los siguientes tipos de molinos.

- A bolas
- De pisones
- Trapiche
- Manual
- A martillos.

En este proceso, una parte de la amalgama se queda en el recipiente del molino (tambor, tazón, etc.). Otra parte sale del molino y es parcialmente recuperado por métodos gravimétricos (canaletas, trampas, etc.) o planchas amalgamadoras. Sin embargo, las pérdidas de mercurio en las colas, especialmente en forma de mercurio finamente molido o harina de mercurio ("floured mercury") son muy altas.



Figura N° 1: Molino Trapiche con planchas amalgamadoras.



Figura N° 2: Canaletas con riflería.

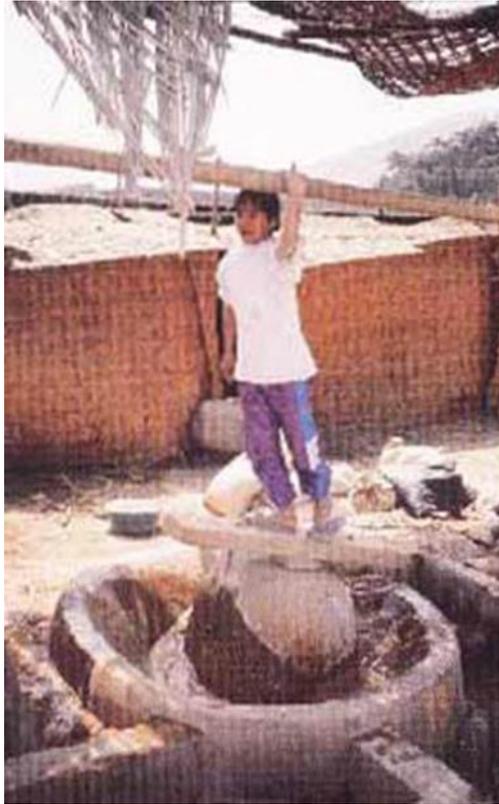


Figura N° 3: Molino/amalgamador de piedra (típicamente trabajo de niños o mujeres) (Nazca, Perú).

3.1.1.5. Amalgamación en concentradores centrífugos

Los concentradores centrífugos "originales", como el Knelson o Falcón fabricados en el Canadá, se encuentran muy poco en la pequeña minería latinoamericana, por diferentes razones. Sin embargo, existen copias realizadas por talleres locales. Estas copias de centrífugas, generalmente no tienen la misma eficiencia que las originales. Por esta razón, estos equipos "caseros", frecuentemente son convertidos en amalgamadores de circuito abierto. La operación en este equipo, consiste en colocar mercurio en el fondo del recipiente cónico y en los espacios anulares del mismo, luego por efecto de la fuerza centrífuga se logra el contacto oro mercurio, produciéndose la amalgamación. Debido a las altas velocidades de flujo circular que ocurren dentro de la centrifugadora, se produce una alta pérdida de mercurio finamente dispersado.



3.1.1.6. Amalgamación en amalgamadores tipo "jackpot"

El oro también es amalgamado en dispositivos del tipo "jackpot", estas son trampas llenas de mercurio, generalmente instaladas a la salida de los molinos o antes de las canaletas. Estos amalgamadores deberían ser evitados por sus altas pérdidas de mercurio, especialmente con carga gruesa.

3.1.1.7. Amalgamación con planchas amalgamadoras:

Las planchas amalgamadoras se utilizan en la minería primaria para la recuperación de oro fino (molido); por esto, estas se colocan a la salida del molino. La pulpa (mezcla de mineral con agua) corre sobre las planchas de cobre o bronce (60% cobre, 40% zinc) ligeramente inclinadas, que tienen una capa de plata aplicada electrolíticamente. Sobre la plata se aplica una capa de mercurio o amalgama (de plata o de oro). El oro al hundirse en la pulpa, se pone en contacto con el mercurio y se queda formando amalgama. 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 (especie de masa plástica). Cuando la capa de amalgama es bastante apreciable, esta se remueve y separa con una espátula de goma.

Cuando se utiliza mercurio dentro el molino, las planchas amalgamadoras sirven para retener parcialmente la amalgama que no queda adentro. En algunos tipos de molinos (de pisones, trapiches) se colocan planchas amalgamadoras en las paredes de estos.

Las planchas tienen que ser limpiadas varias veces al día y ser reacondicionadas para su reutilización, Tales operaciones demandan bastante tiempo e implican por el alto valor del producto bastante riesgo de robo. Se han desarrollado algunas soluciones locales



para resolver el problema de preparación y limpieza de las planchas, como refregar las láminas con orina, savia de Sisal (fique o pita), detergente, etc. Tarde o temprano las planchas requieren un nuevo electroplateado.

Generalmente, la eficiencia de las planchas amalgamadoras no es muy alta (especialmente con material sulfuroso), debido a varias razones:

- En muchos casos, el oro sale del molino cubierto por una pátina de óxidos de fierro, y pasa por la plancha sin amalgamarse
- Arrastre mecánico de amalgama por partículas gruesas de ganga
- El mercurio sobre la plancha se contamina con varias sustancias, que dificultan o inhiben el contacto.

En algunos casos en minería aluvial se utilizan también planchas amalgamadoras. Para esto se requiere eliminar las piedras gruesas, a fin de disminuir el efecto del arrastre mecánico.

El riesgo para la salud de los trabajadores que manejan planchas amalgamadoras es elevado, ya que el mercurio se evapora a temperaturas relativamente bajas. La evaporación durante la aplicación de mercurio a las planchas es tan grande, que la intoxicación de los trabajadores es significativa.

Las pérdidas de amalgama, oro y mercurio utilizando planchas amalgamadoras en circuito abierto pueden ser altas. Además, el riesgo de intoxicación de los operadores por la evaporación del mercurio durante la preparación de las planchas es elevado. Por esto, éste proceso no se considera recomendable y debe ser evitado.

3.1.1.8. Amalgamación manual

En la minería artesanal y aluvial, la amalgamación manual se realiza generalmente con concentrados obtenidos gravimétricamente. Algunas veces, se efectúa también con los "pies". Existen concentrados, especialmente aluviales, muy fáciles y rápidos de amalgamar utilizando un simple balde y un palo de madera, debido a que el oro es limpio y los minerales acompañantes inocuos (arenas negras), obteniéndose una buena recuperación de oro y pérdidas mínimas de mercurio en las colas de amalgamación.

Normalmente, los concentrados sulfurosos requieren mucho más esfuerzo y tiempo (varias horas) para su amalgamación, utilizando a veces un mortero de piedra y otras una batea grande. Si bien el mercurio se encuentra dentro la pulpa, en este caso, los riesgos para la salud de los trabajadores por el alto tiempo de exposición y la inhalación de vapores de mercurio, pueden ser elevados.



Figura N° 4: Amalgamación manual dentro de una batea metálica grande.

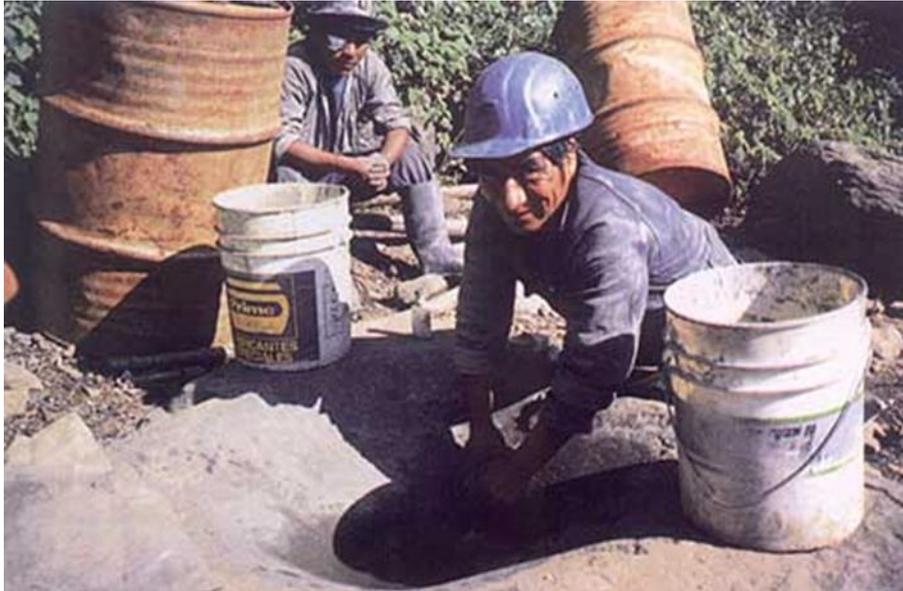


Figura N° 5: Amalgación manual (con una piedra chica dentro de una grande, la piedra grande ya fue utilizada para este propósito en el tiempo de la Colonia).

3.1.1.9. Amalgación en tambores amalgamadores

Los tambores amalgamadores se utilizan frecuentemente tanto en la minería primaria como en la minería aluvial, para amalgamar concentrados gravimétricos. Se encuentran diferentes modelos, como también mezcladoras de hormigón. En algunos casos, los tambores amalgamadores se utilizan simultáneamente para moler y amalgamar concentrados, con pérdidas significativas de mercurio molido en las colas de amalgamación. Los tambores amalgamadores son útiles para efectuar una amalgamación controlada en circuito cerrado, sobre todo, el proceso puede ser muy bien optimizado.

Existen otros equipos para la amalgamación mecánica en circuito cerrado como los "conos amalgamadores".

2.2.2. Procesos aplicados a la separación de amalgama y minerales acompañantes

Sólo en las placas amalgamadoras se obtiene una amalgama bastante libre de minerales acompañantes. En todos los otros procesos arriba descritos, se obtiene una



mezcla de amalgama, mercurio líquido y algunos minerales pesados acompañantes. La amalgama, como "masa pesada", se separa de los otros minerales por métodos gravimétricos. Utilizándose normalmente:

- Canaletas
- Bateas manuales
- Bateas mecánicas
- Elutriadores (separadores hidráulicos)
- Planchas amalgamadoras.
- Centrífugas

Las pérdidas de amalgama y mercurio en las colas con estos dispositivos o equipos pueden ser elevadas. Se pierde una gran parte del mercurio molido (harina de mercurio). Por esto, es indispensable efectuar la amalgamación de manera que se elimine o reduzca la producción de harina de mercurio y flóculos de amalgama.

2.2.2.1. Procesos aplicados a la separación de mercurio libre y amalgama

Dependiendo de la relación mercurio/oro utilizado en el proceso de amalgamación, la amalgama sale "seca" con alto contenido de oro, o "líquida" con poco contenido de oro. Para reducir la cantidad de mercurio molido, es preferible conseguir una amalgama seca. Generalmente en el siguiente paso, el mercurio que no está aleado (mercurio libre) debe ser separado de la amalgama, y en el último paso, el oro debe ser separado del mercurio.

La separación mercurio libre amalgama, generalmente se lleva a cabo por exprimido o estrujado manual, utilizando una tela fina (generalmente la camisa de un minero) o cuero, donde se confina la mezcla mercurio amalgamar. Luego de exprimir, la

amalgama queda sobre la tela como una masa consistente, mientras que el mercurio líquido libre pasa a través de la tela y se recibe sobre una batea u otro recipiente apropiado. Sin embargo, en estos métodos manuales de separación, debido a que el operador se pone en contacto directo con el mercurio, este corre peligro de intoxicación, y por la baja presión aplicada al exprimir, esta operación rinde una pobre eficiencia de separación. Por esto, se recomienda usar guantes de goma o mejor utilizar métodos mecánicos (prensas, centrífugas, etc.).

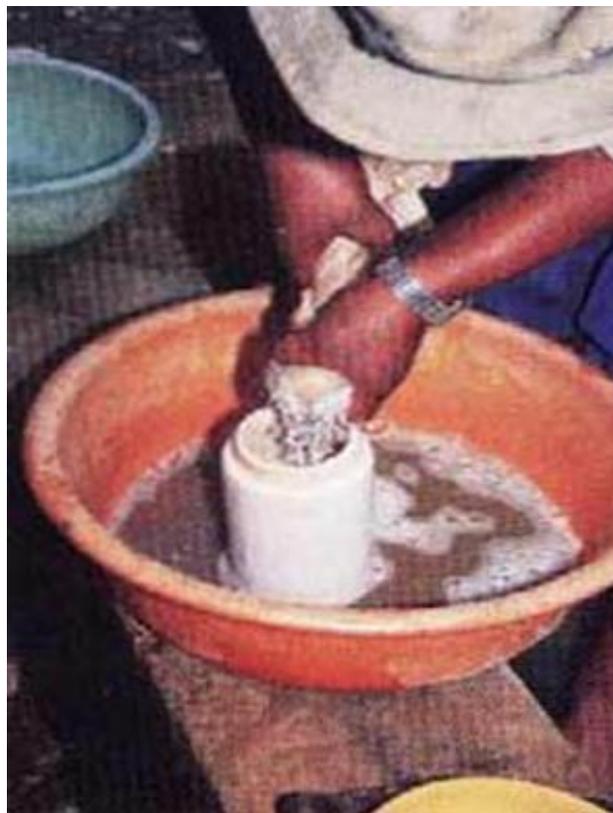


Figura N° 6: Exprimir el mercurio líquido manualmente con un trapo

2.2.2.2. Prensas de amalgama

Para mejorar la separación mercurio libre - amalgama, algunos utilizan prensas para amalgama, estas permiten aplicar más presión que el exprimido manual. Las prensas de amalgama, al menos los modelos más sencillos, pueden ser fabricados localmente a



bajo costo. Cualquier buen taller de metalmecánica, puede fabricar fácilmente las prensas para amalgama, utilizando uniones de rosca de tipo comercial.

En general, si previo al exprimido manual o prensado mecánico, la mezcla se introduce en agua caliente para calentarla, la separación mercurio amalgama es mucho más fácil y eficiente. Al elevar la temperatura se disminuye la viscosidad de sus componentes, dando una mejor separación de mercurio y amalgama en una tela o una prensa.

2.2.2.3. Centrífugas

En algunos casos se utiliza la fuerza centrífuga, para separar eficientemente la amalgama del mercurio libre. Se coloca la amalgama exprimida a mano, en un tubo con tapas de malla metálica fina. Este tubo se coloca dentro una centrífuga (p.ej. un concentrador Knelson). Las altas revoluciones del aparato generan una fuerza centrífuga que ayuda a que más mercurio libre salga del tubo y sea recuperado en el recipiente exterior. Así se obtiene una amalgama muy seca, que facilita después la separación oro-mercurio.

2.2.2.4. Procesos aplicados a la separación de oro y mercurio

La separación de la amalgama en sus componentes, oro y mercurio, se la puede realizar por vía térmica o química. Por lo general, en la pequeña minería se prefiere la separación térmica.

2.2.2.5. Separación térmica

El mercurio evapora a una temperatura de alrededor de 360 °C. Por lo tanto, la amalgama debe ser calentada a una temperatura lo suficientemente mas alta para evaporar el mercurio. El oro permanece en el recipiente calentado como producto final.



Desafortunadamente, esta separación térmica es muchas veces practicada de una manera muy directa y elemental, a "crisol abierto" o "quema" abierta, liberando el vapor de mercurio altamente tóxico directamente a la atmósfera, contaminando el medio ambiente, poniendo en peligro la salud del trabajador y de la población que habita en el entorno. Por lo general, para este propósito se utilizan calentadores a gas o sopletes de diferente índole. La mayor parte del mercurio vaporizado se asienta en los alrededores del lugar de la quema (normalmente el campamento minero), contaminando suelos, alimentos, y seres vivos del lugar. Con el tiempo y las lluvias, el mercurio sedimentado en la capa superficial de la tierra, es transportado a los ríos próximos. En muchos casos, la amalgama se quema dentro la vivienda o la cocina del minero.

Existen diversas formas consideradas algo "avanzadas" para realizar esta quema en ambiente semicerrado, estas incluyen las siguientes:

- Dispositivo con un recipiente y un plato.
- Sistema cubierto: dependiendo de la región, a veces con una hoja de bananero, papas o un zapallo, colocados sobre la amalgama en la bandeja de quemado, estas ayudan a recuperar parte del vapor de mercurio, por condensación sobre su superficie.

Desafortunadamente la separación oro mercurio, muy excepcionalmente se realiza en circuito cerrado utilizando una retorta. Sin embargo, existen algunas minas donde utilizan retortas de fabricación industrial o casera.



Figura N° 7: "Quema" de la amalgama al aire libre.



Figura N° 8: Retorta de fabricación industrial.

2.2.2.6. Separación química

También existen métodos químicos para la separación oro mercurio de la amalgama. Podemos citar el método de disolución de mercurio de la amalgama en ácido nítrico. Este proceso lo utilizan sólo algunas minas auríferas. Si bien la eficiencia de separación de los dos metales es buena, los impactos ambientales por la emisión de vapores y soluciones residuales pueden ser graves. Más aún, los operadores del sistema se exponen peligrosamente a la fuerte emisión de gases nitrosos durante el proceso.



