



TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA LA EXTRACCIÓN DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO Y SU POTENCIAL APLICACIÓN A PEQUEÑA ESCALA Y MINERÍA ARTESANAL EN COLOMBIA

Autor:

Iván Darío Castillo Sánchez

Trabajo de grado Presentado como requisito para optar al título de ingeniero ambiental

Director del trabajo de grado Juan Sebastián Chiriví Salomón

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA UNAD ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE

BOGOTA, 2018

TABLA DE CONTENIDO

1	CONTEXTO DE LA EXTRACCIÓN DE ORO CON MERCURIO	9
1.1	Química y metabolismo del mercurio	9
1.2	Extracción de oro con mercurio	12
2	PROBLEMÁTICA ASOCIADA AL USO DEL MERCURIO EN COLOMBIA	14
2.1	Impactos a la salud	16
2.2	Normativa ambiental	17
3	TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE EXTRACCIÓN DE ORO	20
3.1	TÉCNICAS QUÍMICAS	20
3.1.1	Bórax	20
3.1.2	Tiourea	22
3.1.3	Solventes orgánicos	25
3.2	TÉCNICAS FÍSICAS	26
3.2.1	Concentración gravimétrica	26
3.2.1.1	Separación por corrientes verticales	28
3.2.1.2	Separación por medios densos o flotación	29
3.2.1.3	Separación en corrientes superficiales o flujo laminar	31
3.3	TÉCNICAS BIOLÓGICAS	32
3.3.1	Ochroma pyramidale	32
3.3.2	Bacterias	35
3.3.2.1	Biolixivación	36
3.3.2.2	Biooxidación	37
4	ANÁLISIS SOCIO CULTURAL	41
5	CONCLUSIONES	43
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del mercurio.	9
Tabla 2. Solicitudes de explotación minera en Colombia.	15
Tabla 3. Rango de operación de equipos concentración gravimétrica.	27
Tabla 4. Densidad específica principales minerales auríferos.....	35

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Ciclo Biogeoquímico del mercurio.	10
Imagen 2. Información técnica tetraborato de sodio.	20
Imagen 3. Información técnica tiourea.	23
Imagen 4. Principio de operación celda de flotación	29
Imagen 5. Esquema de mesa vibratoria accionada por pedal.	31
Imagen 6. Hábitat natural de <i>Ochroma pyramidale</i> en Colombia.	33
Imagen 7. Obtención de extracto de <i>Ochroma pyramidale</i>	34
Imagen 8. <i>Chromobacterium violaceum</i>	36
Imagen 9. <i>Pseudomonas fluorescens</i>	37
Imagen 10. Partícula de oro en mineral refractario.	38
Imagen 11. <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	39
Imagen 12. <i>Lysinibacillus sphaericus</i>	39



LISTA DE ANEXOS

Anexo A: HDS / MSDS Mercurio	53
Anexo B: HDS / MSDS Borax.....	55
Anexo C: HDS / MSDS Tiourea.....	57

RESUMEN

Con la firma del convenio de Minamata, el cual se reglamentó a través de la Ley 1658 de 2013, Colombia propuso la meta erradicar el mercurio de la minería en un plazo de 5 años y de todo proceso industrial en un plazo de 10 años. Ya en el 2018 y cumplidos los plazos de implementación de la ley, los organismos de control no cuentan con las herramientas, económicas o administrativas, para hacer cumplir los compromisos establecidos. Es por eso que, en el presente documento se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva en bases de datos de repositorios de universidades, revistas de investigación y empresas de innovación, con el fin de documentar diferentes técnicas exitosas alrededor del mundo en las que se reemplazó el mercurio como agente primario para la extracción de oro. A través de la consideración de variables socio-culturales y económicas, la información recopilada servirá de apoyo técnico en la industria de la Minería Artesanal y a Pequeña Escala (MAPE) para dar cumplimiento con los programas y proyectos de minería sin mercurio.

ABSTRACT

Colombia has been proposed to eradicate mercury from mining and industrial processes, which is in accordance with the Minamata agreement. Throughout the Law 1658 (2013), mercury eradication has a term of 5 and 10 years for mining and industrial processes, respectively. Nevertheless, the control agencies do not yet have economic or administrative tools to enforce the established commitments. In this review research, different successful free-mercury extraction techniques were compiled. Through the consideration of socio-environmental variables, the information collected here will serve as technical support in the small-scale and artisanal mining industry, in order to comply with mercury-free mining programs and projects.

OBJETIVOS

Documentar técnicas alternativas de extracción de oro que eliminen el uso del mercurio, analizando variables a tener en cuenta para su implementación en la Minería Artesanal y a Pequeña Escala (MAPE) en Colombia.

Objetivos específicos

- Reconocer los impactos a la salud y al medio ambiente derivados del uso del mercurio.
- Identificar variables a tener en cuenta para la implementación de las técnicas documentadas en procesos de MAPE en Colombia.
- Evaluar las variables y proponer la implementación de la técnica más competente para ser implementada en el territorio colombiano.

JUSTIFICACIÓN

A nivel mundial se han presentado iniciativas para el control y prevención de enfermedades causadas por el uso del mercurio en la minería. En el 2013, noventa y un países a través de la Organización de Naciones Unidas firmaron el convenio de Minamata, el cual busca proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos del mercurio (PNUMA, 2013).

Colombia, dando cumplimiento a la firma del convenio adoptado en 2103, gestionó un plan para el control y reemplazo del mercurio a mediano y largo plazo; sin embargo, aún se encuentra disponible en el mercado para el uso en la extracción de oro y los controles de importación son laxos y débiles. Doscientos noventa y seis municipios en 19 departamentos sustentan parte de sus económicas con MAPE, en los cuales, el consumo total de mercurio se acerca a las 193 toneladas por año. (Minminas, 2016).

Los esfuerzos administrativos del gobierno nacional son deficientes y los programas de apoyo formulados por el gobierno nacional a través del plan estratégico (Minminas, 2016) no dan alternativas prácticas para el reemplazo del mercurio en la MAPE. En campo, de momento es inevitable erradicar, desincentivar o reemplazar el uso del mercurio.

La documentación e investigación de técnicas y tecnologías que permitan el cumplimiento de las metas propuestas, permitirá dar cumplimiento a los compromisos adquiridos, conservar los recursos naturales, mejorar la calidad de vida de los mineros MAPE y aumentar la competitividad en el mercado.

1 CONTEXTO DE LA EXTRACCIÓN DE ORO CON MERCURIO

1.1 Química y metabolismo del mercurio

El mercurio es el octogésimo elemento de la tabla periódica que recibe el nombre en honor al dios griego de los viajes y el comercio debido a su velocidad y movilidad. Debido a sus características fisicoquímicas (Tabla 1), es el único metal que es líquido a temperatura ambiente y que emite vapores que saturan la atmosfera en un espacio confinado, por encima de los niveles de exposición segura para la salud humana (UNEP, 2012).

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del mercurio.

PARÁMETRO	VALOR
Peso específico	13,6 g/cm ³
Numero atómico	80
Densidad	16,6 g/ml
Punto de ebullición	356,72 °C
Punto de fusión	-38,4 °C
Tensión superficial	484 dinas/cm
Presión de vapor	0,163 Pa
Solubilidad en agua	56 µg/L a 25 °C

Fuente: Lenntech. (2016). *Mercurio-Hg. Propiedades químicas del mercurio*

Dado su origen magmático, en su ciclo biogeoquímico (Imagen 1) intervienen diferentes factores que permiten una fácil movilidad y dispersión en cualquier medio terrestre (Español, 2012); por lo tanto, se encuentra presente de manera natural en suelos, aguas, aire y la cadena trófica; sin embargo, a partir de la revolución industrial se ha incrementado su concentración debido a acciones antrópicas.

Según el Programa nacional de riesgos químicos (2008) del ministerio de salud de Argentina, el mercurio existe en el ambiente en tres formas:

- Mercurio elemental

Proveniente de erupciones volcánicas, desgasificación de la tierra y erosión de rocas. Se encuentra presente en la atmosfera y océanos en pequeñas trazas. En el suelo se encuentra en sulfuros de mineral (cinabrio).