2.2.3. Pérdidas de mercurio durante los procesos tradicionales

Se ha podido observar que las emisiones de mercurio al medio ambiente se producen en las siguientes etapas:

- 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 canaletas, en molinos, en planchas amalgamadoras, etc.).
- Emisiones de mercurio después de la etapa de preconcentración o concentración (por la amalgamación de concentrados).
- Emisiones de mercurio durante la separación de oro y mercurio (generalmente al quemar la amalgama, alguna vez en la disolución del mercurio con ácido nítrico).
- Emisiones de mercurio durante la refinación del oro (en las casas compradoras de oro).
- Emisiones de mercurio durante su manejo y transporte (derrames de mercurio).
- Desechado de "mercurio cansado".

El uso de mercurio en circuito abierto es el problema que sin duda acarrea las mayores pérdidas de mercurio en la producción de oro. Las minas artesanales, que utilizan mercurio directamente en sus molinos para realizar molienda y amalgamación simultánea, pierden entre 5 y 10 kg de mercurio (en casos extremos hasta 25 kg) para recuperar 1 kg de oro. Por lo general, el intento de recuperar amalgama lo realizan con simples trampas gravimétricas o planchas de amalgamación. Por esto las colas contienen aún oro libre, amalgama y mercurio libre.

Experiencias y evaluaciones realizadas en ambos casos (uso de mercurio en circuito abierto en la minería aluvial y adición de mercurio al molino en minería



artesanal), demostraron que la recuperación de oro, por lo general, es menor que cuando se utiliza un equipo de concentración gravimétrica cuidadosamente diseñado y operado. Por falta de conocimientos técnicos los mineros no logran por sí mismos esta optimización; por esta razón siguen utilizando mercurio en circuito abierto, aunque, desde el punto de vista técnico-económico, la amalgamación en circuito abierto no presenta ninguna ventaja para los mineros. Un menor consumo de mercurio y una mayor recuperación de oro, implica un ingreso más alto, hecho que los mineros entienden bien. Un concentrado muy rico implica menos colas de amalgamación (menor contaminación), o en algunos casos, la posibilidad de fundición directa. Por lo tanto, mejorar los procesos de concentración gravimétrica juega un papel importante en la reducción de la contaminación con mercurio.

Durante la amalgamación de concentrados, inevitablemente se pierde en las colas un porcentaje del mercurio utilizado, debido a que estas por lo general no son depositadas de manera segura. La producción de "mercurio molido" o "harina de mercurio" 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 que se realice la amalgamación.

En la minería aluvial existen concentrados gravimétricos, donde el oro es limpio y los minerales acompañantes son inocuos. En estos casos, con una amalgamación cuidadosa de concentrados, las pérdidas de mercurio o amalgama en las colas son mínimas (p.ej. $< 0,5$ % de mercurio utilizado). Sin embargo, existen concentrados donde algunos de sus componentes contaminan el mercurio, o el mismo oro está cubierto por pátinas de diferentes sustancias (p.ej. óxidos). Esto se observa especialmente en la amalgamación de concentrados sulfurosos de minas primarias. Aquí las pérdidas de



mercurio en forma de harina de mercurio pueden exceder el 10 % del mercurio utilizado en el proceso.

En 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, p.ej. una retorta). El porcentaje de mercurio en la amalgama, mayormente depende de la granulometría del oro y de la manera como se exprime la amalgama para separar el mercurio libre. 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.

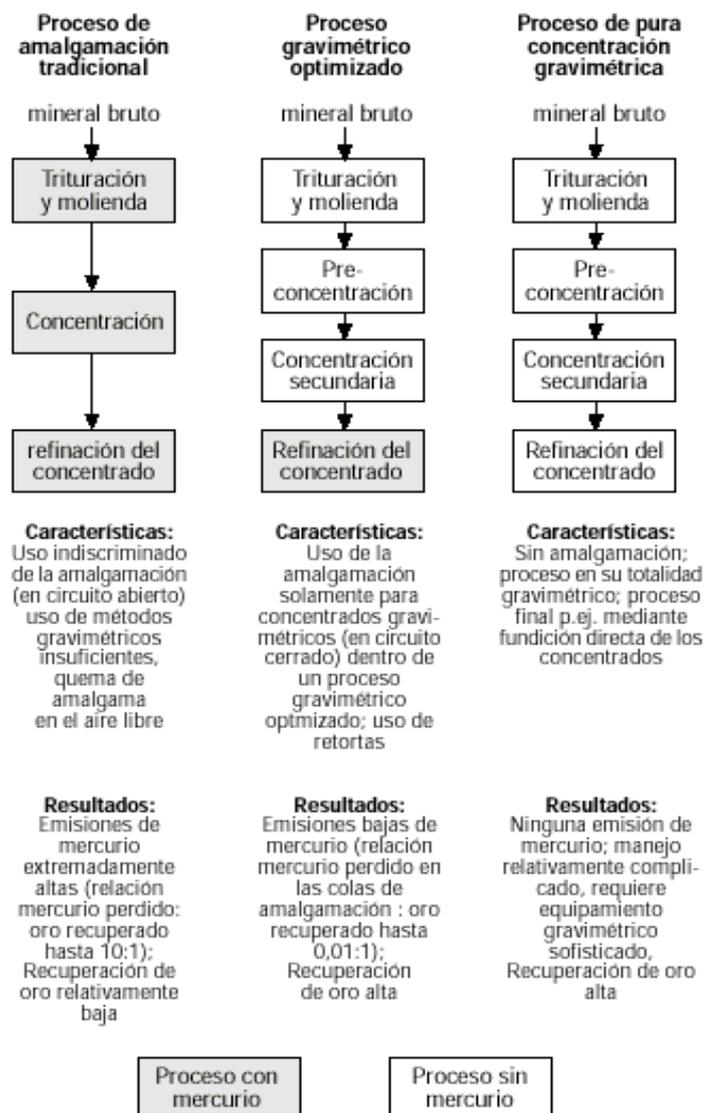
Las pérdidas de Hg durante la limpieza de la esponja de oro (producto de la quema de amalgama), son muy variables (dependiendo de la granulometría del oro, tamaño del bollo esponja, tiempo y temperatura de la quema etc.) y pueden alcanzar hasta algunos porcientos del peso de oro. Generalmente los compradores 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 (también mercurio). Los vapores de mercurio y otros metales pesados (plomo, antimonio, etc.) que se desprenden durante la fundición, generalmente se dispersan en la misma habitación (o la tienda) o son expulsados hacia el exterior de la misma. Estas tiendas a veces se concentran en una sola calle de las poblaciones mineras. Se detectaron altas concentraciones de mercurio en la orina de las personas involucradas en este gremio, como en el de los vecinos.

Emisiones por derrame accidental o rotura de recipientes, ocurren durante el transporte y manejo del mercurio. Como el mercurio es una sustancia cara, los mineros generalmente tratan de recuperar al máximo el mercurio derramado. Los derrames de mercurio en las habitaciones o cocinas de los mineros, por la evaporación del mismo a

temperatura ambiente, son un peligro permanente para la salud de los mineros y sus familias.

El mercurio por el uso frecuente o intenso (p.ej. mercurio varias veces exprimido) se contamina y pierde su poder de amalgamación. Los mineros desechan este "mercurio usado".

COMPARACIÓN ESQUEMATIZADA DE PROCESOS CON Y SIN AMALGAMACIÓN EN OPERACIONES TÍPICAS





2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. Aspectos generales

En todos los tiempos el oro, ha concitado el interés humano porque este metal ha sido empleado principalmente con fines monetarios o decorativos.

Su rareza e inalterabilidad han hecho de él un símbolo de riqueza y poder.

El oro es un elemento químico de número atómico 79, que está ubicado en el grupo 11 de la tabla periódica. Es un metal precioso blando de color amarillo. Su símbolo es Au (del latín aurum, ‘brillante amanecer’).

Es un metal de transición blando, brillante, amarillo, pesado, maleable y dúctil. El oro no reacciona con la mayoría de los productos químicos, pero es sensible y soluble al cianuro, al mercurio, al agua regia, cloro y a la lejía.

Este metal se encuentra normalmente en estado puro, en forma de pepitas y depósitos aluviales. Es un elemento que se crea gracias a las condiciones extremas en el núcleo colapsante de las supernovas. Cuando la reacción de una fusión nuclear cesa, las capas superiores de la estrella se desploman sobre el núcleo estelar, comprimiendo y calentando la materia hasta el punto de que los núcleos más ligeros, como por ejemplo el hierro, se fusionan para dar lugar a los metales más pesados (uranio, oro, etc.), un estudio sugiere que el oro del planeta provino de la colisión de estrellas de neutrones. Otras teorías apuntan a que el oro se forma de gases y líquidos que se elevan desde la estructura interna de la Tierra, los cuales se trasladan a la superficie a través de fallas de la corteza terrestre. Sin embargo, las presiones y temperaturas que se dan en el interior de la Tierra no son suficientes como para dar lugar a la fusión nuclear de la cual surge el oro.



2.3.2. Procesos gravimétricos utilizados para la recuperación del oro

2.3.2.1. Técnicas y equipos gravimétricos utilizados para una minería no contaminante

A continuación, presento equipos y técnicas que pueden servir para hacer minería aurífera en forma limpia. La mayoría de las técnicas son conocidas, muchas de ellas utilizadas ampliamente, pero a menudo debajo de sus posibilidades. Donde los autores tienen experiencias propias se da una descripción de las ventajas, desventajas, posibilidades y limitaciones de los equipos, como se han presentado en el trabajo de campo. Las técnicas presentadas pueden ser utilizadas en forma individual o como parte de sistemas más complejos.

a) Bateas para oro

Las bateas, junto con las canaletas, son el instrumento de mayor importancia en la pequeña minería aurífera. Tanto en la minería aurífera aluvial como en la minería primaria, las pequeñas operaciones dependen fuertemente del proceso de separación con bateas. En efecto, varias minas pequeñas y artesanales no utilizan ningún otro procedimiento para la concentración del mineral. Gracias a su alta selectividad, las bateas para oro son únicas e irremplazables en todas las fases de la pequeña minería, es decir, en el reconocimiento, la exploración y en el proceso interno de control de producción y preparación de la producción. Más aún, las bateas para oro se utilizan frecuentemente en la fase preparatoria para limpiar o enriquecer los preconcentrados. Una batea para oro es un aparato simple, generalmente circular, con un corte transversal en forma trapezoidal o triangular, a pesar de que también se utilizan cortes transversales en forma de óvalo u oblonga, y bateas en forma rectangular. A medida que el minero mueve la batea, el oro se reúne en el fondo.



Existen dos diferentes tipos de movimiento: uno rotatorio y otro longitudinal. Lo importante es que la pulpa en la batea forme un lecho fluidizado para que con el movimiento las partículas más pesadas puedan ir hacia el fondo.

Si el material del fondo de la batea se encuentra compactado, el operador pierde sobre todo el oro fino y las láminas.

Existen básicamente dos maneras en las que se opera una batea para oro:

- La batea norteamericana (corte transversal trapezoidal) y también las bateas rectangulares se mueven de adelante para atrás para desplazar el material más liviano fuera de la batea. Muchas veces, una sección de la batea tiene estrías que ayudan a retener el oro en la misma.
- Las otras bateas (cortes transversales triangulares o cóncavos) deben ser rotadas para que su centro se mantenga casi inmóvil (pero suspendido), mientras que una combinación de corriente de agua y aceleración radial llevan las colas (o livianos) fuera de la batea.

El minero repite este proceso una y otra vez hasta que sólo el oro, o la arena negra conteniendo el oro, permanezcan en la batea. Las bateas de oro se fabrican de diversos materiales:

- Metal
- Goma
- Madera
- Calabazas partidas
- PVC
- Otros



Las bateas de madera o fierro (oxidadas para que la superficie sea más áspera y que el color sea más oscuro) son las que mayormente son utilizados en Latinoamérica, a pesar de que las bateas hechas de PVC negro ofrecen varias ventajas: son resistentes a las rajaduras, livianas y generalmente durables, y el oro se muestra claramente en ellas. En el uso de la batea hay que tener cuidado de no perder oro fino por flotación. Este efecto, que se presenta también en otros procesos gravimétricos (canaletas, mesas, etc.) significa que el oro, debido a su superficie hidrófoba (una característica que puede ser reforzada por un recubrimiento de grasas o aceites) no se hunde, sino que flota en la superficie del agua. Mientras que en el proceso de flotación (como alternativa a la concentración gravimétrica, ver subtítulo 5.6.2) se aprovecha esta característica, en el caso de la concentración gravimétrica produce pérdidas. Por eso hay que evitar la contaminación de la carga con aceites o lubricantes. Unas gotas de detergente o jugos de ciertas plantas, como la savia del sisal (fique o pita), pueden ayudar a prevenir la flotación.

El rendimiento de las operaciones de separación de oro sólo con bateas es generalmente bastante bajo. Si la carga se separa fácilmente, un minero puede manejar cerca de 100 bateas llenas pesando aprox. 10 kg cada una en un día de trabajo, dando así un rendimiento aproximado de 1 t/d. Las partículas gruesas de grava en la carga son retiradas antes con una malla o a mano mientras se mueve el material en la batea. Cuanto más fino el oro, más altas las pérdidas debido a la descarga inadvertida de partículas finas de oro.

Las bateas para oro son de fácil manufactura. Un poco de trabajo simple de laminación es suficiente para convertir la tapa de un tambor de diesel o cianuro vacío en una batea para oro. En talleres pequeños también se producen bateas de madera, de PVC o PE.



El grado de recuperación con batea depende en gran parte de la habilidad del operador. Con una operación cuidadosa la recuperación puede ser muy buena, hasta partículas de cerca de 20 mm. Por esta razón las bateas también son artefactos importantes para el control durante el proceso de concentración gravimétrica, tanto en minas aluviales como en minas primarias.

b) Canaletas

Las canaletas son muy usadas en la minería aurífera, principalmente en las operaciones pequeñas de minería aurífera aluvial y en la concentración de mineral primario molido. No hay duda de que en la pequeña minería aurífera las canaletas son el equipo más importante para la concentración gravimétrica. Existen miles de minas en todo el mundo que exclusivamente trabajan con canaletas (y bateas). Calculando la capacidad instalada, la canaleta es uno de los artefactos más utilizados para el procesamiento de minerales pesados. Generalmente consisten de un canal, a través del cual fluye la pulpa, y de varios materiales (trampas) para la captura de minerales pesados, los cuales se hunden hasta el fondo, mientras el agua saca hacia afuera a los sólidos livianos. Existen muchas formas y tipos de canaletas, tanto para trabajar oro primario (de vetas) como oro aluvial.

VENTAJAS

- Baja costo
- Gran capacidad
- No necesita motor
- Buena recuperación (en caso de un buen diseño y manejo)
- Fácil operación
- Alto grado de concentración



- Recuperan también oro sucio o parcialmente entre crecido.

DESVENTAJAS

- Necesita mucha mano de obra (para lavarlo frecuentemente).
- Baja recuperación de sulfuros acompañantes.
- Descarga del producto aurífero en forma discontinua.

El funcionamiento de la canaleta está determinado por los siguientes factores:

Existen dos formas básicas de pisos, que influyen en el mecanismo de separación.

I) Piso con rejillas (trampas gruesas, a veces encima de alfombras) En esta forma, la pulpa tiene mucha turbulencia (que es necesario para el efecto "remolino"). Las rejillas se prestan para recuperar eficientemente el oro grueso, pero generalmente pierden la mayor parte del oro fino. Además, se recupera mucho preconcentrado, que dificulta y aumenta el trabajo para obtener el producto final.

II) Piso con alfombras (bayetas, frazadas, alfombras, etc.) En esta forma, la pulpa fluye con poca turbulencia. La ventaja es una buena recuperación de oro fino y la obtención de una cantidad reducida de preconcentrado. Según el tipo de carga, se requiere un lavado frecuente. Este tipo de canaleta también se denomina "mesa estacionaria" (en inglés "blanket table" o "strake"). Estas canaletas no sólo se utilizan en la minería artesanal, sino funcionan también en la minería aluvial con oro fino. Una forma "intermedia" es el uso de metal expandido (metal desplegado) encima de alfombras, que ha dado buenos resultados en la minería aluvial. En el caso de tener una carga con oro grueso y fino, se recomienda tamizar la carga y tratar cada tamaño en canaletas separadas.



Figura N° 9: (Canaleta) experimental; alta turbulencia: tradicional, baja turbulencia: modificada.



Figura N° 10: Canaletas con diferentes pisos (alfombras, metal expandido) para diferentes tamaños de carga clasificados por un trómel en la salida de un molino a bolas.

Diseño y operación de la canaleta

Por la variedad de cargas tratadas, no se puede dar recomendaciones específicas sobre la aplicación de canaletas. Generalmente, hay que seguir las reglas siguientes:



- 1) En la minería aluvial hay que eliminar piedras estériles gruesas antes de la alimentación a la canaleta. El grano más grande de la alimentación no debe superar el tamaño de la pepa más grande probable.
- 2) La carga debe ser tratada, según el tamaño del oro, con diferentes tipos de trampas. Varios tipos de corrugaciones y cubiertas se utilizan para obtener una superficie de fondo "áspera" de tal manera que el oro se pueda quedar atrapado en el fondo. Los materiales más comunes para corrugaciones (rejillas o "rifles") o cubiertas, incluyen:
 - piedras
 - rejillas de madera o metal
 - estera de goma (pisos utilizados en automóviles)
 - estereras de sisal o coco
 - tela fina y áspera, como corduroy, terciopelo, bayetas
 - bambú partido
 - rejillas de metal expandido (expanded metal)
 - alfombras de diferente tipo
 - musgo
 - varias combinaciones de los materiales arriba nombrados, etc.

La selección del piso o cubierta depende no sólo de las necesidades metalúrgicas, sino también de la disponibilidad de los diferentes materiales en cada región.

Oro grueso (grano de arroz y más grandes): rejillas de metal "1 x 1" o metal expandido, encima de alfombra.

Oro mediano (grano de arroz hasta grano de azúcar, u oro laminado): alfombra tipo "Nomad".



Oro fino (grano de harina): alfombra tipo "Multiouro liso".

- 3) **La inclinación de la canaleta** debe ser de tal manera que la carga no se sedimente (emplye) sobre el piso, generalmente entre 10 y 20% (10 a 20 cm de caída por metro de canaleta). En algunos casos, para mineral primario con oro fino, que requieren una molienda menor a 0,1 mm, la inclinación óptima puede alcanzar valores muy bajos de hasta 4%. Esto se debe determinar experimentalmente.
- 4) **La frecuencia del lavado** de las cubiertas depende del tonelaje tratado y del contenido de minerales pesados acompañantes. Generalmente en la minería aluvial hay que retirar los concentrados una vez por día, en la minería primaria hay que lavar las alfombras cada hora (depende principalmente del contenido de minerales pesados acompañantes, como sulfuros etc.). Dejar pasar mucho tiempo entre lavados resulta en la saturación del piso con material pesado y pérdidas significativas del material valioso. La frecuencia óptima se debe determinar experimentalmente, p.e. controlando colas con la batea.
- 5) **La densidad de la pulpa** (relación carga: agua) debe ser de alrededor de 1:4 en peso para material aluvial con oro grueso o mediano, hasta 1:10 para mineral primario con oro fino.

La mayoría de los operadores que utilizan canaletas con rejillas gruesas rastrillan los espacios entre las rejillas para asegurarse de que el material entre las mismas no se compacte. En este procedimiento se pierde en particular el oro fino en las colas. Para prevenir este problema son comunes las "rejillas hidráulicas".

Aquí la inyección del agua es utilizada para prevenir el compactamiento de la carga en la canaleta y para ayudar al escape de los minerales livianos. Se estima que con las rejillas hidráulicas la recuperación es 5-10% más alta que la recuperación con rejillas



convencionales. Existe el prejuicio de que las canaletas no pueden recuperar suficientemente el oro fino. Más bien, se ha podido mostrar y comprobar su eficiencia y fiabilidad para recuperar oro fino hasta 30mm.

Canaletas en canales excavados

Las canaletas en canales excavados son usadas casi exclusivamente en la minería aluvial. Consisten de una trinchera, con o sin paredes de albañilería y con condiciones de suelo y ángulos de inclinación variables. A medida que una carga no clasificada corre a través de este canal en forma de pulpa espesa, algo del material se deposita y es tratado como un preconcentrado. El uso de canaletas hechas en canales excavados involucra altas pérdidas de oro, sobre todo de partículas finas.

Otras canaletas

Existen otras formas diferentes de canaletas, como:

- Canaletas en forma de abanico
- Canaletas con fondo vibratorio
- Plane tables, etc.

Que se utilizan en la pequeña minería aurífera en algunas minas. Su descripción se encuentra en la literatura correspondiente. Especialmente los "plane tables" pueden ser interesantes para la pequeña minería aurífera primaria. Ensayos con este equipo son actualmente ejecutados por los autores.

c) Jigs

El jig es un equipo de preconcentración o concentración gravimétrica muy utilizado en la minería de minerales pesados (estaño, wolframio, etc.) y también en la



minería aurífera. El jig permite separar los componentes de un mineral de acuerdo a su peso específico, en un medio acuoso que alterna la sedimentación libre y la sedimentación obstaculizada, gracias a la pulsación del líquido producida por diferentes medios. En la minería aurífera los componentes pesados están constituidos por el oro y diferentes sulfuros (o por arenas negras en la minería aluvial), en tanto que los livianos son cuarzo y diferentes tipos de roca.

Jig hidráulico

Aquí la pulsación es producida hidráulicamente (por presión de agua que mueve una válvula de diafragma). Originalmente, este principio fue aplicado en el "Panamerican Pulsator Jig", y después simplificado en jigs hidráulicos rústicos tipo "Baltar".

VENTAJAS

- de construcción simple
- no requiere motor
- bajo costo de inversión y mantenimiento

DESVENTAJAS

- difícil de controlar
- alto requerimiento de agua
- requiere ajuste permanente

Jig mecánico

Existen muchos tipos de jigs mecánicos, que se han desarrollado para varios minerales y usos. Generalmente, en la minería aurífera se encuentran los siguientes:

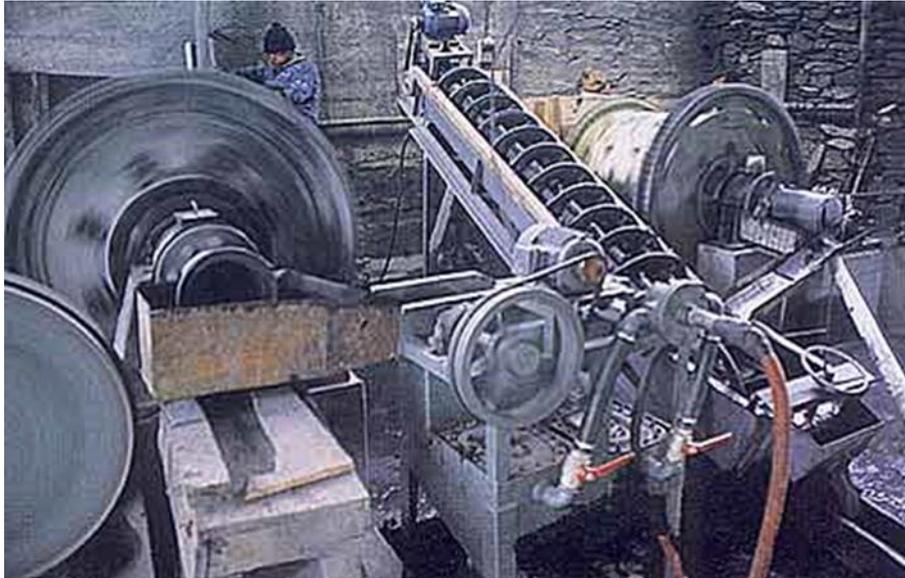


Figura N° 11: Jig tipo "Denver Mineral Jig" en un circuito de molienda.

La pulsación requerida es producida mecánicamente por una biela y diafragma accionados por un motor.

Ventajas

- versátil, se puede adecuar a todo tipo de materiales
- ajustadas sus variables, no requiere de mayor atención

Desventajas

- requiere motor

Operación del jig

Las variables de operación son similares en todos los tipos de jigs:

- abertura del cedazo
- material para la cama
- agua de inyección
- golpe (amplitud)
- velocidad o frecuencia de golpe
- alimentación (t/h)
- granulometría de la alimentación(t/h)



Posibilidades de aplicación del jig

Las posibilidades de uso del jig en la minería son amplias. Particularmente en la minería aurífera puede ser utilizado tanto en la filoniana (de vetas o primaria) como en la aluvial. La experiencia ha demostrado que resulta muy eficiente en la recuperación de oro laminar y esponjoso, donde difícilmente es igualado por otros equipos gravimétricos.

En la minería primaria puede instalarse inmediatamente después del molino primario, para recuperar el oro grueso, el oro laminar, el oro esponjoso y los sulfuros gruesos liberados, para impedir su retorno innecesario al molino en un circuito cerrado, evitando una mayor laminación del oro y la sobremolienda de los sulfuros que son contaminantes potenciales. También puede utilizarse para el enriquecimiento complementario de productos procedentes de otras etapas.

En la minería aluvial puede también utilizarse como concentrador primario en vez o antes de las canaletas o utilizarse para el enriquecimiento complementario de preconcentrados.

Sobre la operación de los jigs se encuentran todos los detalles necesarios en la literatura correspondiente. Al contrario de las canaletas, los jigs necesitan operadores bien entrenados para obtener resultados buenos.

Los jigs se pueden producir localmente en talleres metal-mecánicos.

d) Mesas concentradoras

Las mesas concentradoras son aparatos de concentración gravimétrica con flujo laminar sobre una superficie inclinada. Aquí se habla principalmente de los tipos con movimiento longitudinal vibratorio, donde las partículas de mineral se diferencian formando bandas en abanico (cejas), según su peso específico (y la granulometría). Otros tipos de mesas (mesas de banda, mesas basculantes, mesas de paño sin fin, mesas redondas, etc.) son raramente usadas en la pequeña minería y por esto no se describen aquí en detalle.

La mesa con movimiento longitudinal vibratorio (mesa vibradora) está muy difundida principalmente en la minería del estaño, wolframio y oro.



Existen de diferentes tipos y marcas. En la minería aurífera se usan especialmente los tipos Wilfley y Deister. Las diferencias entre unas y otras son mínimas, principalmente en el mecanismo del cabezal, la geometría del tablero y el tipo de enrriflado. Para el último paso de limpieza de concentrados, por ej. antes de la fundición directa, se encuentra en algunas minas también mesas tipo "Gemini".

De acuerdo a su modelo y tamaño, las mesas se utilizan para concentrar minerales finos y ultrafinos con una capacidad hasta un máximo de 1,5 t/h por unidad.

Las mesas vibradoras permiten una amplia variación en sus parámetros operativos y, de esta forma, se pueden adaptar al material de alimentación correspondiente. Debido a que el proceso de concentración se lleva a cabo a la vista sobre el tablero de la mesa, cualquier cambio en los parámetros (inclinación longitudinal y transversal, cantidad de agua, etc.) resulta en cambios en el comportamiento del material, que pueden ser visualizados inmediatamente. Se pueden tomar muestras directamente durante la operación, utilizando bateas para oro, por ejemplo. Por lo tanto, la optimización de esta operación se lleva a cabo de una manera simple y puede ser realizada por operadores aprendices.

Debido a la distribución del material en forma de un abanico sobre la tabla de la mesa, uno puede obtener bandas específicas de mineral de una manera selectiva (algo que no ocurre en las espirales, donde las bandas se sobreponen parcialmente unas sobre otras). De esta manera, uno puede separar, al realizar la regulación correspondiente, un concentrado de oro libre de alta riqueza, así como un concentrado de sulfuros, por ejemplo, que contiene oro diseminado, para su posterior tratamiento. Esto implica, por otro lado, que es muy fácil robar el concentrado de alta ley cuando se utilizan las mesas para la fase de limpieza de los minerales.

La efectividad de todas las mesas depende de la homogeneidad del material de alimentación y de la densidad de pulpa -particularmente de la densidad ya que cualquier fluctuación altera las condiciones de transporte del agua hacia afuera de la corriente.

Ventajas:

- descarga continua de productos
- permite obtener toda una gama de productos (concentrados, mixtos, colas)



- comportamiento visible del material sobre el tablero
- costo relativamente bajo (de producción local)
- gran flexibilidad
- manejo y supervisión relativamente simple (t/h)
- posibilidad de recuperar otros minerales valiosos acompañantes
- alta seguridad en las condiciones de trabajo
- buena recuperación y un alto índice de enriquecimiento, poco uso de agua y energía
- posibilidad de su producción en países en desarrollo.

Desventajas:

- precio relativamente alto (en relación a su capacidad)
- requiere alimentación constante (si no, la posición de las cejas varía demasiado sobre el tablero)
- requiere supervisión continua
- requiere motor

Variables de operación

Entre las más importantes se mencionan:

- granulometría de la alimentación
- longitud de golpe (amplitud)
- frecuencia de golpe
- inclinación de la mesa
- cantidad de agua de lavado
- posición de los cortadores de productos.

Explicaciones detalladas sobre la operación de mesas concentradoras se encuentran en la literatura pertinente.

Posibilidades de aplicación

Principalmente se puede usar en la minería aurífera filoniana (vetas), para la recuperación de oro fino y muchas veces para la recuperación de piritas auríferas como

subproducto comerciable. Este último constituye además un contaminante cuando se descarta en las colas a los ríos y lagunas; su separación o recuperación significa una valiosa contribución a los propósitos de mitigación de este impacto ambiental y un ingreso adicional.

Las mesas sirven también para enriquecer preconcentrados gravimétricos obtenidos por otros equipos (canaletas, espirales, etc.) y para producir concentrados de alta ley (que en algunos casos se pueden fundir directamente).

Las mesas se pueden fabricar localmente en talleres metal-mecánicos (mecanismo) y de carpintería (tableros).



Figura N° 12: Mesa concentración gravimétrica.

e) Concentradores de espiral

El concentrador de espiral consiste en una canaleta helicoidal con cuatro a siete vueltas. Su funcionamiento puede ser comparado con el de una batea cónica, donde las partículas livianas se mueven por la acción del agua hacia el borde y las partículas pesadas se concentran en el centro. Se puede considerar al concentrador de espiral como una serie de bateas superpuestas y conectadas.



Las partículas más pesadas se reúnen en el fondo, donde la fricción y el lastre actúan para aminorar la velocidad del material. Debido a la forma de espiral del lecho de la canaleta, las fuerzas centrífugas en la pulpa llevan al material más liviano hacia afuera, hacia el borde de la espiral, mientras que el material pesado permanece adentro.

Los modelos modernos de un diseño relativamente simple de espirales (tal como un Reichert) han rebasado gradualmente los tipos antiguos de espirales más complicados (espirales tipo Humphrey o Reichert WW6) con alimentación de agua de lavado y cortadores de concentrado en diferentes puntos a lo largo de la espiral.

Al final de las espirales modernas, los cortadores dividen el producto en cuatro diferentes fracciones: concentrados, mixtos, colas y agua. Existen tipos específicos de espirales, utilizados para la limpieza realizada en una etapa posterior sobre los concentrados enriquecidos o sobre las cargas con alto contenido de minerales pesados (las espirales de mediano grado y de alto grado tienen más salidas para los concentrados, pero muy raramente son utilizadas en el procesamiento de oro).

La forma helicoidal hace posible la combinación de varias espirales en una sola columna (dúplex, triplex). La mayoría de las concentradoras espiral están hechas de plástico o de resina sintética, de fibra de vidrio reforzada, con cubierta de poliuretano.

Las espirales pueden ser utilizadas para una variación de tamaño de grano desde 2 mm hasta aprox. 30 mm. Por lo general, las espirales se caracterizan por su alta recuperación, pero también por su bajo factor de enriquecimiento, y es debido a este motivo que las espirales son utilizadas exitosamente en la fase de preconcentración o como "scavenger" (para la recuperación de minerales residuales de valor de las colas). Las espirales no son apropiadas para el enriquecimiento de los concentrados obtenidos a través del lavado en canaletas. Sin embargo, no hay duda que las espirales pueden ser utilizadas efectivamente incluso como un reemplazo de las canaletas, combinadas con otro equipo para la concentración secundaria de preconcentrados (mesas concentradoras, por ejemplo).

Descripciones detalladas sobre el manejo de espirales.

Las espirales permiten tener una producción continua de preconcentrados, así como también extraer un producto intermedio (como sulfuros) y son extraordinariamente



útiles para la extracción de lodo del material, debido que la mayor parte del agua, junto con las partículas ultrafinas, se extrae separadamente.

Las espirales no requieren de impulsión motriz, requieren poco mantenimiento, también son resistentes al desgaste mecánico y cada unidad puede tratar hasta 2 t/h, requieren poco espacio y son fáciles de operar.

En comparación con las mesas vibradoras y con los concentradores centrífugos, las espirales son significativamente más económicas.

Ventajas

- Manejo simple
- Buena recuperación
- No requiere motor
- Alta capacidad (hasta 50 t/d para una espiral simple)
- Precio moderado

Desventajas

Necesitan grandes diferencias de altura entre la alimentación y la descarga; para obtener esta diferencia se puede aprovechar el gradiente natural de alguna ladera. Las plantas localizadas en terrenos más o menos planos necesitan bombas para alimentar la pulpa a las espirales, lo cual implica una inversión adicional; las bombas son sometidas a un desgaste pronunciado debido a la naturaleza abrasiva del material. Las espirales necesitan ser operadas con una densidad de pulpa entre 30-40%, para alcanzar resultados óptimos de concentración. Mientras la pulpa proveniente de un molino de bolas a menudo tiene que ser diluida para obtener esta densidad, la pulpa proveniente de un proceso de concentración gravimétrica con canaletas a veces está demasiado diluida para ser alimentada a las espirales. Antes de alimentar a la espiral, esta pulpa debe ser espesada (puede ser mediante un clasificador de caja en punta, o por medio de un hidrociclón y una bomba). Las espirales pueden ser operadas por un mínimo de empleados. Aún con un solo hombre de turno, que esporádicamente controle las operaciones, se puede lograr un ahorro significativo en fuerza de trabajo, al contrario que con las canaletas o mesas. Esto implica una ventaja para el sector formal minero, pero es considerado más como una desventaja en la pequeña minería debido a la pérdida de puestos de trabajo. Los



requerimientos técnicos para su producción (taller experimentado en manejo de plásticos) dificultan la construcción local de concentradores a espiral. Asumiendo que existiese una demanda adecuada, podrían ser producidos a escala industrial por compañías especializadas en el procesamiento de plásticos.