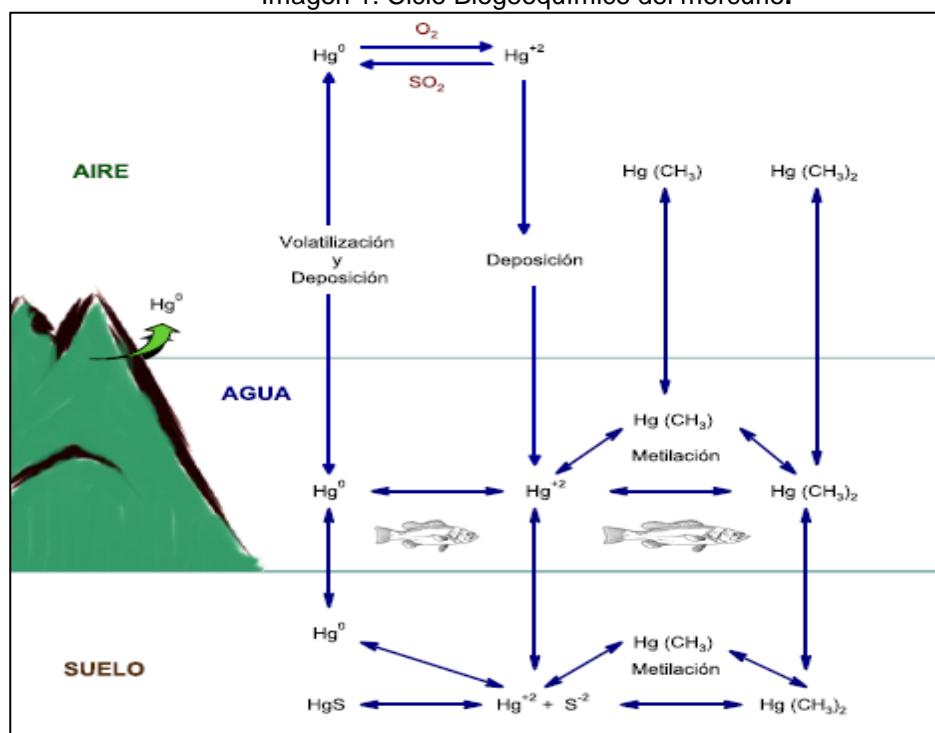
- Compuestos inorgánicos

Formado a partir de sus formas catiónicas del mercurio. Los más representativos son las sales de acetato de mercurio y óxidos de mercurio.

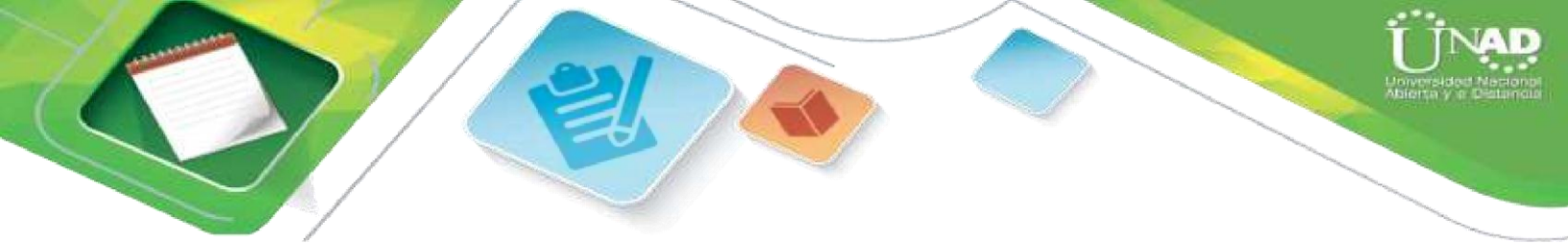
- Compuestos orgánicos

Formados por la intervención de sistemas biológicos y la acción enzimática. Tienen en común la capacidad de inducir cambios en los sistemas neuronales de los seres vivos. El elemento más representativo es el metilmercurio; sin embargo, cada uno de los compuestos tienen espectros diferentes de toxicidad.

Imagen 1. Ciclo Biogeoquímico del mercurio.



Fuente: PNUMA & MADS. Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala



La baja capacidad de degradación del mercurio se debe a que tiene baja solubilidad, no reacciona con ácidos o bases y tiene gran afinidad por los compuestos orgánicos, a los cuales se une a través de enlaces covalentes entre metal - carbono (Martínez, 2004), favoreciendo la bioacumulación en los organismos vivos. Durante este proceso, suprime los mecanismos enzimáticos celulares, interfiriendo con el metabolismo celular (Programa nacional de riesgos químicos, 2008) y la síntesis de proteínas en la mitocondria.

Según la OMS (2017) los factores que determinan eventuales efectos sobre la salud, así como su gravedad, son particulares para cada caso y depende de los siguientes factores:

Forma de mercurio. Siendo la forma más toxica es la forma orgánica.

Dosis. Puede ser letal a partir de 50 mg.

Edad o estado de desarrollo del organismo expuesto.

Duración de la exposición.

Vía de exposición: inhalación, ingestión o contacto cutáneo.

Una vez ingresa a un organismo la toxicodinámica del mercurio varía, causando lesión celular en los tejidos donde se acumule en concentraciones suficientes. En el caso del riñón, disminuye la actividad de las fosfatasas alcalinas alterando el transporte de potasio y la ATP-asa en la membrana; en el encéfalo atraviesa la barrera hematoencefálica e inactiva las neuronas; en el sistema enzimático, inhibe enzimas esenciales: catalasas plasmáticas, colineste rasa globular, glutathionreductasa globular, glutathion-reductasa cerebral, galactoxidasa, dopadecarboxilasa, monoamino-oxidasa, glicero-fosfatasa, succino-deshidrogenasa, di y trifosfo-piridín-nucleótido (Ramírez, 2008).

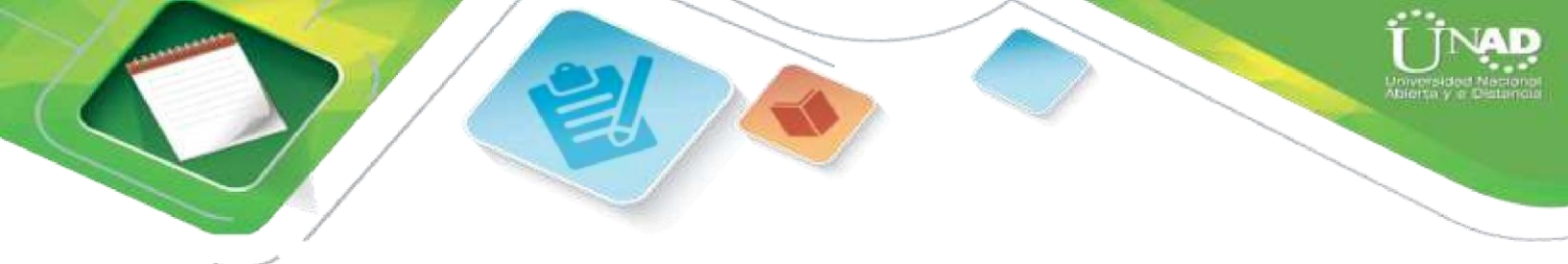
Los vapores de mercurio en el aire en torno de los lugares donde se realizan prácticas de minería con mercurio, casi siempre exceden el límite de la OMS para la

exposición pública de $0,001 \text{ mg/m}^3$. La exposición a niveles de vapores de mercurio superiores a $1,2 \text{ mg/m}^3$ puede ser mortales (UNEP, 2012).

1.2 Extracción de oro con mercurio

La amalgamación es una mezcla no homogénea que se produce por la alta densidad del oro, el cual logra romper la elevada tensión superficial del mercurio y queda atrapado en su interior (UPME, 2014). La técnica de extracción de oro consiste en agregar excesos de mercurio sobre los minerales previamente molidos o pulverizados y luego mediante movimientos, permitir que éstos se ligen intrínsecamente para posteriormente separarlos (PNUMA & MADS, 2012). Esta técnica es ideal para separar y aglomerar partículas de oro de tamaños entre los 30 y 250 μm . Si la caracterización inicial del material aurífero muestra tamaños de partículas inferiores a 30 μm , las partículas de oro no se amalgamarán con el mercurio y se escaparán en los lodos de drenaje (PNUMA & MADS, 2012).