Al final de la espiral están las salidas de los productos (concentrado, mixtos, colas y agua). El agua generalmente contiene los lodos. Mediante los cortadores se puede definir el ancho de la ceja del concentrado y de los mixtos.

Según la posición de los cortadores, se pueden obtener los siguientes productos:

Las concentradoras a espiral antiguas que tienen cortadores-colectores de concentrado en cada vuelta, no producen mixtos.

Más información sobre la operación de espirales se consigue en la literatura pertinente.

Utilización de la espiral en la minería aurífera

La espiral se utiliza principalmente para la preconcentración de materiales auríferos, tanto primarios como secundarios. Otro uso es, para recuperar el oro y las piritas auríferas todavía existentes en las colas de los ingenios primarios ("scavenger"). Así se pueden recuperar al máximo los valores remanentes, evitando además la contaminación del medio ambiente con piritas. Por lo demás, se obtiene colas deslamadas (sin partículas finas), que pueden retenerse en pozos de sedimentación, las aguas lodosas se pueden tratar en estanques de decantación (con o sin el uso de floculantes, según el caso) para evitar la contaminación de los ríos. En caso de escasez de agua, se puede recircular la misma. El uso de espirales en la pequeña minería aluvial es restringido por la dificultad de clasificar un gran volumen de carga a $< 2\text{mm}$.



Figura N° 13: Concentrador espiral.

f) Concentradores centrífugos

Los concentradores centrífugos constituyen la principal innovación realizada a los implementos de concentración gravimétrica de oro. En un tiempo muy corto, han ganado gran aceptación para la recuperación gravimétrica de oro en minas grandes; frecuentemente en los circuitos de molienda para separar oro libre y evitar sobremolienda y antes de plantas de cianuración o flotación para recuperar el oro grueso. También existen muchas aplicaciones en plantas industriales en la minería aurífera aluvial. Otra aplicación especial para los concentradores centrífugos es la recuperación del oro como un producto secundario, por ejemplo, en canteras de grava. Todos los 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 están basados en el mismo principio, pero difieren en su diseño técnico. Se encuentran los concentradores Knelson, Knudsen y Falcón.

Existen dos tipos principales de centrífugas:

- centrífugas sin inyección de agua en contracorriente (Knelson, algunos modelos de Falcón)
- centrífugas con inyección de agua en contracorriente (Knelson, algunos modelos de Falcón).

Como promedio, el tamaño de las partículas aptas para este proceso varía entre 30 mm y 1-4 mm, dependiendo del tipo y modelo de centrifugadora utilizada.

La recuperación de oro libre puede ser buena bajo las siguientes condiciones:

- cuando la alimentación está clasificada en rangos de tamaño bien delimitados
- presencia de pocos minerales pesados acompañantes gruesos.

Las centrífugas ofrecen buena seguridad contra robos y ahorran fuerza de trabajo significativamente (lo cual puede ser una desventaja en la pequeña minería). Con las centrífugas se pueden lograr altos radios de enriquecimiento. Para la posibilidad de fundición directa, pero a menudo se necesita otro equipo más (p.ej. una mesa concentradora). En los circuitos de molienda, los concentradores centrífugos son utilizados efectivamente para recuperar el oro liberado.

Una desventaja de las centrífugas actuales es que este equipo por lo general no trabaja verdaderamente de manera continua, es decir, la operación debe ser periódicamente interrumpida para descargar el concentrado retenido en el lecho del cono del concentrador. Esto implica una paralización en las actividades de aproximadamente 5 minutos y es posible solamente cuando la planta dispone de otra máquina de apoyo. De



otra manera, esto causaría pérdidas significativas, debido a que el material tendría que ser desviado durante la descarga del concentrado o se tendría que utilizar otra centrifugadora como "stand-by".

Los intervalos de tiempo para la descarga deben ser determinados experimentalmente. Incrementar el tiempo de operación implica una elevación del factor de enriquecimiento en el concentrado, pero disminuye la recuperación total, porque las partículas de oro fino también se pierden progresivamente durante el lavado.

Recientemente han sido desarrollados los concentradores centrífugos de efusión semicontinua o continua (los nuevos equipos de Falcón y Knelson) pero, hasta el momento, no se encuentran disponibles muchos datos sobre su rendimiento en la práctica.

Ventajas

- buena recuperación (en ciertas condiciones, ver arriba)
- alta capacidad
- equipo muy compacto
- alto factor de enriquecimiento
- alta seguridad contra robo

Una desventaja de las centrífugas con agua a inyección es su alta demanda de agua limpia (el agua de inyección en contracorriente). En las instalaciones de diferentes plantas de beneficio de pequeña minería se demostró que muchas veces resulta muy difícil proveer agua en la cantidad y con la presión necesaria. Especialmente para alcanzar la presión de agua requerida, muchas veces se tiene que utilizar una bomba, lo cual implica una inversión adicional. Es posible reciclar agua, pero esto requiere de instalaciones adicionales para su purificación.

Otros problemas con las centrífugas son los siguientes:



- **Posibilidad mínima de recuperar minerales pesados acompañantes.** Si el concentrador centrífugo es utilizado para la preconcentración (como equipo único), todos o casi todos los minerales acompañantes valiosos se perderían. Este es el caso de las minas primarias, donde se encuentran presentes sulfuros valiosos. Aquí disminuye la recuperación total de oro utilizando centrífugas en la preconcentración, ya que cierta cantidad de oro se presenta diseminada en los sulfuros.
- **Operación sin posibilidades de supervisión.** La mayoría de las centrífugas en operación están completamente cerradas, y los disturbios en su interior son difíciles de detectar (en contraste con la mesa concentradora y las espirales). Un ajuste incorrecto del concentrador centrífugo (presión de agua inyectada irregular o modificada debido a una falla en el bombeo) puede llevar a una recuperación nula (igual a cero), sin que el operador lo note. En la mayoría de los casos, sólo en el momento en que el recipiente de concentrado es vaciado se puede observar qué tan exitosa ha sido la operación con la centrífuga.
- **Propensión a alteraciones en la operación.** A causa de alteraciones en la operación, como un corte de luz, el concentrado reunido durante horas de operación podría perderse en segundos. Esto no ocurre en artefactos donde el concentrado se obtiene continuamente (mesas, espirales), ya que el concentrado producido es seguro, es decir, se lo encuentra en un recipiente externo de recolección. Este riesgo podría ser reducido, condicionalmente, con la operación de sistemas de emergencia (generador, válvulas automáticas que cortan el agua y la alimentación, etc.). En cuanto a otros factores, a través de una interrupción en la inyección de agua debido a fuertes fluctuaciones de la misma, pueden llevarse



a cabo grandes pérdidas en la recuperación del mineral por la anulación del efecto de separación.

- En la minería aluvial, la alimentación a la centrífuga tiene que ser bien fina (p.ej. < 1mm) para recuperar bien el oro fino. Una alimentación p.ej. con material < 6mm (como está descrito en el manual del concentrador Knelson) con la presencia de minerales pesados gruesos requiere una alta presión del agua de inyección en contracorriente, para que no se compacten los minerales pesados acompañantes en el cono. Esto causa altas pérdidas de oro fino. La alta exigencia de clasificación requerida es difícil de realizar en la pequeña minería aluvial. Problemas similares se presentan en la minería primaria con la presencia de muchos sulfuros o sulfuros pesados (p.ej. galena).
- Los concentradores centrífugos, debido a razones tecnológicas y a derechos de patentes, no pueden ser fabricados en los países en desarrollo en versiones de buena calidad. Esto genera, entre otras cosas, su alto precio y causa dificultades en su reparación y adquisición de repuestos.

Estos puntos de vista deberían ser tomados en cuenta antes de comprar e introducir el concentrador centrífugo. En Sudamérica, debido a las desventajas arriba señaladas, las centrífugas han encontrado poca aplicación en la pequeña minería aurífera de la región como equipo para la concentración gravimétrica. Lamentablemente, se encuentra frecuentemente concentradores centrífugos de fabricación local usados como amalgamador en flujo abierto.

g) Otros equipos de (pre-) concentración gravimétrica

En seguida se presentan otros equipos de concentración gravimétrica, que en algunas regiones o con ciertos materiales auríferos han dado buenos resultados.



1) Canaletas oscilantes (rockers)

Las canaletas oscilantes o "rockers" sirven para la concentración de oro aluvial, sobre todo en regiones relativamente secas, por su bajo consumo de agua. Básicamente, una canaleta oscilante consiste de un clasificador y una canaleta. El clasificador es un cajón tipo tolva que recibe la carga de mineral. Por debajo del cajón emerge una canaleta inclinada de madera con rejillas, cuya gradiente varía de acuerdo al tamaño del material alimentado.

El material arcilloso alimentado requiere menos gradiente que la que podría necesitarse para un material más grueso. El total de la unidad se monta en patines semicirculares (los "osciladores"), para que toda la sección superior pueda ser mecida de un lado a otro con la ayuda de una palanca. Debido a que el material de carga y el agua de lavado deben ser agregados manualmente, se requieren varias personas para aprovechar la capacidad de una criba oscilante: una para extraer el mineral bruto, otra para transportarlo a la criba oscilante y descargarlo a una tolva, una para sacudir la criba oscilante, y otra para añadir el agua (pero también se puede utilizar una manguera). La criba oscilante típica puede manejar entre 3 y 5m³ de carga en un turno de 10 horas. Los preconcentrados de las cribas oscilantes requieren seguidamente un proceso de separación con bateas. De 3 a 5m³ de agua son consumidos durante el turno de trabajo promedio. Las principales ventajas de las cribas de lavado son su poco consumo de agua, construcción liviana, que no necesita, un motor, y su fácil manufactura local - haciendo que su uso sea apropiado como mecanismo de concentración portátil.

Sin embargo, se puede usar también canaletas "normales" con poca agua y buenos resultados.

2) Trampas hidráulicas



Las trampas hidráulicas se utilizan en la minería aluvial para separar previamente las partículas de oro grueso (pepas, granos, etc.) antes de la clasificación para no descartarlas junto con el material grueso. Otro uso es en la minería primaria directamente después de la salida del molino. Existen varios diseños que trabajan con un flujo de agua ascendente que mantiene partículas livianas en suspensión, mientras el oro se hunde y puede ser retirado ya sea continuamente o a intervalos.

En otro tipo de trampas hidráulicas, la pulpa se introduce a través de una cañería de entrada y es forzada a cambiar de dirección un cierto número de veces antes de escapar (trampas en laberinto). El oro se deposita en el fondo. Este tipo de trampas se encuentran a veces en la descarga de planchas amalgamadoras. Cuando la carga tiene una variación grande de tamaños de grano, estas trampas en laberinto se llenan rápido, recuperan muy poco oro fino y muy poco de "mercurio atomizado", el cual es generalmente vaciado en las colas.

3) Separadores en seco

Por analogía a la separación mecánica en agua, donde ésta se utiliza como un medio separador, se han desarrollado artefactos similares para la concentración de minerales, que utilizan aire en vez de agua como medio separador, para su uso en regiones áridas. Se realizan las siguientes diferenciaciones entre los siguientes tipos básicos de equipo separador de oro en seco:

- **Canaletas de aire.** En este procedimiento el alimento pasa por una canaleta con rejillas, que tiene como fondo una malla fina. Un fuelle ubicado debajo del cajón sopla aire a través del fondo del cajón. El aire entrante mantiene las partículas en un lecho fluidizado. Debido a la inclinación de la canaleta, el material en suspensión fluye hacia la salida



de la misma, pasando por las corrugaciones que retienen el material pesado, mientras que las colas livianas pasan por encima de las corrugaciones y salen de la canaleta.

- **Lavadores en seco.** Los lavadores en seco son similares a las canaletas de aire, pero sin su permanente fluidez, y son también utilizados para la separación en seco. En vez de generar un lecho fluidizado, el material es sacudido para efectuar la separación gravimétrica. Las lavadoras en seco logran una selectividad y recuperación menor a las de las canaletas de aire.
- **Mesas neumáticas.** En muchas regiones áridas, las mesas de aire o mesas neumáticas son utilizadas para el procesamiento de arena con contenido aurífero. Una mesa neumática consiste de una plataforma cubierta de un material poroso sobre una cámara desde la cual se sopla el aire a través de la plataforma inclinable. El lecho fluidizado se divide en zonas de material pesado y material liviano respectivamente, debido al ángulo de inclinación de la plataforma y ayudado por sacudidas laterales.
- **Aventamiento.** También conocido como secado por aire, el aventamiento es un método popular para la separación en seco. El alimento cae a través de un chorro de aire que separa las partículas pesadas de las partículas livianas, debido a que estas últimas tienen una relación más alta de volumen a peso. En su caso más simple, el flujo de aire es el viento. En las máquinas de aventamiento se pueden utilizar partidores para separar los flujos de los componentes. El aventamiento debería reservarse solamente para alimento fino, totalmente seco y muy cuidadosamente clasificado.
- **Canaletas acuñadas,** con lechos fluidizados neumáticamente. El aire soplado a través de una plataforma de tela genera un lecho fluidizado para



el material de alimentación, y la separación se efectúa de manera muy similar a la de una canaleta acuñada hidrodinámica. Las canaletas acuñadas en seco se utilizan principalmente para obtener preconcentrados.

Todos los equipos de concentración gravimétrica en seco se caracterizan por la emisión excesiva de polvo (la carga tiene que estar muy seca). En procesos manuales (lavadores en seco, aventamiento manual) esta es menor, mientras que resulta muy notoria en los procesos que utilizan ventiladores (mesas neumáticas, canaletas de aire mecanizadas). La emisión extrema de polvo de este sistema constituye no sólo un grave problema para el medio ambiente, sino también para la salud ocupacional. Se la puede minimizar mediante un flujo de aire en un circuito cerrado, con el uso de un extractor de polvo dentro de una cámara despolvadora, o con un lavador de aire en húmedo ("scrubber"). Esto también aumentaría substancialmente el costo de la operación. La recuperación, especialmente del oro fino, es generalmente mucho más baja en comparación a equipos que trabajan con agua.

2.3.3. Optimización del proceso de amalgamación

Como se ha visto anteriormente, para la pequeña minería aurífera la amalgamación todavía es en la mayoría de los casos un proceso indispensable para recuperar el oro de concentrados gravimétricos. En lo que sigue, no se hablará más de amalgamación en circuito abierto. Esto no vale optimizar, porque simplemente se debe eliminar. Si se habla aquí de un mejoramiento del proceso de amalgamación, se habla de la amalgamación de concentrados en circuito cerrado. Existen alternativas simples (fundición directa) o de tecnología más complicada (como cianuración, flotación). Mientras la fundición directa funciona solo en el caso de concentrados muy ricos, el uso de la flotación o cianuración significa mayor inversión y requiere mucho conocimiento



técnico para que resulten efectivas; también es indispensable controlar sus efectos negativos sobre el medio ambiente, que pueden ser graves.

Ya que es tan difícil evitar por completo la amalgamación, es absolutamente necesario optimizar la forma y el uso que se le está dando. Se justifica solamente cuando el proceso aprovecha todas las opciones técnicas para recuperar el mercurio y la amalgama a medida que minimiza las pérdidas de mercurio.

La amalgamación en un circuito abierto debe ser evitada a toda costa. La amalgamación in situ, la amalgamación realizada en canaletas, la amalgamación realizada en el molino a bolas, de pisonos o en el molino chileno, y el uso de planchas de amalgamación en circuito abierto, no deben ser tolerados debido a su excesiva pérdida de mercurio dispersado en las colas y, consecuentemente, echado a los ríos con el serio impacto al medio ambiente.

Esto implica que la única forma aceptable de amalgamación es la amalgamación de concentrados. Ya hemos visto que para este propósito se utilizan varios métodos como ser:

- la amalgamación manual
- los conos de amalgamación
- los tambores de amalgamación
- otros

Es importante notar que en general no existe un método único de amalgamación, que sea adecuado para todo tipo de concentrados. Esto se debe a que las características del oro y de los minerales acompañantes pueden ser muy diferentes y, por lo general, requieren un método de amalgamación especialmente diseñado y optimizado.

El objetivo de la optimización del proceso de amalgamación debe ser:



- recuperación máxima de oro
- mínimas pérdidas de mercurio (especialmente de "harina de mercurio")
- alta seguridad y bajos riesgos de salud para el operador

2.3.3.1. Reducción de la "harina de mercurio" producida

La "harina de mercurio", o mercurio molido (atomizado), conocido también como "floured mercury", es la principal forma en que se pierde mercurio y se emite este elemento al medio ambiente en la pequeña minería, además de las pérdidas de mercurio en la quema de la amalgama y al derramar mercurio. Como se ha descrito anteriormente, el primer paso para reducir estas pérdidas es: no utilizar el mercurio en circuitos abiertos de molienda y concentración.

El segundo paso a tomar para reducir las pérdidas de mercurio es optimizar el proceso de amalgamación en un circuito cerrado. Lamentablemente, el llamado "circuito cerrado" muchas veces tiene escapes o fugas de mercurio. Generalmente, la deposición de colas de amalgamación, no importa cuán pequeña sea la cantidad de dichas colas, no es adecuada, y el contenido de mercurio de estas colas se introduce al medio ambiente. En muchos casos, las colas de amalgamación son lixiviadas para obtener el oro restante, y a menudo los concentrados de sulfuros son tostados para su posterior lixiviación. Durante este proceso de tostado, el mercurio generalmente es emitido a la atmósfera. Si bien existen métodos para limpiar estas colas y eliminar el mercurio contenido, es aconsejable seguir el principio: evitar la contaminación antes que limpiarla.

Es importante hacer notar que en cada proceso de amalgamación se producirá un cierto porcentaje de harina de mercurio. Se debe reducir este porcentaje. La producción de harina de mercurio está influenciada por dos factores:



- formación mecánica de perlas ultrafinas de mercurio (esto depende del equipo de amalgamación, y del ajuste de los parámetros de operación; como tiempo de amalgamación, etc.)
- alteración de la superficie del mercurio (esto depende de las características de la carga)

La formación de pequeñas perlas de mercurio durante la amalgamación es deseable para obtener una gran superficie de mercurio para su contacto con las partículas de oro.

Hasta qué punto el batido o molido del mercurio líquido produce mercurio atomizado depende de las características mecánicas del método empleado.

Generalmente, las esferas pequeñas se unen a las esferas más grandes. Este es el caso cuando la superficie del mercurio es limpia. La contaminación del mercurio altera la superficie y lleva al incremento de producción de esferas de mercurio ultrafinas, o sea, de “harina de mercurio”. El mercurio se contamina durante la amalgamación en contacto con la pulpa. Los minerales, metales y sustancias que ensucian el mercurio y favorecen la formación de harina de mercurio. La harina de mercurio está constituida generalmente por finísimas bolitas de tamaño entre 20 y 50 mm.

2.3.3.2. Métodos para limpiar y activar mercurio

El mercurio sucio es mucho menos reactivo que el mercurio limpio. Mientras el último forma glóbulos casi perfectos (casi esféricos, de un brillo metálico intenso), el mercurio sucio se caracteriza por la falta de brillo, glóbulos deformados y la tendencia de dichos glóbulos a adherirse levemente a una superficie lisa e inclinada de manera tal que parecen tener "colas". El objetivo de un manejo cuidadoso de mercurio es: no botarlo o



perderlo, sino reciclarlo. La gran desventaja del uso de mercurio reciclado es que, normalmente en cada circuito, el mercurio pierde algo de su fuerza de amalgamación. Por esto, para reutilizarla frecuentemente, se tiene que limpiarlo.

Existen varias maneras de limpiar y reactivar el mercurio sucio:

- pasando el mercurio a través de una tela muy fina (o mejor todavía a través de un pedazo de cuero fino)
- lavando el mercurio con cenizas de madera y agua, puesto que el carbonato de potasio ayuda a saponificar las contaminaciones
- lavando el mercurio en agua que contiene un detergente o una solución especial de jugo de alguna planta, que tenga la capacidad de saponificar y disolver las grasas y las sustancias grasosas
- destilando el mercurio en una retorta para dejar atrás los contaminantes que no sean volátiles
- lavando el mercurio con algún reactivo, como cal, ácido clorhídrico diluido, ácido nítrico diluido, etc.
- añadiendo amalgama de sodio al mercurio, el cual, al ponerse en contacto con el agua, produce NaOH e hidrógeno, que elimina contaminantes (especialmente óxidos) de la superficie del mercurio

La manera correcta de limpieza para cada tipo de mercurio sucio (debido al tipo de contaminante) se debe determinar experimentalmente).

La fabricación de amalgama de sodio por medio de electrólisis es muy fácil. Se lo puede realizar en un recipiente de plástico que tiene dos electrodos (polo negativo: en el fondo, polo positivo: entrando de arriba). El proceso se realiza así: se coloca el mercurio sucio en el recipiente de manera que cubra totalmente la escobilla inferior (electrodo de



grafito). Seguidamente se agrega el mercurio a una solución de 10 a 15% de sal de mesa (cloruro de sodio). A continuación, se conecta una corriente eléctrica de 12 voltios (de una batería de carro), de manera que el polo positivo (+) esté conectado a la escobilla superior, la cual está en contacto con la solución salina; el polo negativo (-) debe permanecer en contacto con el mercurio.

De esta manera se descargan los iones sodio (Na^+) sobre la superficie del mercurio, formando amalgama de sodio. Del polo positivo se desprende gas cloro (Cl^-) en forma de pequeñas burbujas con el olor típico. Después de 10 a 15 minutos se alcanza una concentración suficiente. El mercurio reactivado tiene un brillo fuerte. Se debe activar sólo mercurio líquido, nunca lodos de mercurio.

Nota: ¡Nunca poner en contacto el polo positivo con el mercurio, el carbón se quemará! ¡Nunca intercambiar los polos, el mercurio se destruirá! ¡Nunca utilice el activador cuando hay presencia de harina de mercurio o partículas tan finas que puedan flotar! ¡El mercurio que no esté en contacto con el polo negativo se convertiría por la presencia de cloro-gas en cloruro de mercurio, un veneno violento!

El mercurio reactivado puede utilizarse para:

- la recuperación de oro en la amalgamación. El mercurio activado atrapa mejor el oro y amalgama granos aún más pequeños;
- la disminución de pérdidas de mercurio y amalgama. Debido a la activación, las pequeñas perlas de mercurio se reúnen más rápidamente con otras partículas de mercurio que son atrapadas, o sea, forman menos "harina de mercurio"; de la misma manera se reducen las pérdidas de amalgama.



- harina de mercurio recuperado (p.ej. por métodos gravimétricos) en forma de lodos se puede unir (licuar), en algunos casos añadiendo una pequeña cantidad de mercurio activado.

El efecto de la reactivación del mercurio es temporal; en contacto con el agua, tanto en la amalgamación como durante el almacenamiento, pierde lentamente su acción. La actividad alta solamente se mantiene durante una o dos horas. Por esto hay que utilizarlo inmediatamente después de activarlo. Lamentablemente, el mercurio activado a veces es tan fuerte, que se amalgama más fácil con otros metales (plomo, cobre, zinc, etc.), ensuciando más el mercurio. Por esto, no da buenos resultados con todo tipo de carga.

El equipo de activación (activador) se puede construir fácilmente con tubería y tapones de PVC y un pegante plástico (de dos componentes), utilizando los carbones que se encuentran dentro de pilas usadas o escobillas de motores eléctricos. Es importante que únicamente los carbones (y ninguna parte metálica) entren en contacto con el mercurio o la salmuera.

2.3.3.3. Uso de la amalgamación manual

En algunos casos, la amalgamación manual, p.ej. en un balde o una batea, es suficiente. Es decir, es rápido y tiene una buena recuperación del oro en forma de amalgama. Esto se puede utilizar, para algunos concentrados gravimétricos con las precauciones necesarias de seguridad (guantes de goma, bajo agua, lugar bien ventilado, etc.), p.ej. en la minería aluvial o primaria (vetas de oro y cuarzo sin sulfuros). Sin duda, es la manera más barata y por esto muchas veces preferida por los mineros. La ventaja de esta manera de amalgamación es que se la puede controlar muy bien. El operador puede



añadir el mercurio gota por gota, justamente la cantidad necesaria para alcanzar la amalgamación. Así el uso de mercurio es bien limitado.

La amalgamación completa del oro se alcanza a menudo ya después de 5 minutos. Por esto y por la agitación relativamente suave de la pulpa, la producción de harina de mercurio puede ser mínima (hasta $< 0,1$ % del mercurio usado).

La amalgamación manual no se recomienda con cargas difíciles (p.ej. sulfurosas), donde el operador tiene que frotar la carga por horas, utilizando una piedra pesada en una batea de fierro o dentro de otra piedra. La exposición del operador a vapores de mercurio y la producción de harina de mercurio es alta.

2.3.3.4. Uso de planchas amalgamadoras

Las planchas amalgamadoras, que no son recomendables en circuito abierto, pueden en algunos casos ser útiles para la recuperación de oro de un concentrado. El oro y la superficie del mercurio sobre la plancha necesariamente tienen que estar muy limpios, porque el contacto con el mercurio es de corto tiempo y no muy fuerte. Por esto la recuperación de oro con cargas sulfurosas o con oro cubierto por una capa de óxidos es baja. Para aumentar la recuperación, se puede reciclar las colas varias veces. Las pérdidas de mercurio en las colas, debido a la pequeña cantidad de material procesado son bajas (al contrario si estas planchas trabajan en circuito abierto). La evaporación de mercurio por la gran área de la plancha, durante la preparación y descarga de las planchas trae un riesgo de intoxicación elevado para los operadores.

2.3.3.5. Uso de tambores amalgamadores

Con muchas cargas, el uso de un amalgamador mecánico es inevitable. Sin duda, los amalgamadores mecánicos más usados son los tambores o barriles amalgamadores.



Los barriles o tambores amalgamadores son utilizados para amalgamar concentrados. La principal ventaja de la amalgamación en tambores es que la alimentación y el mercurio están contenidos dentro de un recipiente cerrado, sin fuga de pulpa y sin participación directa de un operador durante el proceso. El reactor en sí normalmente es de forma cilíndrica con un eje horizontal, parecido a un molino de bolas o rodillos, pero con la diferencia que trabaja con menos revoluciones y que no trabajan en forma continua. El objeto de un tambor amalgamador, no es moler el concentrado durante la amalgamación. Si esto fuera necesario, se lo tiene que hacer en una etapa previa antes de añadir el mercurio.

Todos los barriles amalgamadores, no importa su tipo, tienen la ventaja común de prevenir la pérdida de mercurio metálico molido (harina de mercurio) durante el proceso de amalgamación, a diferencia de la amalgamación realizada en un circuito abierto. Las cantidades de cargas amalgamadas, y por lo tanto contaminadas, son mucho más pequeñas que en un proceso de amalgamación en circuito abierto. Dependiendo del manejo del barril de amalgamación y de los minerales acompañantes presentes, un alto porcentaje del mercurio utilizado se puede convertir en harina de mercurio. Por lo tanto, hay que realizar la amalgamación en tambores, de tal manera que la producción de harina de mercurio sea mínima.

Para la alimentación se utiliza un concentrado de alta ley. El tambor es cargado con el concentrado, el agua, aproximadamente dos veces más mercurio que la cantidad prevista de oro y una carga de medios de frotamiento. Aquí es preferible no usar bolas de molino; se ha mostrado que pedazos de cadenas de acero grueso dan mejores resultados y menor producción de harina de mercurio. Para evitar la contaminación del mercurio con



hierro metálico y así mejorar la amalgamación, a menudo se utilizan también piedras redondas y un revestimiento interior del tambor con goma o plástico.

A medida que el tambor rota lentamente, su contenido se mezcla íntimamente, es decir, las partículas de oro se ponen en contacto con el mercurio y se amalgaman. Los medios de frotamiento presionan el oro dentro del mercurio, para que hasta las partículas más minúsculas, que de otra forma hubieran escapado a la amalgamación debido a la tensión de la superficie del mercurio, puedan ser también recuperadas. La ventaja de bajas revoluciones es, que de esta forma los medios de frotamiento estén en un contacto continuo con el concentrado (deslizándose o rodando según su forma), mientras que con altas revoluciones se convierten en medios de trituración que sólo causan impactos de corta duración. Al final del período de rotación, leves golpes y otras formas de vibración ayudan a efectuar la separación gravimétrica, de la mezcla de amalgama y el mercurio reuniéndose en el fondo.

Con frecuencia, sin embargo, los pequeños mineros simplemente cargan piedras grandes a una mezcladora de cemento para simular un "barril de amalgamación". La batea "Berdan" por ejemplo, es un molino de rodillos de funcionamiento lento, con una sola bola, que sigue una trayectoria circular- oblicua. A medida que la cuenca de este molino rota, la bola intenta mantenerse en el punto más bajo.

Si el oro tiene una pátina o recubrimiento de alguna sustancia, la amalgamación resulta más difícil. Esto a menudo ocurre en la minería aluvial (cauces antiguos) o primario (materiales auríferos oxidados; oro saliendo de un molino a bolas). Cuando éste es el caso, y dependiendo de la naturaleza del recubrimiento, es necesaria una etapa previa de limpieza (remoción) de ésta, ya sea por medios físicos (abrasión) o químicos (disolución mediante la adición de reactivos) y, generalmente, una combinación de



ambos. En esta etapa, que es necesaria para muchos tipos de carga, no se echa mercurio al tambor.

En la mayoría de los casos el concentrado también contiene oro grueso (partículas p.ej. mayores a un milímetro, que no requiere amalgamación puesto que se lo puede separar antes por medios mecánicos (tamizado, bateado, etc.).

Por lo anterior, la operación completa de amalgamación en un tambor amalgamador comprenderá los siguientes pasos metodológicos:

- Tamizar el concentrado para separar el oro grueso.
- Una primera etapa de limpieza, para lo cual el tambor o recipiente se carga con el concentrado, suficiente agua y diferentes sustancias (cal, detergente, etc.) para facilitar la remoción del recubrimiento que podría inhibir la amalgamación.
- Agregar agua fresca para lograr una pulpa densa.
- Una vez cerrado herméticamente el tambor, someterlo a rotación por una hora (algunas veces puede requerir más tiempo). Parar el equipo, dejar decantar por un instante y eliminar cuidadosamente el agua sucia de lavado.
- Agregar agua fresca para lograr una pulpa densa.
- Añadir el mercurio, en la cantidad mínima necesaria. Cualquier exceso sólo contribuirá a su atomización y consecuente pérdida como harina de mercurio. Generalmente es mejor producir una amalgama seca. Si fuese necesario, añadir también algún coadyuvante (sal, azúcar, cal, etc.).
- Cerrar herméticamente el tambor y ponerlo en funcionamiento. Con material sulfuroso, se requiere normalmente alrededor de una hora. Algunas veces, dependiendo del material, se requiere mayor tiempo. El material aluvial limpio, a veces necesita sólo cinco hasta diez minutos para amalgamarse. Excederse en el



tiempo de amalgamación resulta en mayor producción de harina de mercurio y pérdidas de oro fino dentro de ella.

- Parar el equipo, dejar decantar, proceder a la descarga del material amalgamado y lavar el interior del reactor meticulosamente.
- Proceder con la siguiente etapa de separar la amalgama y el mercurio libre de las colas de amalgamación.

Reactivos apropiados para mejorar la amalgamación incluyen cal apagada, hidróxido de sodio, amalgama de sodio, cianuro potasio, ácido nítrico diluido, detergentes y otras sustancias. Si no se dispone de un método para la subsecuente destrucción de cianuro (p.ej. con oxidantes fuertes) en las aguas residuales y las colas de la amalgamación, no se debe usar este químico. Cualquier ácido tiene que ser bien diluido, porque los ácidos pueden disolver el mercurio.

El tipo y las dosis de los reactivos, así como la duración de la etapa de limpieza y la duración de la amalgamación, deberán determinarse experimentalmente, dependiendo del tipo de carga.

Los parámetros mecánicos básicos para la operación de los barriles de amalgamación son: a) el tipo y la cantidad de alimentación, b) el tipo y la cantidad de medios de frotación y c) la velocidad del tambor. La velocidad de rotación para la amalgamación es aproximadamente sólo la mitad de la a Exceso de detergentes resulta en elevada producción de harina de mercurio velocidad de un molino a bolas del mismo diámetro. La lentitud del tambor ayuda a reducir la formación de mercurio atomizado.

La amalgamación de concentrados ricos en sulfuros es a veces optimizada con éxito añadiéndole arena de cuarzo blanco al barril. Parece que los granos de arena limpian



mecánicamente las partículas hidrófobas de sulfuro fuera del mercurio y limpian su superficie.

Nunca se debe emplear simultáneamente la amalgamación y la molienda en el tambor amalgamador. Esta combinación de procesos, que se encuentra frecuentemente para el tratamiento de preconcentrados que todavía contienen partículas entremezcladas, es sumamente dañina para el medio ambiente por producir elevadas cantidades de harina de mercurio que permanecen en las colas de la amalgamación.

Sin embargo, en algunos casos la amalgamación en tambor amalgamador con reactivos coadyuvantes no da los resultados esperados, especialmente con concentrados de minería primaria que contienen muchos sulfuros de arsénico, antimonio o bismuto. En este caso, se tiene que reducir la cantidad de sulfuros gravimétricamente para enriquecer el concentrado y fundirlo directamente.