La minería artesanal y de pequeña escala, tradicionalmente ha empleado la batea cónica como medio de concentración. Durante este proceso, generalmente son añadidos entre 2 a 4 kg de mercurio (Llamosas, Villachica & Villachica, 2012) y la carga es mezclada intensamente con manos y/o pies. El material de exceso no amalgamado es retirado de la batea empleando chorros de agua a contra corriente o empleando un movimiento circular, permitiendo que los materiales más pesados permanezcan en el fondo del recipiente. La aplicación de una u otra técnica se encuentra en función de la experticia y habilidad del minero. El concentrado resultante, debe ser prensado para retirar el mercurio en exceso. Tal procedimiento se realiza a través de textiles semipermeables que hacen las veces de membrana en las que queda atrapada la amalgama seca (pasta), el mercurio líquido metálico es recuperado y almacenado en recipientes con agua o ACPM para su posterior utilización (PNUMA & MADS, 2012).



De acuerdo con Ilyas & Lee (2018), las amalgamas formadas generalmente tienen entre 40% y 50% de Hg y entre 50% y 60% de otros metales como oro, plata y cobre. El proceso más común para descomponerlas es aumentar la temperatura por encima de 360°C, punto en el que se supera la temperatura de ebullición y todos los compuestos de mercurio se evaporan liberando el oro (Ilyas & Lee, 2018). Cuando las amalgamas se queman en recipientes abiertos, el mercurio se evapora y es transferido a la atmosfera; de igual manera las aguas de lavado se vierten de manera directa a las fuentes hídricas sin control. De manera general, el mercurio se libera en el aire, el agua y el suelo en varios pasos de este proceso (UNEP, 2012).

De acuerdo con Hinojosa (2016), es común que el oro se encuentre acompañado de diferentes minerales que limitan el uso del mercurio en el proceso de amalgamación, como:

- Los sulfuros de arsénico, antimonio y bismuto reaccionan con el mercurio, produciendo una pérdida significativa de mercurio. Minerales como la pirrotina, piritita y calcopiritita pueden tener un efecto negativo sobre la amalgamación.
- La baritina, el talco, la esteatita y otros silicatos hidratados de magnesio y aluminio pueden interrumpir el proceso e incrementar las pérdidas de oro y mercurio.
- Los lubricantes y las grasas se fijan al mercurio y lo recubren con una película que impide el contacto con el oro, adicionalmente, tienden a atrapar sulfuros, talco, arcillas y otros minerales.
- Las aguas de procesamiento que tienden a acidificarse por la presencia de minerales, tienen efectos dañinos para la amalgamación por la oxidación de sulfuros. Es necesaria la aplicación de sustancias básicas para contrarrestar los efectos.

En teoría, la amalgamación es un proceso eficiente que usualmente mostraría tasas de recuperación de entre el 80% al 95% de oro; sin embargo, dadas las anteriores

circunstancias y la naturaleza de los depósitos auríferos, en la práctica se suelen alcanzar eficiencias de recuperación del orden del 50% al 70% (Llamosas, et al., 2012).

2 PROBLEMÁTICA ASOCIADA AL USO DEL MERCURIO EN COLOMBIA

Según un informe de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) del 2004 citado por Español (2012), la minería artesanal a nivel mundial ocupaba directamente a 13 millones de personas. No obstante, Español cita un informe del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en el cual se calcula que en la minería del oro artesanal y en pequeña escala participan entre 10 y 15 millones de mineros alrededor del mundo.

Doscientos noventa y seis municipios de 19 departamentos sustentan parte de sus economías con recursos provenientes del oro y el consumo total de mercurio se acerca a las 193 Toneladas/año (Minminas, 2016). Particularmente, Antioquia es el departamento con mayor número de títulos mineros y solicitudes de exploración minera para el aprovechamiento de oro (Tabla 2), por lo que se espera que sea el primer productor de oro de Colombia. El mayor sistema productivo de oro se encuentra ubicado en los municipios de: El bagre, Caucasia, Segovia y Remedios, con un consumo promedio de 129,22 Toneladas año, que representa aproximadamente el 67% del de mercurio total del país (Corantioquia, 2016).

Colombia es el segundo país del mundo después de China, que más emplea mercurio en procesos de extracción de oro; sin embargo, es una actividad que no se realiza de manera eficiente. Según datos del World Gold Council (2011) citados por Díaz (2014), en el 2011 Colombia ocupaba el puesto número 16 de productores de oro a nivel mundial. Australia, siendo el segundo productor de oro mundial después de China, emplea una tercera parte del mercurio produciendo 7 veces más oro que Colombia.

Para el año 2016, China fue el mayor productor del mundo y representó alrededor del 14 % de la producción mundial total con 463,7 toneladas. Colombia descendió una casilla ocupando lugar 17 con 58,1 toneladas de oro, reflejando el atraso en infraestructura para la extracción e inversión social (World Gold Council, 2016).

Tabla 2. Solicitudes de explotación minera en Colombia.

DEPARTAMENTO (productores)	MUNICIPIOS (productores)	TÍTULOS	SOLICITUDES
Antioquia	94	149	1122
Bolívar	17	50	375
Boyacá	2	1	7
Caldas	20	120	469
Cauca	25	20	249
Cesar	7	2	16
Choco	22	8	515
Córdoba	6	0	81
Guainía	1	2	27
Guajira	1	1	5
Huila	13	9	81
Nariño	25	19	0
Norte de Santander	3	2	4
Putumayo	6	0	147
Quindío	1	1	2
Risaralda	3	3	61
Santander	7	40	143
Tolima	27	17	152
Valle del cauca	16	1	76

Fuente: Minminas. (2016). *Pan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio.*

2.1 Impactos a la salud

Para la Organización Mundial de la Salud, el mercurio, es toxicológicamente un elemento de interés en salud pública (OMS, 2017), debido a que ocasiona alteraciones al sistema nervioso central, sistema digestivo, sistema tegumentario, pulmones, riñones, mal formaciones y la muerte. Especialmente la forma orgánica representada por el metilmercurio, que ingresa en la cadena trófica a través de la digestión y una vez en el organismo se acumula y se magnifica.

Philippus Theophrastus Paracelsus “Paracelso” (1493 -1541) fue un médico y alquimista suizo que intentó explicar por primera vez los efectos adversos del mercurio en el ser humano. A través de sus estudios médicos sobre la sífilis y su posible cura, concluyó que el mercurio no debía ser aplicado externamente, sino que debía ser ingerido para no causar daños, pues el cuerpo lo eliminaría en forma de sudor, excreta u orina. Posteriormente, el estudio científico realizado sobre los efectos del mercurio en el ser humano, realizado en el año 1557 por el médico francés Jean Fernel, describió los síntomas y signos del envenenamiento con mercurio (Programa nacional de riesgos químicos, 2008).

Los efectos del mercurio en el organismo quedaron en evidencia en la década de los 50's, cuando se relacionaron enfermedades con la exposición tóxica a las altas dosis de metilmercurio presente en peces y mariscos de consumo (enfermedad de Minamata). Tras 50 años de estudios médicos y debates, se determinó la relación causa/efecto de la enfermedad y el mercurio. Para 2009 se habían identificado 2.271 víctimas y más de 10.000 afectados, lo que llevo al consenso mundial en 2013 para la firma del Acuerdo de Minamata (PNUMA, 2013).

De acuerdo con Instituto Nacional de Salud (INS), entre el 2013 y el 2015, en Colombia se reportaron 1126 casos de intoxicación con mercurio por exposición directa (Fernández, 2017). Antioquia con 312 casos, es el departamento con mayor número de reportes por intoxicación con mercurio; seguido de Chocó con 218

casos; Córdoba, 206; Bolívar, 167 y Sucre, 143 casos. Históricamente esta cifra tiende a aumentar año tras año.

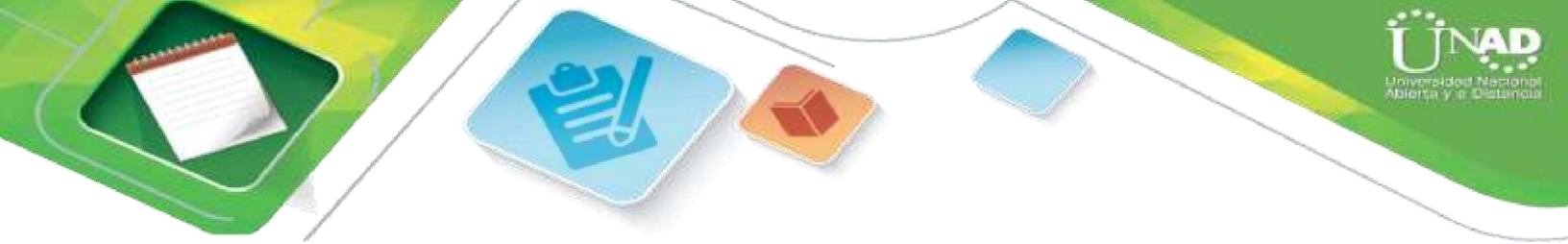
La ingesta es uno de los medios a través del cual el mercurio puede llegar a un organismo, por lo tanto, el consumo de productos del mar contaminados con mercurio pone a millones de personas en riesgo de envenenamiento, afectando el desarrollo del cerebro y del sistema nervioso (UNEP, 2012). De igual manera, cuando la exposición es por inhalación, los vapores de mercurio tienen como órganos blancos el sistema nervioso central (SNC), sistema nervioso periférico (SNP), aparato respiratorio y riñones.

Según el Programa nacional de riesgos químicos (2008), en la fase inicial de la intoxicación, esta se manifiesta con escalofríos, dolor muscular, fiebre, sequedad de boca y garganta y cefaleas; aparece un sabor metálico en la boca, náuseas y vómitos (Anexo A). La fase intermedia se caracteriza por presentar insuficiencias respiratorias, convulsiones y afectaciones hepáticas. La fase tardía y exposiciones crónicas se caracterizan por el incremento en la frecuencia de las células aneuploides y aberraciones cromosómicas que conllevan a la mutagénesis y la teratogénesis.

2.2 Normativa ambiental

Consecuencia del envenenamiento masivo ocurrido en la década de los 50 en Minamata (Japón), en el 2013 la Organización de Naciones Unidas firmó el convenio que busca proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos del mercurio. El convenio de Minamata fue adoptado por 91 países incluido Colombia (PNUMA, 2013):

“El Convenio busca llamar la atención sobre un metal usado a nivel mundial y omnipresente que, si bien es de origen natural, tiene un amplio uso en objetos cotidianos y se libera a la atmósfera, al suelo y al agua desde



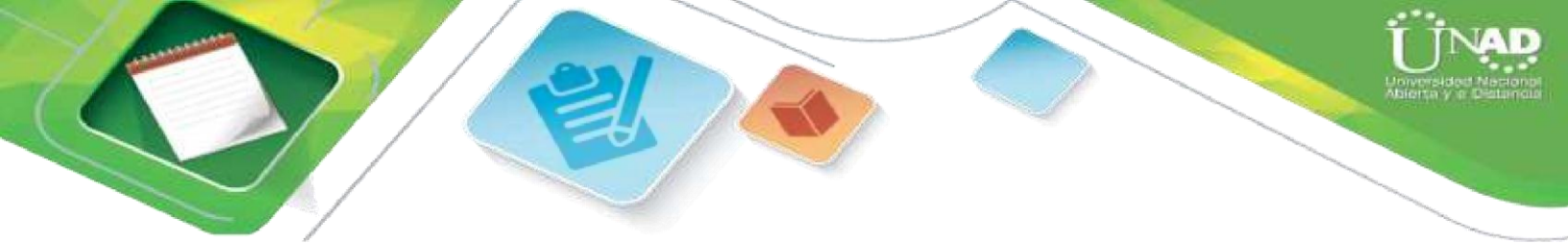
diversas fuentes. El control de las emisiones antrópicas de mercurio a lo largo de su ciclo de vida ha sido un factor clave a la hora de determinar las obligaciones del Convenio” (p. XX).

Con la expedición de la ley 1658 de 2013, el congreso de la república ratificó los compromisos adquiridos durante la firma del convenio, estableciendo las disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales y mineras del país, adicionalmente se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación.

En el artículo 3 (Ley 1658, 2013) se decreta que los ministerios e instituciones sectoriales establecerán las medidas necesarias para reducir y eliminar de manera segura y sostenible, el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, además establece plazos para erradicar el uso del mercurio en todo el territorio nacional, los cuales son de 5 años para las actividades mineras y 10 años para los demás sectores productivos.

Así, en el marco de la Ley 1658 de 2013 y el Convenio de Minamata, se formuló el Plan Único Nacional de Mercurio, adoptado en 2014 y acordado entre ocho ministerios y dos instituciones mineras (Minminas, 2016), estableciendo metas, acciones, planes, programas, proyectos y responsabilidades institucionales e interinstitucionales en el ámbito nacional para reducir, eliminar, prevenir y controlar la contaminación de mercurio (MADS, 2014).

“Reducir y eliminar progresivamente el uso del mercurio en todo el territorio nacional, en la minería a julio de 2018 y todos los procesos industriales y productivos a julio de 2023, junto con el desarrollo de las actividades relacionadas con cada una de las etapas del ciclo del mercurio como uso, importación, producción, comercialización, manejo, transporte, almacenamiento, disposición final y liberación al ambiente, de acuerdo con lo establecido en la ley 1658 de 2013, con el fin de proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropógenas de mercurio y



compuestos de mercurio de conformidad con lo establecido en el marco del Convenio de Minamata sobre Mercurio, suscrito por Colombia el 10 de Octubre de 2013, así como los compromisos que asumiría Colombia sobre el tema en el proceso de adhesión de Colombia a la OCDE” (p. XX).

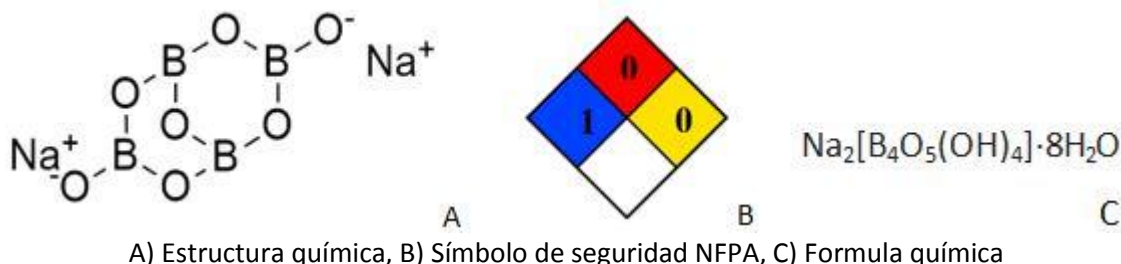
3 TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE EXTRACCION DE ORO

3.1 TÉCNICAS QUIMICAS

3.1.1 Bórax

El tetraborato de sodio, borato de sodio o Bórax, es un cristal incoloro soluble en agua y de estructura cristalina y es el borato más abundante en la tierra, formado a partir de la evaporación de aguas con altos contenidos de sales. Debido a su capacidad de disolver óxidos metálicos, es usado ampliamente en la industria de la metalurgia como material fundente, desoxidante y en aleaciones con materiales no ferrosos (Hurlbut & Klain, 1997). De acuerdo con la clasificación de la norma NFPA 704 de la National Fire Protection Association, el bórax presenta un riesgo leve a la salud (Imagen 2), causando irritación o daños menores, aún en contacto prolongado con la piel, las vías respiratorias y los ojos; presenta alta estabilidad y no existen riesgos de inflamabilidad (Anexo B); sin embargo, existen reportes del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (2006) que relacionaron afectaciones a la salud de los seres vivos en situaciones extremas de consumo directo (Appel & Na-Oy, 2012).

Imagen 2. Información técnica tetraborato de sodio.



A) Estructura química, B) Símbolo de seguridad NFPA, C) Formula química

En estudios toxicológicos de PAN pesticides databases citados por Eppers (2017), se determinó una dosis letal de 2.66 g/kg del peso corporal, que indica que una

persona adulta de 70 kg debería consumir unos 186 gramos para sufrir consecuencias mortales.

De acuerdo con Eppers (2017), en un proceso típico de aprovechamiento de oro mediante el uso de bórax se contemplan 4 etapas principales:

- *Trituración y molienda:*

Funciona bajo el principio de impacto y atrición, en la que tambores metálicos o molinos de bolas, pulverizan el material extraído con el fin de disminuir el tamaño de las partículas y aumentar la superficie de contacto. Normalmente, el oro se encuentra encapsulado en la matriz del mineral sedimentario que le contiene, así que, para asegurar una granulometría adecuada para la aplicación del método, se emplean tamices o filtros que aseguran el tamaño ideal (Eppers, 2017).