Los tambores de amalgamación son adecuados para ser manufacturados localmente. Los talleres metalmecánicos pueden producir tambores sencillos a partir de secciones de cañerías de gran diámetro, láminas de metal, etc. Muchos tambores sencillos de amalgamación que se utilizan actualmente son impulsados por pequeñas ruedas hidráulicas.

Otros tipos de amalgamadores utilizados en Latinoamérica son los conos de amalgamación con agitador eléctrico, que en su operación son parecidos a la amalgamación manual en balde, utilizando un palo para agitar la pulpa.



Figura N° 14: Tambor amalgamador.

2.3.3.6. Técnicas para recuperar mercurio de un circuito abierto

El daño al medio ambiente ocasionado por el mercurio utilizado en circuito abierto ya ha sido discutido varias veces. Por lo tanto, el objetivo de cualquier desarrollo tecnológico debe estar basado en ofrecer a los pequeños mineros técnicas alternativas de procesamiento. De acuerdo a la experiencia en diferentes proyectos de este tipo, un cambio completo de las técnicas de procesamiento es un proceso largo, especialmente si se involucran las inversiones de los mineros. Los ejecutores de un proyecto de asistencia técnica generalmente no son los dueños de las minas o de las plantas de procesamiento. Si el uso del mercurio en un circuito abierto no se puede evitar en algunas regiones, por lo menos a corto o mediano plazo, el mercurio debe ser recuperado más efectivamente del circuito abierto para poder reducir la cantidad de mercurio emitido. Esta táctica se debe utilizar como una medida a corto plazo. Felizmente cuando los mineros están de acuerdo, como primer paso, de aceptar asistencia técnica externa, el segundo paso (eliminar el uso del mercurio en circuito abierto) es más fácil.



Una vez más recalcamos que la regla básica es: la prevención debe ser implementada preferiblemente antes que la limpieza posterior (es preferible no contaminar las colas con mercurio, permitir su contaminación durante el proceso y limpiarlas posteriormente).

Para recuperar el mercurio de las colas descargadas de una planta existen diferentes métodos posibles:

- **Trampas de mercurio:** las trampas hidráulicas, se usan para la recuperación del mercurio de pulpas de grano fino, que resultan de combinar la molienda con el proceso de amalgamación. Mientras gotas grandes de mercurio y trozos de amalgama se pueden recuperar fácilmente, la harina de mercurio sólo es recuperada en cantidades pequeñas. Existen trampas hidráulicas de laberinto y con inyección de agua.
- **Planchas de amalgamación:** En muchas plantas en la pequeña minería primaria, las planchas son utilizadas como el único paso de concentración o recuperación del oro, por ejemplo, inmediatamente después de los molinos trapiches, molinos de pisones, o martillos, donde se echa el mercurio para combinar molienda y amalgamación. Las planchas amalgamadoras necesitan mercurio, amalgama y oro limpio para recuperarlos. Las partículas de oro y amalgama bajan por su alto peso específico al fondo de la pulpa, y "en caso que estén limpias" toman contacto con la superficie de mercurio en la plancha y son atrapadas, mientras que el mercurio atomizado, mercurio y oro ensuciado y flóculos de amalgama pasan sin pegarse. Las pérdidas de mercurio y oro en planchas de amalgamación, dependiendo de la carga y del manejo, pueden ser muy altas.



- **Canaletas:** Las canaletas con una cubierta textil o de alfombra, cuidadosamente operadas (lavados frecuentes), pueden recuperar el mercurio atomizado mejor que las trampas de mercurio o que las planchas de amalgamación. Al contrario de las últimas, las canaletas dependen sólo del peso específico del mercurio (o amalgama, u oro) y no de una superficie limpia. Mientras el movimiento de las partículas en la pulpa hacia el fondo es parecido, el mecanismo de adhesión a las alfombras no es perjudicado por superficies sucias. Las canaletas también pueden recuperar una parte de los flóculos de amalgama, que pasan por planchas y trampas sin detenerse.

Un proyecto que quiere mejorar rápidamente la situación ambiental en una región, donde se utiliza amalgamación en flujo abierto, puede, mientras la concientización de los mineros para cambiar todo su proceso tarda, instalar canaletas con alfombras en las colas de las plantas amalgamadoras para recuperar algo del mercurio/amalgama perdido. Esto es barato y sirve efectivamente para demostrar a los mineros las pérdidas de mercurio y oro, que ocurren en su sistema. Así se logra más fácil el acuerdo con los mineros para cambios substanciales.

2.3.3.7. Las colas de amalgamación

Las colas de amalgamación siempre están contaminadas con mercurio, en cantidades muy variadas. Existen dos posibilidades de acción (a parte de la más importante, que es minimizar el contenido de mercurio, ver arriba:

- depositarlas apropiadamente
- limpiarlas.



Ambas alternativas casi son imposibles de aplicar a colas de la amalgamación en circuitos abiertos, en las condiciones de la pequeña minería. La cantidad de colas para una pequeña mina aurífera primaria en una operación típica (en Bolivia: molino a bolas 3'x 4', en Brasil y Venezuela: molino a martillos, en Ecuador: Trapiche) con una capacidad promedio de 20t/ d suman en un año alrededor de 6.000 t. Una pequeña mina aluvial, que p.ej. con una bomba de grava de 5" mueve alrededor de 100m³/d de material aurífero, las colas de un año suman 30.000m³. Si bien existen maneras de limpiar colas contaminadas por mercurio (ver abajo), es poco probable, que una pequeña mina realice esta limpieza.

La construcción de un depósito seguro para las colas de preconcentración contaminadas (con revestimiento de HDPE, sobre una capa de arcilla impermeable, etc.) es por su costo elevado poco alcanzable para la pequeña minería. Además, el manejo de un dique de colas requiere bastante conocimiento técnico e implica muchos peligros.

Por esto, vale repetir: no se debe amalgamar en circuito abierto.

Para colas de amalgamación de concentrados hablamos de otros volúmenes:

Los concentrados gravimétricos que se amalgaman en "circuito cerrado" son, para la misma capacidad de la mina (20t/h para una mina primaria y 100m³/d para una mina aluvial) no más que 10-50kg por día. La cantidad acumulada alcanza a 3-15 t por año. Siendo más que todo minerales pesados (con un peso promedio en forma de arena suelta de 2-3t/m³), se trata de un máximo de alrededor de 10m³ por año. Esta cantidad de material contaminado sí puede ser depositada de una manera segura o limpiada. Frecuentemente se puede demostrar a los mineros, que este material todavía contiene considerables cantidades de oro; de esta manera se puede incentivar para que sea almacenado en un



lugar seguro para tratamiento futuro. Así tampoco se pierde la posibilidad de un futuro reprocesamiento con métodos descontaminantes.

2.3.3.8. Depósitos para colas contaminadas

Existen varias formas de depositar colas contaminadas. La forma apropiada depende mucho del lugar, de las posibilidades de conseguir ciertos materiales, etc.

Para colas sulfurosas, los cuales se venden cada cierto tiempo a plantas de lixiviación, se debe instalar un depósito temporal. Este generalmente es una taza de hormigón, techada y bien ventilada, donde se almacenan las colas hasta su transporte a la planta de lixiviación en forma suelta, o mejor, en sacos (se debe mencionar que en las plantas de lixiviación el manejo de las colas requiere el mismo cuidado).

Colas contaminadas con mercurio, que no pueden ser vendidas como subproductos auríferos se tienen que acumular en depósitos apropiados. Los requerimientos para estos son:

- evitar el contacto con aguas subterráneas
- protección contra el arrastre de aguas de lluvia
- protección contra arrastres del viento.

La base impermeable y las paredes del depósito se pueden construir utilizando materiales del lugar como arcilla, bentonita, caolinita, etc. Si está disponible, es recomendable utilizar un material con alto contenido de hidróxido ferroso (limonita presente en suelos lateríticos) debido a su alta capacidad de absorción de mercurio o utilizar plástico grueso, que se consigue fácilmente cuando existen minas grandes en los alrededores. Mayor seguridad se obtiene cuando se combinan ambos materiales.



En el caso de minas primarias, se puede también depositar colas dentro la mina, en un lugar seco sin flujo de aire hacia los lugares de trabajo (que se queda seco también cuando se paran las bombas).

Otra medida de protección puede ser la cobertura de las colas contaminadas con una capa de varios centímetros de piratas no-contaminadas debajo de una capa de materiales impermeables (arcillas, etc.) El ambiente anaeróbico promueve estabilización del mercurio en forma de cinabrio (HgS) poco soluble y poco tóxico.

2.3.3.9. Métodos de limpieza de colas contaminadas

Existen varios métodos para la limpieza de materiales inorgánicos contaminados por mercurio.

- **métodos gravimétricos:** Como se mencionó anteriormente, se puede recuperar parte de la harina de mercurio utilizando equipos gravimétricos (canaletas con alfombras, mesas concentradoras, centrífugas, etc.).
- **planchas amalgamadoras:** Si el mercurio atomizado no es demasiado sucio, se puede recuperar parte del mercurio con planchas amalgamadoras.

Los dos métodos anteriormente presentados, no lograrán limpiar las colas totalmente. Los resultados dependen mucho de la granulometría (en caso de equipos gravimétricos- mercurio en bolitas gruesas es bastante fácil de recuperar) o de la granulometría y la superficie del mercurio (en caso de planchas amalgamadoras).

- **métodos térmicos:** Calentamiento del concentrado en un recipiente cerrado a más de 400 o C, con la salida de los gases a un filtro (especialmente de carbón activado). Esto implica altos costos de energía.



- **métodos químicos:** Lixiviación por varios químicos. En los últimos años, se ha obtenido buenos resultados con el "Electroleaching", utilizando en un reactor, NaCl, HCl y corriente continua para lixiviar el mercurio y depositarlo sobre electrodos de grafito. En este proceso, si bien la extracción de mercurio es buena, requiere mayor inversión y muy buenos conocimientos técnicos de los operadores.
- **flotación:** Flotación de las partículas de mercurio. El proceso, si bien ha dado buenos resultados en algunos casos, no es fácilmente manejable y requiere mayor inversión y personal experimentado.

Este listado muestra, que los métodos para limpiar los concentrados son de eficiencia limitada o complicada y costosa; por ello, en la mayoría de los casos, lo más aplicable y recomendable para la pequeña minería es la acumulación en depósitos apropiados.

2.3.3.10. Técnicas para recuperar amalgama de un concentrado

Luego de la amalgamación del concentrado (en circuito cerrado), la amalgama y el mercurio deben ser separados de las colas de la amalgamación. En este paso del proceso pueden ocurrir grandes pérdidas de amalgama y mercurio. Para minimizar las pérdidas de oro y también las pérdidas de mercurio en las colas se debe manejar estos con mucho cuidado y utilizar el equipo apropiado.

1) Batea

En la mayoría de las plantas en la pequeña minería se realiza este proceso con una batea. Este es muy lento, e implica mucho riesgo de robo. Además, dependiendo de la habilidad del operador, las pérdidas de mercurio y amalgama pueden ser altas.

2) Hidroseparator (elutriador)



El hidroseparador (o elutriador) es un aparato simple para separar amalgama de arenas negras y piritas después de la amalgamación del oro.

Sus ventajas son:

- proceso rápido y seguro
- buena recuperación
- manejo simple
- no necesita motor (pero si agua a presión de por lo menos 5 m de altura)
- bajo costo.

El hidroseparador separa partículas por su diferente peso específico; separa la amalgama y el mercurio de las colas de amalgamación (piritas y arenas negras), en una columna de agua de flujo ascendente en contracorriente alimentada con sólidos.

Las piritas y/o arenas negras, por su peso más liviano, son elevadas por la columna ascendente de agua, expulsadas por el borde del embudo de separación y recolectadas en el cuello de recepción; luego son vaciadas a un recipiente exterior (balde).

La amalgama, el mercurio y, eventualmente, el oro libre, se hunden debido a su alto peso específico hasta llegar al recipiente colector de amalgama, que se puede retirar fácilmente del tubo de separación, después de terminar el proceso.

Es posible regular la fuerza ascendente de la corriente de agua, abriendo o cerrando la válvula de ingreso de la misma.

Válvula más abierta resulta en:

- mayor flujo de agua ascendente
- separación más rápida



- salida de partículas más gruesas
- posible pérdida de partículas finas de amalgama y mercurio
- amalgama recuperada más limpia

Válvula más cerrada resulta en:

- menor flujo de agua ascendente
- separación más lenta
- salida de partículas más finas
- mejor recuperación de amalgama y mercurio fino (atomizado)
- amalgama recuperada con impurezas de piritas y/o arena gruesa

Para una separación eficiente, se recomienda tamizar la carga (clasificar), para evitar la entrada de piritas y/o arena negra con tamaño mayor a 2 mm, difíciles de suspender y eliminar con un flujo suave de agua. El grano grueso puede tratarse separadamente con batea. Si no se eliminan las partículas gruesas, estas descenderán junto con la amalgama al fondo del recipiente colector.

Es necesario alimentar el separador hidráulico en forma continua con un volumen de carga constante.

Se debe regular la corriente ascendente de agua de manera tal que las piritas y/o la arena negra salgan y se eliminen lentamente.

Para asegurar una buena recuperación de la amalgama, se puede repetir el proceso realimentando las colas una y otra vez, con menor presión de agua, hasta lograr una buena recuperación o con el mismo propósito, instalar 2 ó 3 elutriadores en serie para facilitar el repaso.

Terminada la alimentación de carga, se cierra la válvula y se retira el recipiente de amalgama del tubo de separación. Normalmente, el producto no es totalmente limpio. Todavía contiene partículas de mineral pesado grueso, que se pueden eliminar con una batea.

El hidroseparador puede ser fabricado fácilmente en talleres locales.



Figura N° 15: Separador hidráulico

3) Batea mecánica

La batea mecánica es otro equipo para separar mercurio y amalgama de las colas de la amalgamación. Ella consiste de un plato con canales en forma de espiral, que gira impulsado por un pequeño motor. La carga es alimentada al plato, el agua se añade por un chisguete. La amalgama sube en los canales al centro del plato, para luego pasar por el eje (un tubo) central y ser recuperado en un recipiente, mientras las colas salen del plato por el borde inferior del plato.

La batea mecánica es más lenta que un hidroseparador, pero trabaja mejor en el caso de minerales acompañantes gruesos o muy pesados (arsenopirita, casiterita, etc.). Se la puede fabricar en talleres locales.



Figura N° 16: Batea automática

2.3.4. Otros equipos para separar amalgama de las colas de amalgamación

Combinadas con tambores de amalgamación de fabricación local, a menudo se encuentran canaletas metálicas con rejillas de metal para recuperar la amalgama, las cuales son vibradas por un mecanismo acoplado al motor del tambor, en sentido transversal al flujo de la pulpa. Los resultados son buenos para amalgama y mercurio líquido, porque permiten la unión de perlas de mercurio; la recuperación de harina de mercurio es baja.

A menudo, los mineros separan la amalgama de las colas con "elutriadores rústicos". La mezcla de amalgama y arenas negras o sulfuros se vierte sobre una batea (o un pequeño balde) que está colocada dentro de otro recipiente más grande con agua; la



amalgama se queda en la primera batea y los minerales pesados rebosan al otro recipiente. La recuperación después de varios repasos del mismo material es aceptable.

Se vuelve a mencionar, que con ningún método arriba presentado se puede recuperar todo el mercurio atomizado de las colas. Siempre se obtienen colas contaminadas con mercurio, en un grado más o menos alto.

2.3.4.1. Técnicas para separar oro y mercurio amalgamados

La separación de oro y mercurio para obtener el producto final es generalmente el último paso que realizan los mineros antes de vender su oro. Al contrario de las emisiones por el uso del mercurio en circuito abierto -las cuales afectan generalmente muy poco a los mismos mineros-, las emisiones que se producen en este paso del proceso (generalmente la "quema" de amalgama) constituyen -aparte de ser un impacto ambiental negativo un alto riesgo para la salud de los operadores, que inhalan vapores de mercurio.

2.3.4.2. Retortas para la destilación de mercurio

Una retorta es un recipiente similar a un crisol, con un mecanismo para abrir y cerrar el mismo, un tubo de salida en la cabeza del recipiente, es decir, en la tapa, y un cuello que apunta hacia abajo, similar a un tubo, que sirve como condensador. Ella sirve para destilar la amalgama y recuperar el mercurio condensado.

El tipo más sencillo de condensador consiste de un tubo recto en-vuelto en trapos mojados. Construcciones más elaboradas incluyen una envoltura llena de agua o incluso un enfriador de contracorriente que emplea el agua como refrigerante en un ciclo abierto o cerrado. La amalgama a ser separada se introduce en el crisol; puede estar envuelta en papel, cuya ceniza formará una capa intermedia no adhesiva entre el oro y la pared de la retorta.