- *Concentración gravimétrica:*

Etapas auxiliar en la cual se aumenta la concentración del metal precioso mediante la separación del material excedente, esto se logra a través de la implementación de diferentes metodologías cuyos principios se basan principalmente en la diferencia de densidades, tamaño de partículas, pesos específicos, afinidad química, entre otros.

- *Fusión directa con bórax:*

Saturado el medio filtrante, este es retirado de la canaleta y lavado en un recipiente con el fin de retirar las partículas de oro atrapadas. Una pequeña cantidad de jabón es adicionada para reducir la tensión superficial del agua y así permitir la decantación de las partículas más finas de oro que se encuentren en suspensión (Appel & Na-Oy, 2012).

Vertido el material filtrado en un crisol y empleando una fuente de calor externa (acetileno, GLP, carbón, etc.) se aumenta la temperatura hasta llegar al punto de fusión permitiendo la separación de fases. La fase líquida, corresponde al bórax el cual se torna viscoso y de color rojizo; en la fase sólida se encuentra el oro con alta pureza. La escoria o nata producto de la fusión suele incorporarse de nuevo en el

proceso de fusión debido a que generalmente quedan trazas de metales que se pueden recuperar.

El exceso de bórax en la mezcla puede ocasionar una mayor cantidad de escoria, pérdida de homogeneidad y una mayor cristalización, además de la dificultad en la separación de las fases sólido - líquido, es por ello que León (2017) recomienda que la proporción de bórax – mezcla debe ser de 1:1.

En condiciones ambientales el punto de fusión del oro es de 1.063 °C (Lenntech, 2016) y el del bórax de 743 °C (Hurlbut & Klain, 1997); sin embargo, una de las ventajas de esta técnica es la disminución del punto de fusión de toda la carga debido a que al mezclarse con metales, el bórax actúa como catalizador. La menor temperatura de fusión permite la implementación de la técnica de manera fácil en áreas de difícil acceso y con recursos o equipos limitados, logrando rendimientos de alrededor del 97 %.

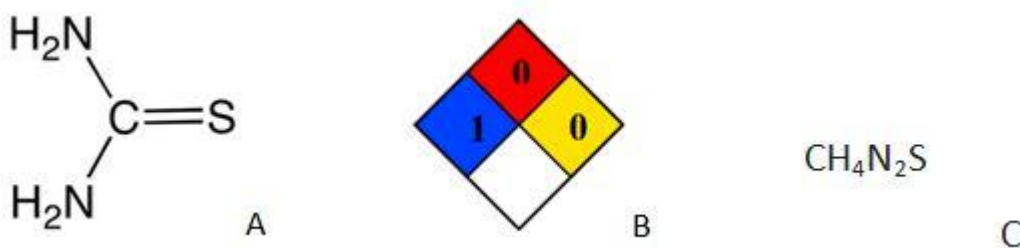
3.1.2 Tiourea

La tiourea o tiocarbamida, es un compuesto formado por cristales incoloros de características rómbicas que se disuelve fácilmente en agua en reacciones neutras (Química de la tiourea o tiocarbamida). Sus aplicaciones son variadas en la industria química y metalúrgica: aditivo orgánico para mejorar la eficiencia durante refinación electrolítica del cobre, dar características ignífugas a diferentes materiales o inhibidor para la decoloración de lanas (Guerreo, 2015).

De acuerdo a las recomendaciones de seguridad, la tiourea presenta un riesgo moderado a la salud y el ingreso al organismo se puede dar por vía cutánea, ingesta o vía respiratoria. Las exposiciones prolongadas por alguna de las vías de exposición, puede ocasionar daños a la médula ósea, anemia, alteraciones de la glándula tiroidea y cáncer (Mintrabajo, 1996). Aunque no presenta riesgo de inflamación, en caso de incendio se descompone en gases de óxidos de azufre y

nitrógeno (Imagen 3); las exposiciones a estos gases durante cortos periodos de tiempo, ocasionan irritación de los ojos y el tracto respiratorio (Anexo C). La dosis letal de la tiourea es de alrededor de 10 g/Kg del peso corporal, mucho menor que el cianuro, el mercurio e incluso el bórax; sin embargo, en su etapa de descomposición, se forman diversos productos de interés ambiental que requieren de algún tipo de tratamiento, como la urea, amoniacó, iones sulfato y nitrógeno, entre otros (Ilyas & Lee, 2018).

Imagen 3. Información técnica tiourea.



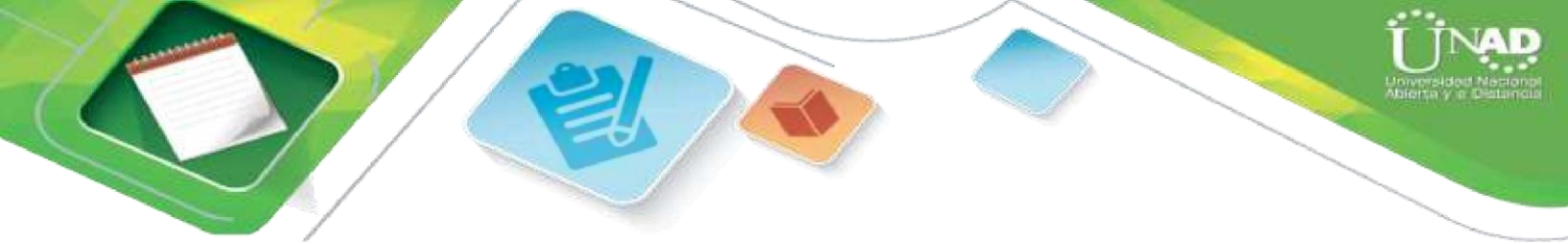
A) Estructura química, B) Símbolo de seguridad NFPA, C) Fórmula química

La técnica de lixiviación con tiourea, fue desarrollada por Moir (1906) (Hilson & Monhemius, 2006), y documentada en la década de los 40's por Plaskin y Kozhukhova en la antigua unión Soviética (Ilyas & Lee, 2018). Surgió como alternativa a la lixiviación de oro debido a las restricciones que en su momento se impusieron a las técnicas de extracción de oro empleadas, principalmente al cianuro (cianuración).

A pesar de ser una técnica novedosa y con un tiempo significativo de desarrollo e investigación, no fue explorada en profundidad, sino hacia mitades de la década de los 80's, ya que para su implementación con éxito, se requiere del control de diferentes parámetros físico-químicos como:

- *pH*

La lixiviación con tiourea se lleva a cabo en un medio ácido. Manteniendo el pH entre 1.8 y 2.5 se encuentra el rango de mayor activación y, por consiguiente, mejor



recuperación del metal precioso (Carrillo, 2013). Con valores superiores a un pH de 4, existen reacciones de descomposición en la tiourea que afectan la eficiencia en la separación de oro y un incremento súbito del pH (Guerreo, 2015).

○ *Potencial Redox*

El control de este parámetro permite el consumo y posterior descomposición de la tiourea. Las soluciones ácidas favorecen la estabilidad de la tiourea, aumentando la eficiencia en el proceso de lixiviación. Aunque es un parámetro que muy pocas veces se puede controlar, Hilson y Monhemius (2006) indican que el rango de trabajo óptimo debe estar entre 150 mV y los 250 mV.

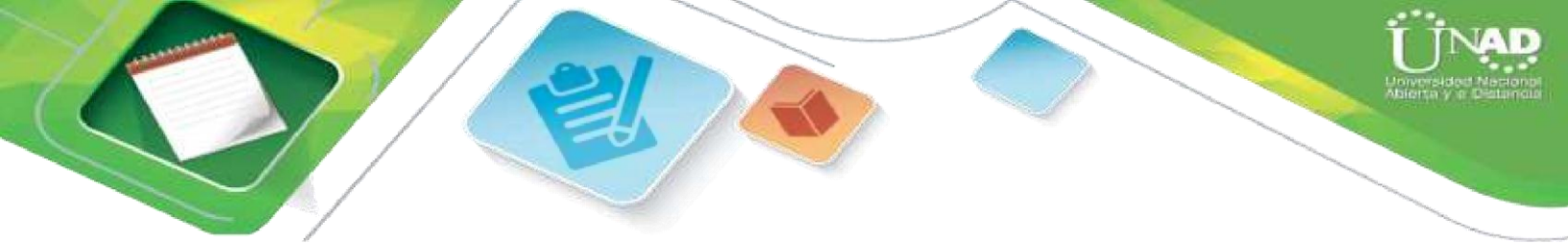
○ *Concentración de tiourea*

De acuerdo con Carrillo (2013), experimentalmente se ha demostrado que la concentración óptima para la disolución del oro está entre los 0,5 g/L y 10 g/L, dependiendo de las características mineralógicas y de los metales a extraer.

○ *Concentración del agente oxidante*

La tiourea por sí sola no es un lixivante efectivo, es por ello que se debe emplear un agente oxidante auxiliar como sulfato férrico, peróxido de sodio, peróxido de hidrógeno, ozono, oxígeno, etc. Usualmente las concentraciones que varían de 1 g/L a 12 g/L, dependiendo de la concentración de la tiourea empleada (Carrillo, 2013). Los agentes oxidantes más efectivos son los que contienen el ion férrico; sin embargo, generan un mayor consumo de tiourea en la lixiviación. Un exceso del agente oxidante puede inhibir la lixiviación del oro y obtener deficientes tasas de recuperación (Ilyas & Lee, 2018)

La extracción de oro con tiourea resulta eficaz si se logran controlar los parámetros antes mencionados, los cuales afectan la química de la lixiviación, alcanzando rendimientos de hasta el 96% del oro en el mineral (Carrillo, Córdoba & Delgado, 2013); sin embargo, (Hilson & Monhemius, 2006) mencionan rendimientos de hasta el 99% en condiciones ideales.



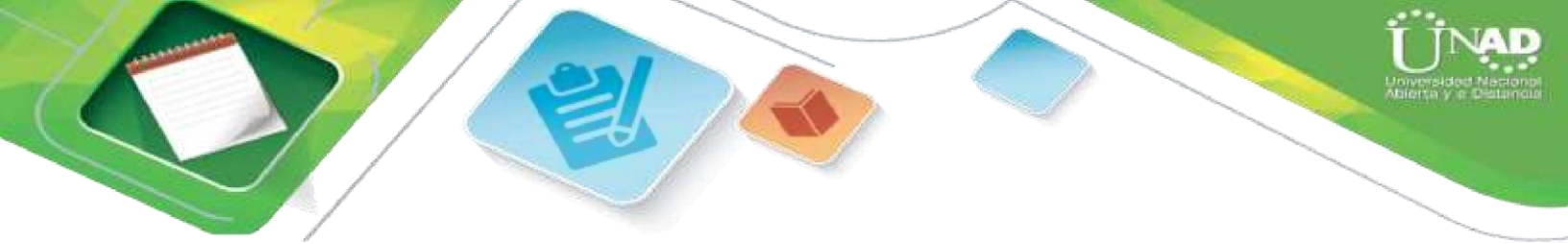
Los altos consumos de tiourea, equipos de monitoreo y personal calificado, se traducen en un elevado costo de operación, en ocasiones incluso mayor que los métodos tradicionales de extracción de oro, convirtiéndola en una técnica únicamente competitiva a escala industrial. Adicionalmente, se deben emplear técnicas y tecnologías para el tratamiento de contaminantes secundarios en efluentes, producto de la descomposición de la tiourea, cuya vida media de descomposición en aguas superficiales y suelos es de hasta 168 horas bajo biodegradación aeróbica acuosa y hasta 336 horas en aguas subterráneas sin biodegradación (Ilyas & Lee, 2018).

3.1.3 Solventes orgánicos

Los solventes orgánicos se catalogan como compuestos de alta volatilidad conformados principalmente por carbono (Quiminet, 2008), con la propiedad de disolver materias primas o de modificar propiedades específicas de algún elemento. Posterior a su uso se evaporan del medio sin dejar trazas, constituyendo una fuente importante de contaminación atmosférica. De acuerdo con la revista *Daphnia* (1998), constituyen una materia prima de primera necesidad para diferentes tipos de industrias, entre las que se encuentran la alimentaria, cosméticos, madera, construcción, plásticos, entre otras.

Según Avraamides, citado por Perea (2016), algunos solventes orgánicos del grupo nitrilo, tienen la capacidad formar complejos con el oro en soluciones acuosas alcalinas, lixiviándolo en un proceso similar al ocurrido con el cianuro. Igualmente, estudios realizados por Groudev, Groudeva, & Spasova, citados por el mismo autor (Perea, 2016) relacionan la lixiviación de oro con aminoácidos en procesos poco prácticos y con altos costo de operación.

Otras investigaciones realizadas por Eksteen & Oraby (2015) con compuestos orgánicos, demuestran que para el empleo de la técnica de cianuración, la aplicación de glicina aumenta significativamente la selectividad de la lixiviación y por



consiguiente un aumento de la eficiencia en la recuperación de oro. A pesar que la velocidad de disolución del oro se incrementa al aumentar la concentración de glicina hasta 1 g/L, cualquier exceso adicional tiene un efecto negativo en la disolución del oro.

En el laboratorio se han comprobado alrededor de 25 procesos de lixiviación alternativos al uso del mercurio (Aylmore, 2005), dentro de las que se encuentran ligandos orgánicos, amoníaco, compuestos halogenados, ácido clorhídrico, entre otros; sin embargo, el éxito de aplicación de estas técnicas depende del control estricto de las variables, que mayormente se pueden obtener en laboratorio, convirtiéndolas en técnicas costosas y poco prácticas.

3.2 TÉCNICAS FÍSICAS

3.2.1 Concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica aborda distintas técnicas y tecnologías cuyo principal objeto es la separación de oro o de otros minerales, de elementos de poco o de ningún interés. Para ello, se pueden emplear diferentes metodologías que basan sus principios de operación en las fuerzas de gravedad y su interacción con fuerzas hidráulicas, de fricción, diferencias de densidades y/o peso específico (Rivera, 2017).

Aunque la concentración gravimétrica se ha abordado en capítulos anteriores como una etapa auxiliar de las diferentes técnicas para la extracción de oro, es importante resaltar la eficacia y eficiencia de los equipos que operan bajo estos principios. Así, se pueden catalogar como técnicas de extracción de bajo costo y de fácil implementación en la minería a pequeña escala o artesanal.

De acuerdo con Hinojosa (2016), el elevado peso específico del oro ($19,3 \text{ g/cm}^3$), en comparación con los demás minerales, permite que este metal pueda ser

separado de los demás elementos aunque se encuentre en tamaños de partículas muy pequeños, resaltando que el éxito de la implementación de estas técnicas, dependen de la granulometría y la forma de las partículas de oro que se obtienen en la etapa de molienda. En la Tabla 3, se relacionan los equipos específicos para diferentes tamaños de partículas que se pueden emplear de acuerdo a la caracterización y composición mineralógica del depósito aurífero, la cual determina el grado de trituración óptimo para una adecuada separación (Concha, 2007).

Tabla 3. Rango de operación de equipos concentración gravimétrica.

EQUIPO	TAMAÑO DE PARTICULA
JIG	0,08 mm – 100 mm
Mesa Vibratoria	0,02 mm – 2 mm
JIG Neumático	0,1 mm – 25 mm
Mesa de Aire	0,25 mm – 6 mm
Centrifugas	0,01 mm – 12 mm
Espiral	0,05 m – 2 mm

Fuente: Concha (2007). *Estudio de la concentración gravimétrica de minerales auríferos en un jig de laboratorio*

Autores como Hinojosa (2016), clasifican los equipos para la concentración gravimétrica como estacionarios: canaletas con rifles, conos y espirales; y equipos móviles como: *jigs*, mesas concentradoras y centrifuga; sin embargo (Bustamante, Gaviria & Restrepo, 2008) agrupan los métodos de separación gravimétrica en 3 categorías de acuerdo al principio de funcionamiento: Separación por corrientes verticales, separación por medios densos y separación en corrientes superficiales o películas.