Se consiguen mejores resultados aplicando una capa fina de cal, tiza, arcilla o talco al interior del crisol antes de que se lo cargue con amalgama. Esto evita que el oro se pegue al fondo y las paredes de la retorta luego de la destilación (nunca se debería utilizar materia grasa, ya que se evaporaría junto con el mercurio, desactivando su superficie para su posterior uso en el proceso). Luego, el crisol es cerrado y calentado para elevar la temperatura de la mezcla de oro y mercurio aprox. a 400°C , para que el mercurio se evapore. A medida que pasa por el condensador, el vapor de mercurio se a Aunque se habla de la "quema" de amalgama, esto no es una verdadera quema. Se trata más bien de la evaporación del mercurio en forma de vapor metálico (no en forma de óxidos), por calentamiento condensa en el tubo y gotea a un recipiente lleno de agua. El agua previene una mayor evaporación. El mejor resultado se logra, dejando terminar la salida del tubo en una funda de plástico transparente, herméticamente sellada con una liga elástica y hundida en un recipiente de agua. De esta forma el sistema "crisol-refrigerador-funda" queda absolutamente cerrado, y se evita la más mínima fuga de mercurio. Las retortas se deben calentar siempre de tal manera que se aplique calor a todos sus lados, incluyendo el tubo de salida.

De otra forma, algo del mercurio se podría condensar antes de alcanzar el condensador; en ese caso volvería a entrar al crisol y tendría que ser redestilado.

En cualquier caso, una vez que el calor ha sido retirado, se debe tener cuidado para asegurarse que el enfriamiento siguiente no atraiga el agua al crisol. Si esto ocurriese, el crisol, todavía caliente, podría explotar debido a la evaporación instantánea del agua. Este riesgo puede ser evitado a) haciendo terminar el tubo del condensador justo encima del agua en el recipiente b) usando la funda plástica antes mencionada.



Las retortas se pueden manufacturar localmente a un bajo costo y con pocos problemas u obstáculos en su construcción, si se tiene el cuidado de respetar ciertos detalles de diseño básico. Primero, el área de condensación para el mercurio se mantendrá lo más pequeña posible para minimizar su pérdida debido a la adhesión de gotas finas de mercurio en la parte interna de la retorta. Por ejemplo, el tubo de refrigeración debe ser de un diámetro pequeño y hecho de fierro o acero, debido a que el cobre o láminas de zinc se amalgamarían con el mercurio. El interior del tubo debe ser muy liso para no frenar el deslizamiento del mercurio. A pesar de dichas precauciones, algunas bolitas finas de mercurio podrían permanecer en la retorta, la cual debe ser lavada para recuperarlos.

El cierre del recipiente es otro detalle crítico. No importa qué tipo de retorta se utilice, el criterio más importante es el cierre hermético. Si se ve que una retorta tiene una fuga, primero se debe tratar de hermetizar el cierre mecánicamente (limar, lijar, etc.); si esto no resulta, se puede aplicar una mezcla húmeda de arcilla y ceniza (antes de la destilación). La arcilla no debe tener grano grueso.

Las retortas más simples, hechas de accesorios de tuberías de tipo comercial, acoplamientos y secciones de tubería, tienen ciertas desventajas en cuanto a su facilidad de manejo. Este tipo de retorta rústica tiende a desarrollar fugas.

El uso de la retorta tiene varias desventajas, por lo que a veces a los mineros no les gusta aplicarla:

- utilizar la retorta generalmente requiere más tiempo que quemar la amalgama al aire libre
- la amalgama y el oro no son visibles durante el proceso, lo cual es un factor de susceptibilidad para algunos pequeños mineros tradicionales



- dependiendo de los minerales acompañantes, el oro que ha sido pasado por la retorta, algunas veces presenta una superficie de color gris. Esto muchas veces es causado por la quema de sulfuros, que están atrapados en la amalgama. Los comerciantes en oro, quienes siempre buscan una razón para bajar el precio del mismo, pagan menos por este oro "sucio".
- el oro de una retorta muchas veces se sintetiza o se funde parcialmente. Los comerciantes en oro pagan un menor precio por este oro, aludiendo que podría contener arena negra, o metales, como el cobre. Además, los pequeños mineros están acostumbrados a distribuirse el oro entre ellos luego de quemar la amalgama. Esto es bastante difícil de realizar con oro sinterizado o fundido.

Generalmente, los mineros prefieren mercurio nuevo y consideran al mercurio recuperado, por destilaciones u otros procesos como mercurio "cansado". Tienen miedo de perder oro al usar el mercurio reciclado, por no conocer técnicas apropiadas para la limpieza del mercurio contaminado.

Estas técnicas adicionales deben ser incluidas en una campaña para la divulgación del uso de retortas.

2.3.4.3. Disolución con ácido nítrico

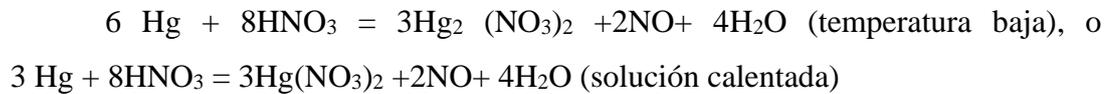
La disolución del mercurio mediante ácido nítrico puede ser una alternativa viable para la separación oro-mercurio, si se recupera después el mercurio de la solución residual mediante cementación.

La reacción de disolución ocurre como sigue:

John Hollaway de Zimbabwe nos informó que la ceniza de huesos (mayormente trifosfato de calcio), como copelas para análisis de fuego (que consisten del mismo



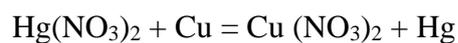
material) son absorbentes fuertes para impurezas. Por esto él recomienda colocar el oro dentro de la retorta sobre una capa de este material, para obtener un oro de aspecto limpio.



La solución es exotérmica y calienta rápidamente. El oro contenido en la amalgama no es afectado por el proceso.

Una vez que el residuo esponjoso de oro ha sido separado del nitrato disuelto, el mercurio puede ser recuperado a través de un intercambio de iones con cobre u otros metales no preciosos, produciendo nitrato de cobre o nitrato de otros metales. La cementación con cobre permite una recuperación de más del 98% del mercurio de la solución, y produce mercurio líquido. La cementación con hierro tiene una recuperación de casi 100% del mercurio, pero produce mercurio en forma de lodos, que luego tienen que ser destilados con una retorta para obtener mercurio líquido.

La reacción química para la cementación del mercurio con cobre es:



El problema principal en relación con esta separación química consiste en que los mineros en general no realizan el último paso: la precipitación del mercurio. El nitrato de mercurio altamente tóxico, $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$, generalmente es vertido directamente al medio ambiente. Menos nociva, pero tampoco aceptable, es la emisión de nitrato de cobre. De la solución cuprífera se puede precipitar el cobre utilizando alambres de hierro, lo cual resulta en una solución residual de nitrato de hierro, que se puede neutralizar con cal.



Viendo todos los pasos necesarios, se puede verificar que el proceso de disolución con ácido nítrico representa un método relativamente complejo. Su uso adecuado, especialmente en las minas informales, parece por ello poco probable.

2.3.4.4. Campana y filtro

En algunas minas más grandes y también en las tiendas de los comerciantes de oro, la quema de la amalgama es realizada bajo una campana, utilizando un extractor eléctrico para prevenir el escape del vapor de mercurio. En la mayoría de los casos, la chimenea tiene su escape justo fuera del edificio o, en el peor de los casos, en el mismo cuarto. En operaciones más sofisticadas, el flujo de aire entra a través de un sistema de filtros (por ejemplo, con chisguetes de agua), donde la condensación o la precipitación del mercurio se llevará a cabo. No existen datos disponibles acerca del trabajo y rendimiento de dichos filtros y actualmente los autores llevan a cabo una labor de investigación sobre este tema, utilizando filtros llenados con canicas de vidrio (o pequeñas gravas lisas, p.ej. de cuarzo). El mercurio se recupera parcialmente en forma de bolitas ultrafinas (lodos) que después deben ser destiladas en una retorta para obtener mercurio líquido reutilizable. Así no se puede evitar el uso de una retorta completamente, pero los mineros pueden quemar su amalgama viéndola. De vez en cuando, los lodos de mercurio son extraídos del filtro y destilados. Si bien este método parece ser una alternativa a la retorta (por lo menos en casos donde el uso de una retorta no es difundible), faltan todavía datos finales sobre su rendimiento. Los datos disponibles hasta la fecha muestran, que la recuperación del mercurio en un sistema de campana y filtro (sin el uso p. ej. de carbón activado) queda inferior a lo de una retorta. Sin embargo, existe la posibilidad de optimizar el equipo/proceso.



2.3.4.5. Procesos y métodos alternativos

Los procesos alternativos son aquellos que permiten obviar completamente el uso de mercurio. Estos procesos fueron considerados hasta ahora en último lugar por las siguientes razones: encontraron poca aceptación entre los pequeños mineros; su implementación dentro del margen de los proyectos con la pequeña minería resulta dificultosa y la introducción de estas innovaciones amplias provoca costos adicionales, obligando a las empresas mineras a someterse a modificaciones o cambios que podrían resultar exitosas en casos aislado



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

3.1.1. Generalidades

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

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; el objetivo de



su uso es saponificar el aceite y la grasa. Otros agentes frecuentemente utilizados para mejorar el rendimiento de la amalgamación son: la panela (concentrado de caña de azúcar), el limón, trazas de cianuro, gasolina, etc.

Tanto el aluminio o el cobre metálico de los detonadores o cables eléctricos, como el plomo metálico (en forma de perdigones o balas de cazador en la minería aluvial) y el zinc metálico de baterías 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). La adición dosificada de cal neutraliza parcialmente dichos efectos.

3.1.2. Ubicación

La planta de tratamiento de minerales auríferos B Y Z Lunar de Oro Rinconada Puno, se encuentra ubicado en la parte occidental de la Cordillera Oriental en el Centro Poblado Lunar de Oro La Rinconada del distrito de Ananea Provincia de San Antonio de Putina de la Región Puno.

3.1.2.1. Fisiografía

La zona se encuentra dominada por un paisaje alto andino típico, en la cordillera occidental que forman los nevados de Ananea y Aricoma alcanzando alturas que superan los 4500 metros sobre el nivel del mar con presencia de laderas, faldas de cerros, cimas, cerros, pendientes convexas, pendientes cóncavas, planicies, afloramientos rocosos y zonas muy escarpadas. La morfología de la zona es el resultado de la acción combinada de una intensa actividad volcánica, que ha sufrido los efectos de una significativa



actividad glacial. Es posible señalar que la morfología que identifica la zona se debe a los fenómenos internos como la tectónica regional y la actividad volcánica del Terciario. Entre los fenómenos externos, toma singular importancia la actividad de los glaciares pleistocénicos, y actualmente el viento y las precipitaciones pluviales. En el área de estudio se distinguen dos unidades fisiográficas: la zona andina conformada por estribaciones del flanco oriental de la Cordillera occidental y las mesetas altiplánicas andino. Dentro de estas grandes unidades fisiográficas se pueden identificar unidades menores, considerando parámetros tales como la altura, el drenaje y el grado de disección.

Las formas positivas y/o mesetas, están ligadas a una altiplanicie cuya altitud varía entre los 4500 y 4800msnm, conocida como zona de Puna, este paisaje es bastante monótono, formado por una infinidad de pequeñas colinas de forma redondeada y desniveles comprendidos entre los 20 y 50m, área a la que se la denomina localmente "lomada" desarrolladas sobre sedimentos arcillosos del Terciario profundamente meteorizados.

3.1.2.2. Clima

Se caracteriza por un clima frígido y lluvioso con períodos secos con temperaturas mínimas de hasta -15°C por las noches y en el día templado y soleado, las precipitaciones pluviales son esporádicas.

La estación de lluvias se presenta habitualmente desde octubre hasta abril y la estación seca desde mayo hasta septiembre, en la cual suelen presentarse precipitaciones sólidas, nieve o nevadas, que en muchos casos imposibilitan las labores y trabajo de campo.



Para la evaluación meteorológica y climática del área del Proyecto se han tomado en cuenta los registros de la estación portátil dispuesta en la zona del proyecto.

3.1.3. Diseño de molino trapiche

Los trapiches son máquinas de molienda como de amalgamación y deslamador de minerales. En la molienda incluye todas las etapas (primaria, secundaria, terciaria), funciona haciendo girar dos ruedas pesadas sobre una pista. Los primeros trapiches fueron hechos de piedra de granito y giraban gracias a la tracción ejercida por animales, como la mula y el caballo.

La pista por la cual ruedan estas ruedas pesadas se le agregaba mercurio metálico el que liberaba al oro de la roca y lo amalgamaba.

Al pasar el tiempo, estas pistas se hicieron con rodadura de fiero luego de acero al manganeso y acero al cromo al igual que la solera o pistas. Las dimensiones aproximadas de cada una de las partes que componen el trapiche son las siguientes:

- Los anillos miden un metro y medio de diámetro.
- La sección de los anillos es de 5x5 pulgadas y
- La solera o pista es de dos metros y medio de diámetro y una sección de 8x5 pulgadas.

El trapiche cuenta con una solera o pista con un peso de 1900 kilos y con dos ruedas con un peso aproximado de cada uno de 1500 kilos. de aspecto cónico simétrico que se encuentran unidas a un eje o a ejes independientes, estas giran moliendo el material el cual son impulsados por un motor de 15 hp con una revolución baja de 1 700 RPM la fuerza del motor es transmitida por poleas, fajas y la catalina de 72 dientes cónicos fabricado de una aleación de acero al cromo, la misma que es impulsado por un piñón del



mismo material de 12 dientes, estos son transmitidos por un eje y un sistema de reducción de poleas que salen del motor. El movimiento que producen estos son transmitidos a un eje central que se sostiene en un Rodamiento Axial de dos pistas a fin de amortiguar los golpes bruscos que pudiera ocasionar las moliendas de material con dureza alta. En la que se alimenta agua al trapiche con un flujo constante de 6 galones por minuto aproximadamente y cal para bajar el ph del agua y hacer factible dando condiciones óptimas para una buena amalgamación y rápida. La velocidad de rotación que se considera es la que provoca el menor efecto centrífugo sobre el agua, deformando una línea de flotación, esto es entre 15 a 30 r.p.m., lo que depende del diámetro de la soleta o pista y la altura del agua de la piscina.

Uno de los principales problemas que se presenta con frecuencia es la rotura de los rodamientos mixtos de billas y balines que tiene las ruedas en su eje central, estos debido al quiebre brusco y a la alimentación deficiente del material que se esta tratando.

Los trapiches o molinos Chilenos fueron traídos de la ciudad de Coquimbo en Chile lugar donde funciona la fundición, y zona en la que se utiliza estos trapiches en cantidades considerables ya que allí existen compañías mineras que trabajan placeres auríferos, básicamente nos referimos a Andacollo, en la que trabajan arriba de 60 trapiches desde muchos años atrás, dejando de esta manera constancia que los trabajos de recuperación de estos son considerables y considerados por las que utilizan. El agua en Andacollo es otro de los problemas con las que tiene que enfrentar las empresas, ya que siendo Chile un país que cuenta con pocas riberas y corrientes de agua las empresas tienen que realizar excavaciones y hacer pozas y bombear la poca cantidad de agua que se almacena de un día para el otro.



Otra zona importante en la que se utilizan los trapiches es Tongoy y Talca, estas a diferencia de Andacollo tienen agua para la molienda, pero cabe mencionar en esta parte que dicha agua es de Mar dejando demostrado de esta manera que el agua marina no es un obstáculo para el tratamiento gravimétrico. El proceso de molienda continúa colocando planchas de 60 cm. Por 40 de alto alrededor del plato del trapiche, estas planchas actúan como “cucharillas” que al ser cubiertas con mercurio atrapan fácilmente el oro que se encuentra flotando en la pulpa y que por su bajo peso no pueden ser alcanzados por el mercurio del fondo de la pista. El relave de estos trapiches pasa a unos concentradores Knelson que se encuentran estratégicamente ubicados y en serie para la continuidad de la descarga. Este modo de tratamiento ha servido como prototipo para el mejoramiento que se pretende dar a los trapiches de la Mina Rinconada, ya que se ha observado que su costo de instalación y operación es bajo comparando con los beneficios que se obtiene en la recuperación del Oro. La capacidad de un molino chileno (trapiche) es entre 3 y 25 t/24h según la dureza del material y tamaño de alimentación, los trapiches al ser un sistema abierto de molienda, se descarga directamente el relave y quedando concentrado en el interior del trapiche este concentrado es llevado a los tambores amalgamadores para su amalgamación.

VENTAJAS

- Adaptable para producción local (regional).
- Puede trabajar con rueda impulsada con agua.
- Tamaño de alimentación hasta 150mm (depende del tamaño y peso de las ruedas).
- Puede trabajar con material duro.
- Trabajo en operación batch.

DESVENTAJAS:

- Costo para un molino grande relativamente alto.