3.2.1.1 Separación por corrientes verticales

Equipos mediante los cuales se aprovechan las diferencias entre las velocidades de sedimentación de las partículas con diferentes pesos específicos. Entre mayor sea esta diferencia entre los minerales, más efectiva es la separación. Tradicionalmente en la minería artesanal, se ha usado la canaleta como principal herramienta para la concentración gravimétrica. La pulpa (mezcla de material molido y agua) circula por canales de madera con el fondo recubierto de materiales filtrantes que retienen las partículas más pesadas, entre ellas el oro, mientras que el agua por efectos de arrastre transporta fuera del sistema el material sobrante o que no es de interés (Eppers, 2017). El medio filtrante se retira del sistema y el material recolectado, es recuperado mediante el lavado en depósitos de agua que contienen pequeñas cantidades de detergente, los cuales permiten la sedimentación del oro.

Se han diseñado variaciones de canaletas con el fondo desgastado o con bloques de madera, de tal manera que se generen resaltos o “riffles” cuya función es aumentar la eficiencia del proceso de recolección de metales preciosos (Rivera, 2017).

Los resultados del proyecto GAMA de cooperación entre Perú y Suiza, citado por Eppers (2017), concluyeron que la longitud de la canaleta no afecta el desempeño en la recuperación de oro; no obstante, lo recomendable es entre 1,5 y 2 metros de longitud con un ángulo de inclinación entre 5 a 15 grados; más allá de esta distancia el flujo y el movimiento hacen que el sistema no sea efectivo (UNEP, 2012). De igual manera, se recomienda que la relación mineral-agua debe ser de 1:4 para material aluvial que contiene oro grueso o mediano y hasta 1:10 para minerales con oro fino (Eppers, 2017).

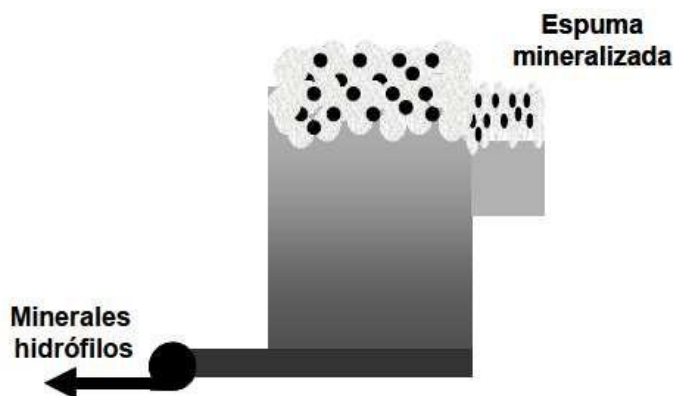
Los rendimientos de extracción de oro con canaletas con las condiciones técnicas ideales de fondo, medio filtrante, longitud, inclinación y suministro de agua, son del orden del 60% (Rivera, 2017).

3.2.1.2 Separación por medios densos o flotación

Técnica mediante la cual el material aurífero se sumerge en un medio de densidad conocida, de tal manera que las partículas de densidades específicas floten sobre una capa de espuma previamente generada y las demás permanezcan suspendidas o se decantan (Rivera, 2017).

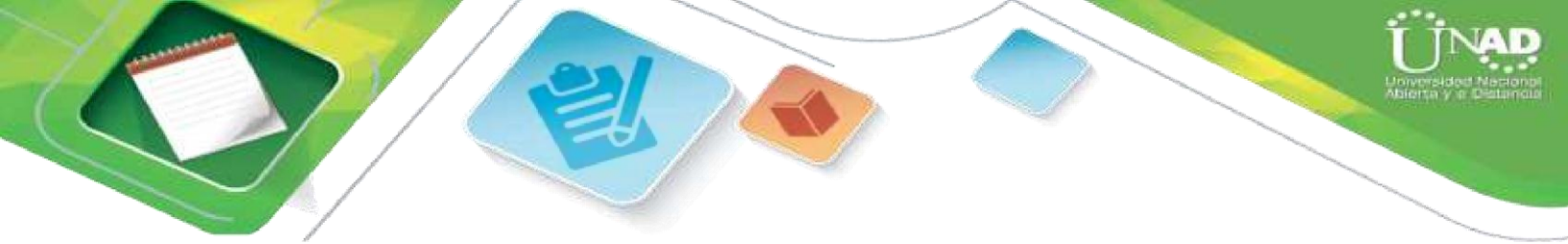
La flotación es un fenómeno fisicoquímico que involucra las fases líquido-gas, sólido-gas y/o líquido-sólido, en el que partículas de minerales hidrofílicos se humectan en el medio acuoso y se establecen enlaces con los iones de agua que ocasionan su sedimentación (Bustamante et al., 2008). Caso contrario ocurre con las partículas hidrofóbicas, que no interactúan con los iones de agua y los minerales adheridos a las burbujas de aire son llevados a la superficie en forma de espuma mineralizada (Imagen 4).

Imagen 4. Principio de operación celda de flotación



Fuente: Bustamante, Gaviria & Restrepo. (2008). *Notas de clase de la asignatura: concentración de minerales.*

Debido a que muchos minerales no flotan de manera natural, se deben aplicar reactivos químicos surfactantes, cuya función es inducir una hidrofobicidad selectiva de la superficie de las partículas, para crear condiciones favorables de adherencia mineral-burbuja; es decir, Los surfactantes disminuyen la humectación de las partículas del mineral y aumentan su capacidad de adherencia a las burbujas permitiéndoles flotar (911metallurgist, 2016; Rivera, 2017).



Trabajos realizados por Allan & Woodcock (2001), citados por Naranjo (2012), han intentado determinar la hidrofobicidad y la flotabilidad natural del oro; sin embargo, es un área de estudio que no se ha abordado a profundidad y aun se continúan con el desarrollo de nuevas estrategias de implementación. A pesar de que el principio para la implementación de la flotación es relativamente sencillo de entender, se deben tener en cuenta las siguientes variables de operación (Naranjo, 2012):

- Granulometría: Los minerales útiles deben tener un grado de liberación adecuado para su concentración.
- Tipo de Reactivos: Selección adecuada de surfactantes (colectores, espumantes y modificadores) de acuerdo a la caracterización aurífera.
- Densidad de Pulpa: Porcentaje de sólidos de acuerdo a la capacidad técnica del equipo.
- Aireación: Inyección de aire adecuada para la generación de espuma para la concentración.
- Regulación del pH: Reactivos de flotación asociados con pH de operación óptimo.

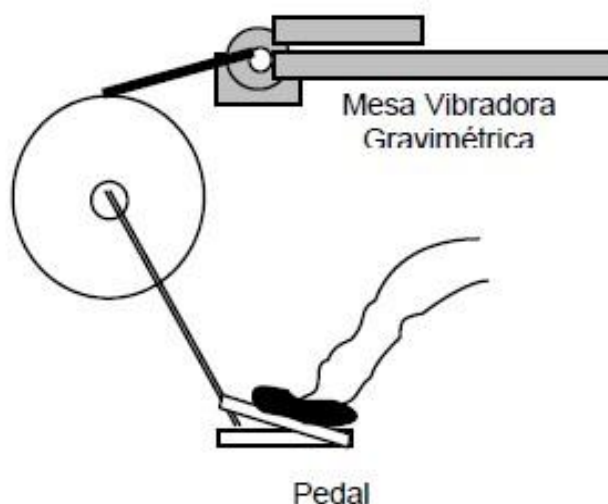
La flotación es uno de los principales procesos utilizados por las minas a gran escala para concentrar sulfuros y oro, pero también se puede hacer fácilmente a pequeña escala (UNEP, 2012), lo que resalta la importancia de desarrollar este tipo de tecnologías a nivel mundial. En Colombia, investigaciones adelantadas por el instituto CIMEX de la facultad de minas de la universidad nacional de Colombia y la universidad tecnológica del Choco (Gualdron, 2015), relacionan porcentajes de hasta el 100% de recuperación de oro, empleando alcoholes y sin el uso de procedimientos adicionales.