En la actualidad, los trapiches están siendo utilizados por mineros artesanales de la Rinconada, Lunar de Oro, se recomienda que deben ser utilizados por personal calificado. La pequeña minería, a lo largo del tiempo ha obtenido el oro a través de la molienda en trapiche y luego la amalgamación con mercurio o directamente la molienda en tambores y amalgamación caso Rinconada. Este tradicional proceso es de poca eficiencia y tiene efectos nocivos, tanto para la salud del minero como para el medio ambiente cuando no es aplicado adecuadamente, lo que ocurre en muchos casos.

Por esto es que algunos expertos en la materia, consideran que para utilizar un trapiche se debe además utilizar concentradores gravimétricos, centrífugos, de flotación y sedimentación. Tomando en cuenta todas las teorías de muchos investigadores es que se decide a optimizar los circuitos de la planta.



Figura N° 17: Armado de Estructura



Figura N° 18: Armado de Estructura del Trapiche



Figura N° 19: Cremallera para eje Principal



Figura N° 20: Ruedas Trituradoras, Tina de Concentración



Figura N° 21: Equipo con Instalación Concluida

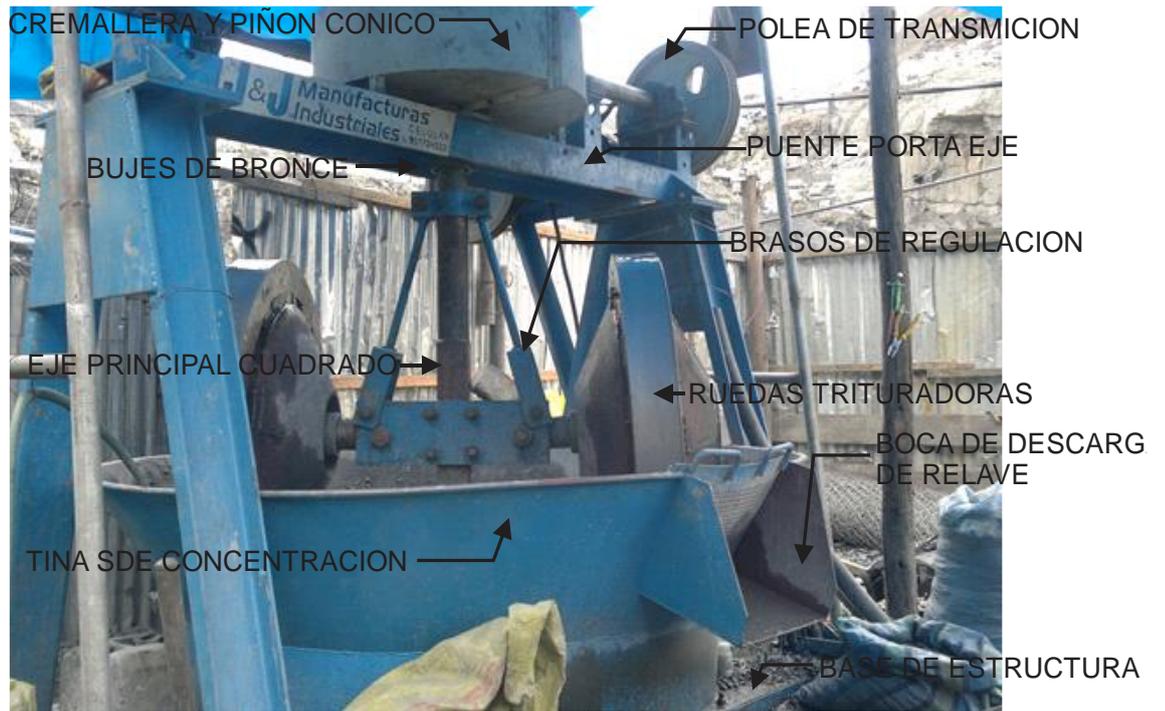


Figura N° 22: Partes de Trapiche



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluar la granulometría de la molienda del concentrado gravimétrico que se alimenta al trapiche.

El oro libre (nativo) en un tamaño de grano entre 20-50 mm y 1-2mm es apropiado para la amalgamación.

Mejorando el circuito, utilizando el trapiche los problemas existentes en el tratamiento de concentrados serán mucho más rentables económicamente y al mismo tiempo el tratamiento metalúrgico de estos y el control de los parámetros de operación serán más eficientes.

Determinar los tiempos de amalgamación en el Trapiche para diferentes leyes.

El resultado del tiempo de molienda y amalgamación en los trapiches es de dos horas elevando el rendimiento de la producción y alcanzando las metas programadas; lo mismo para el tratamiento de concentrados en un circuito semicontinuo con amalgamación; con descargas de cada 2 horas de tratamiento y así reducir los costos de producción.

Mejorando el circuito, utilizando el trapiche los problemas existentes en el tratamiento de concentrados serán mucho más rentables económicamente y al mismo tiempo el tratamiento metalúrgico de estos y el control de los parámetros de operación serán más eficientes.



Una alternativa de solución es el empleo de un sistema de remolienda y amalgamación semicontinua, que consiste en molino, trapiche y amalgamador.



V. CONCLUSIONES

El presente estudio tiene como fin llegar en un momento a sustituir el proceso de amalgamación según los experimentos realizados anteriormente, reemplazando por un proceso combinado de preconcentración utilizando concentradores gravimétricos, partiendo desde el mineral fresco de mina.

Es importante señalar que la minería artesanal requiere un aporte técnico profesional de un ingeniero metalurgista y ambiental, para evitar condiciones y actos inseguros, minimizar la contaminación ambiental, optimizar las operaciones, así de esta manera mejorar la rentabilidad del proceso reduciendo los costos de operación.

De las pruebas realizadas se concluye que usar los concentradores Falcón Icon ayudaría a incrementar la recuperación del Oro y la reducción de emisión de mercurio al medio ambiente.

Dentro de la optimización, en el estudio económico se demuestra que en el circuito de remolienda y amalgamación continua los costos de producción y/o tratamiento de concentrados gravimétricos es menor en 10.62 % cuando el tratamiento de concentrado en este circuito se incrementa el tonelaje tratar.



VI. RECOMENDACIONES:

Se recomienda implementar un laboratorio metalúrgico para realizar los trabajos de optimización de los diferentes parámetros de operación.

Los muestreos en la sección de remolienda y amalgamación continua se deben de realizar todos los días en los diferentes turnos para así determinar las leyes tanto vía húmeda y vía seca y tener un balance metalúrgico real.

Para implementar el concentrador gravimétrico Falcon Icon a un proceso artesanal es importante saber en qué tamaño se encuentra el Oro, esto se hace mediante un análisis granulométrico.

En el momento actual los pequeños mineros se están formalizando y tienen la posibilidad de comprar estos equipos para obtener mayores recuperaciones, y así obtener mayores ganancias.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre Cortés, M., & Cofre Cid, C. (2013). *RECUPERACIÓN DE ORO DESDE RELAVES COMPARANDO PROCESOS CARBÓN IN LEACHING Y LIXIVIACIÓN EN PILAS-ADSORCIÓN*. VALPARAISO: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO.
- Astucuri Tinoco, V. (1994). *Introducción a la Flotación de Minerales*. Lima: Universidad de Lima.
- Aylmore, M. (2001). Treatment of a refractory gold—copper sulfide concentrate by copper ammoniacal thiosulfate leaching. *Minerals Engineering*, 14, 615-637.
- Azañero Ortiz, A. (1999). *Evaluación de reactivos de flotación* (Vols. Vol II N° 4.). Lima, Perú: Revista del Instituto de Investigación de la F.G.M.M.C.G.–U.N.M.S.M.
- Azañero Ortiz, A. (2015). *Concentración y Flotación de Minerales*. Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS.
- Bueno Bullón, H. (2003). *Procesamiento de Minerales*. Jauja: Sin Editorial.
- C., M., Fuerstenau, & Han, K. N. (2009). *Principles of Mineral Processing*. COLORADO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- CORBY G., A., DUNNE, R. C., & UHRIE, J. L. (2014). *MINERAL PROCESSING AND EXTRACTIVE METALLURGY 100 YEARS OF INNOVATION*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- Henley, K. (1975). Mineralogía de mineral de oro y su relación con el tratamiento metalúrgico. *Mineral, Science and Engineering*, 7(4), 289-312.



- Hilari Hilari, J. L. (2018). *ANÁLISIS Y DESARROLLO DEL LABORATORIO QUÍMICO-METALÚRGICO EN LA PLANTA GOLDEN VALLEY S.A. - ECUADOR*. AREQUIPA: UNSA.
- Kelly G., E., & Spottiswood J., D. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales*. Mexico: Editorial LIMUSA.
- Linares Gutiérrez, N. (2001). *PROCESAMIENTO DE MINERALES*. Tacna: Sin Editorial.
- Manzaneda Cabala, J. (1990). *Procesamiento de minerales: molienda y clasificación, flotación*. Lima.
- Manzaneda Cabala, J. (2000). *Procesamiento de minerales*. Lima: Sin Editorial.
- Marsden, J. O., & House, L. C. (2009). *The Chemistry of Gold Extraction*. Colorado: The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Marsden, J., & House, I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. United States: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Martínez, F., Rojas, I., & Llantén, E. (2012). *Beneficio de minerales "Flotación Flash"*. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Mooiman, M. B., & Simpson, L. (2016). Gold Ore Processing. *Refining of Gold- and Silver-Bearing Doré*, 595-615.
- Muñiz Delgado, J. (2010). *Flotación de Minerales*. Arequipa: UNSA.
- Paitan, Á. (2011). *Diseños experimentales aplicado a procesamiento de minerales*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.

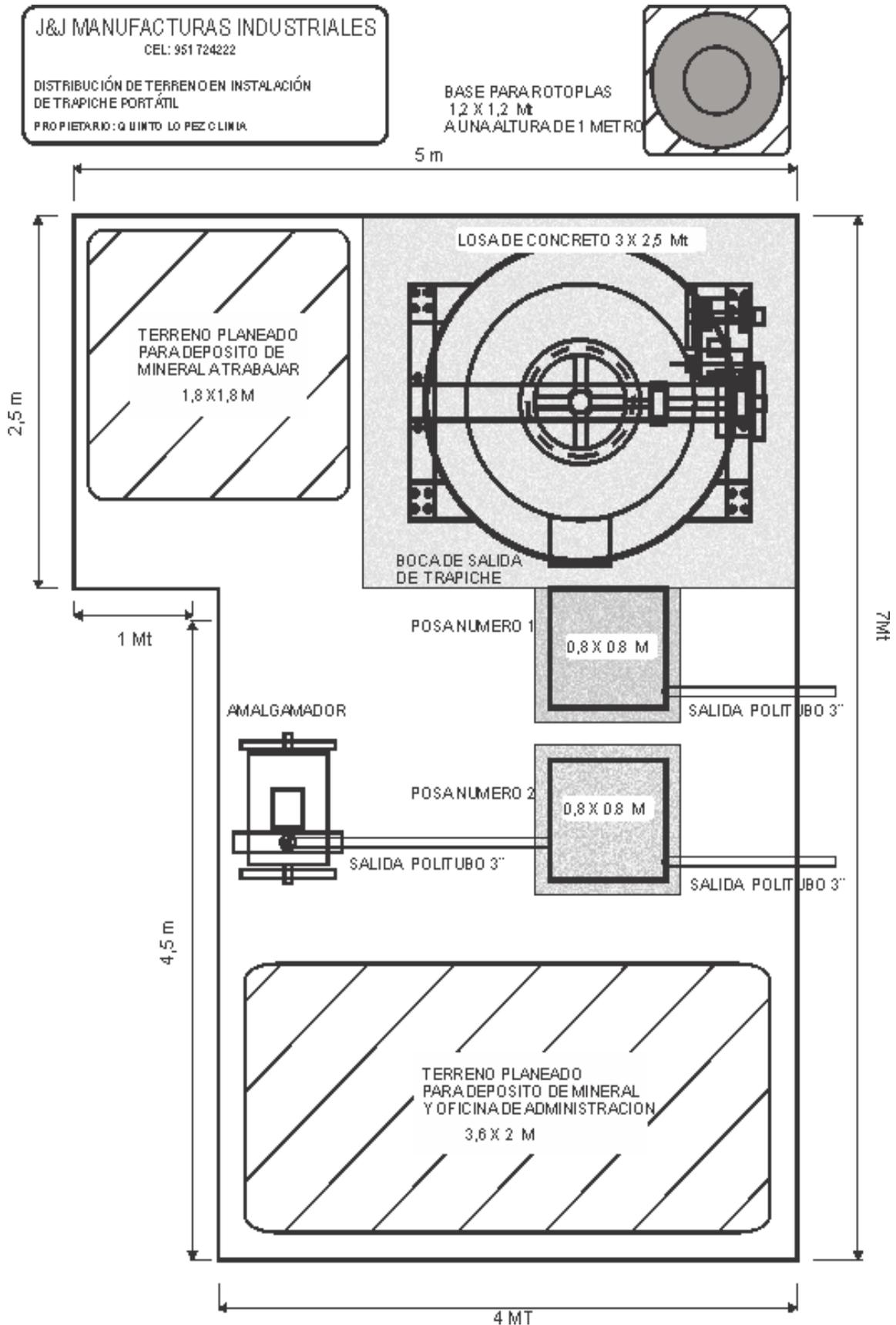


- Ponce Sánchez, M. Á. (2005). *Investigación Comparativa de los Métodos Clásicos de Refinación de Oro en Eficiencia y Costos, Proceso Agua Regia, Proceso Ácido Nítrico, Proceso Agua Regia sin encuarte, Proceso Outokumpu Modificado, para pequeñas Refinerías de Oro*. LIMA: UNI.
- Quiroz Nuñez, I. (1998). *Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales*. Lima: UNI.
- Quispe Suasaca, J. R. (2014). *EVALUACION DEL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS Y CALIDAD DE LA PLANTA MACDESA*. AREQUIPA: UNSA.
- Sutulov, A. (1963). *Flotacion de Minerales*. Chile: Universidad de Concepcion.
- Vargas Gallardo, J. (1990). *Metalurgia del Oro y la Plata*. Lima: San Marcos.
- Velarde Rivera, J. P. (2016). *Modelamiento y simulación de la distribución del tamaño de burbuja y su efecto en la recuperación de cobre*. Arequipa: UNSA.
- Velarde, G. (2005). *Agglomeration control for heap leaching processes*. Arequipa: Sociedad Minera Cerro Verde S. A. A.
- Yianatos B., J. (2005). *Flotación de minerales*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.

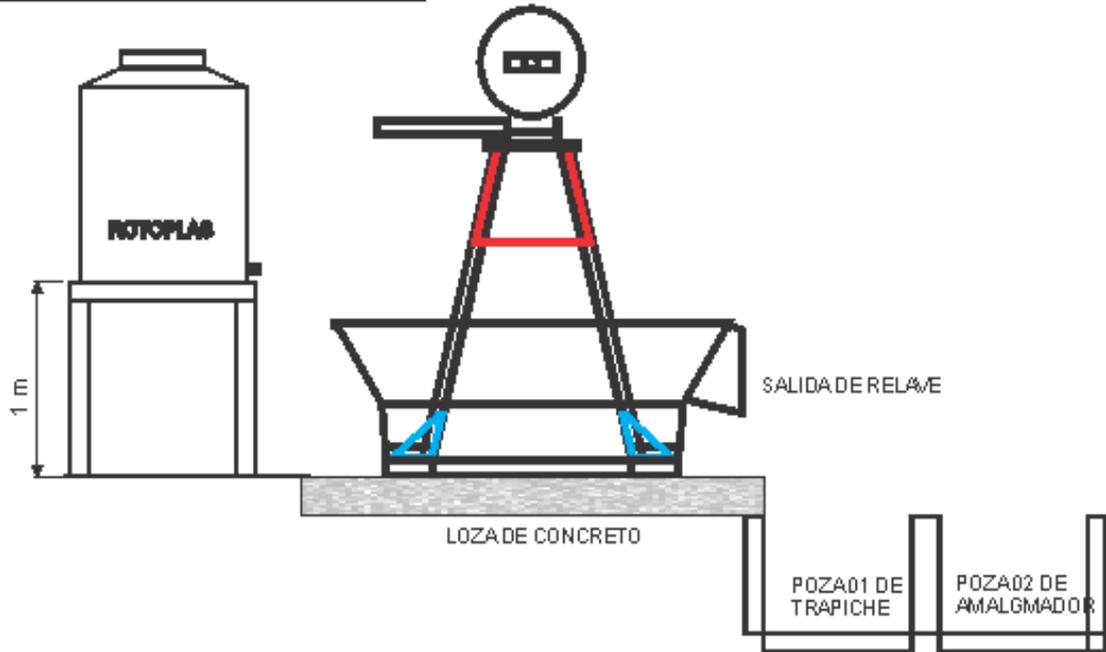


ANEXOS

ANEXO A



J&J MANUFACTURAS INDUSTRIALES
CEL: 951 724222
DETALLE DE LOZA DE CONCRETO, UBICACIÓN
DE ROTOPLAS, Y POZAS
PROPIETARIO: QUINTO LOPEZ CLIMIA



DETALLE DE ENMALLADO DE FIERRO CORRUGADO EN LOZA