3.2.1.3 Separación en corrientes superficiales o flujo laminar

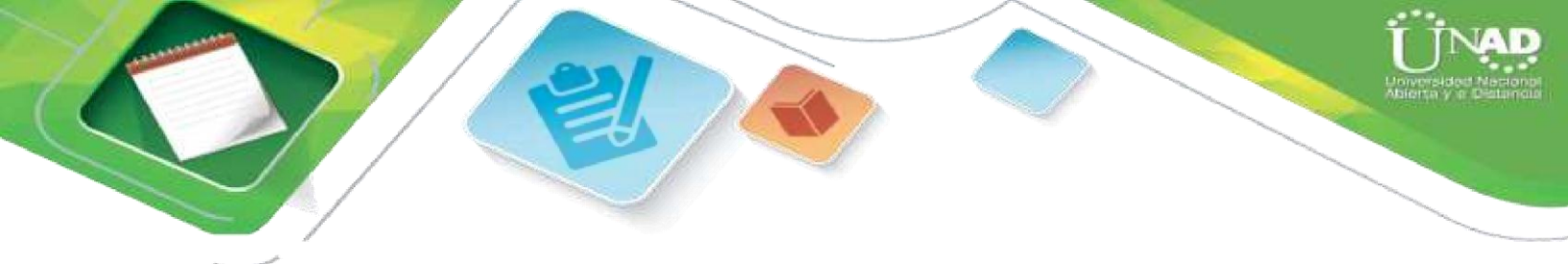
En esta categoría se encuentran equipos como las mesas concentradoras, concentradores en espiral y centrífugas; siendo el primer equipo el más representativo y de mayor uso por su versatilidad y eficiencia de operación. Este principio de concentración se basa en un el flujo laminar de agua en películas muy delgadas, con superficies ligeramente inclinadas sobre las cuales se aplican fuerzas externas que permiten la separación de materiales por diferencia de densidades (Bustamante et al., 2008). Esta operación unitaria es empleada de igual manera en las tradicionales bateas cónicas de minería, donde las partículas livianas por acción del agua, se mueven hacia el borde del sistema y las partículas pesadas se concentran en el centro (Corantioquia, 2016).

La energía eléctrica con la cual es alimentada la mesa vibratoria, es transformada por un sistema de engranajes o de poleas en un movimiento longitudinal y de vibración; sin embargo, de acuerdo con (Llamosas, et al., 2012), existen variaciones que se encuentran en perfeccionamiento, las cuales operan sin fuente de energía externa (Imagen 5) a través de la adecuación de una rueda excéntrica, que permite convertir el movimiento giratorio continuo en un movimiento lineal.

Imagen 5. Esquema de mesa vibratoria accionada por pedal.



Fuente: Llamosas, Villachica, & Villachica. (2012). *Oro ecológico: Tecnología para la obtención de oro sin mercurio en la minería de pequeña escala.*



Los movimientos longitudinales y la inclinación de la superficie de la mesa, permite que el constante suministro de agua se distribuya por toda la extensión de la mesa, proporcionando una película sobre la cual las partículas de oro se desplazan, y mediante un arreglo de estrías perpendiculares al flujo, las partículas de mayor tamaño son atrapadas (Rivera, 2017), mientras que las de menor tamaño sobrepasan estos obstáculos y son llevadas fuera del sistema como concentrado. De este modo, estas técnicas resultan de mayor utilidad con partículas auríferas muy finas, debido a que en ellas, las fuerzas hidráulicas y de fricción tienen una mayor influencia que las fuerzas de gravedad, disminuyendo considerablemente la eficiencia de la concentración con otros métodos (Hinojosa, 2016).

3.3 TÉCNICAS BIOLÓGICAS

3.3.1 *Ochroma pyramidale*

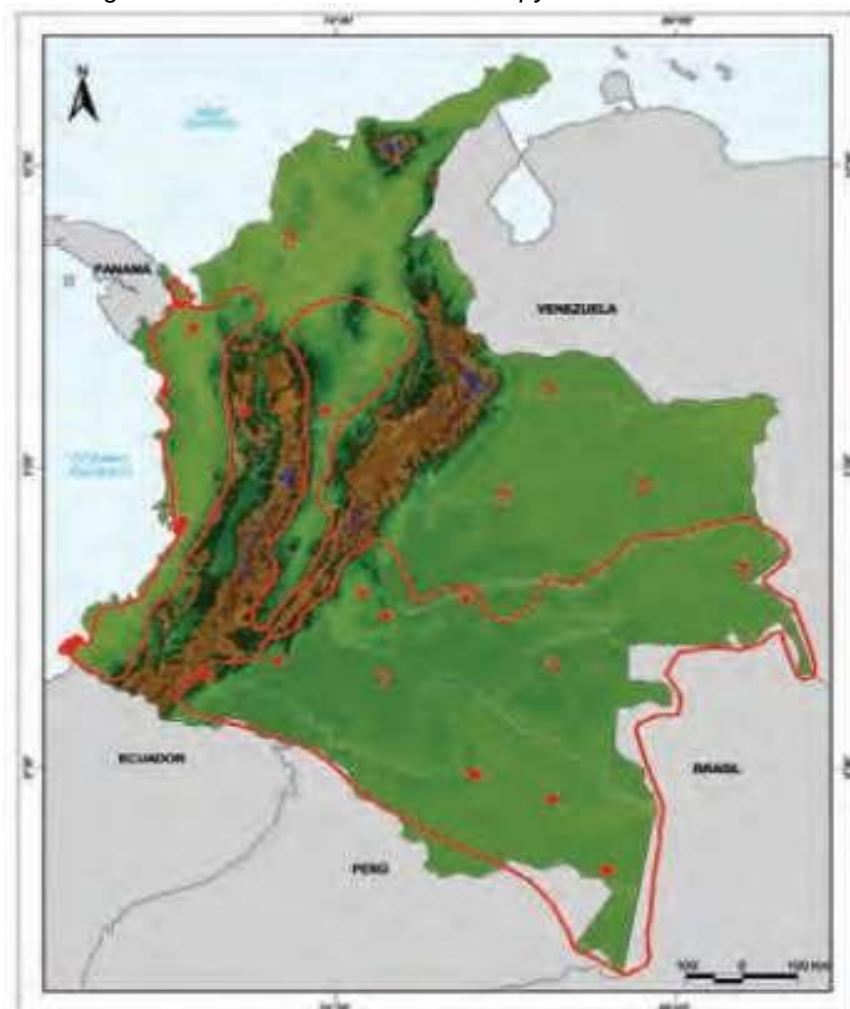
El árbol de balsa, Guano o Ceiba de lana (*Ochroma pyramidale*) es una angiosperma de la familia Malvaceae, originario de América, hallándose en estado natural en América central y norte de Suramérica, desde México hasta las selvas Bolivianas y Peruanas (Friedrich, 1920). De acuerdo el instituto de investigaciones amazónicas SINCHI (Camacho & Montero, 2015), en Colombia se encuentra ampliamente distribuido a lo largo del litoral pacífico, la cuenca del río Magdalena y la región Amazónica (Imagen 6); áreas características de bosques pluviales y vegetación tropical y subtropical.

Desde el punto de vista ecológico, debido a su rápido crecimiento y elevada producción de materia orgánica representada en hojarasca depositada en el suelo, este árbol es utilizado en procesos de restauración ecológica y recuperación de suelos afacetados por la deforestación y el uso intensivo de agroquímicos (Friedrich, 1920). De igual manera, es de gran interés para la industria maderera ya

que tiene propiedades particulares de densidad, ligereza y flotabilidad que le permiten ser empleada en diferentes industrias (Bravo, 2013).

De acuerdo con Brooks y colaboradores (2015), comunidades afro-descendientes ubicadas en el departamento del Chocó (Colombia) han heredado una técnica africana tradicional que permite el uso de extractos de plantas para la amalgamación del oro sin el uso de mercurio o químicos adicionales.

Imagen 6. Hábitat natural de *Ochroma pyramidale* en Colombia.



Fuente: Camacho & Montero. (2015). *Manual de identificación de especies forestales en bosques naturales con manejo certificable por comunidades*

Una o dos hojas del árbol de balsa son fraccionadas en partes más pequeñas para luego ser mezcladas en un recipiente con una pequeña cantidad de agua. Amasando suavemente los trozos de la hoja, se extrae un jugo viscoso de consistencia babosa (Imagen 7) que es vertido en la batea con el concentrado de oro hasta terminar de separar el material inerte (Morales, 2011). Empleando el mismo principio de la técnica de flotación descrita en la página 29, la mezcla babosa del extracto rompe la tensión superficial del agua y permite la precipitación del oro de grano muy fino, mientras que los minerales más ligeros (Tabla 4) son separados del oro que tiene mayor densidad (Brooks et al., 2015).

Imagen 7. Obtención de extracto de *Ochroma pyramidale*.



A) Hoja de *Ochroma pyramidale*, B) Ripiado de la hoja, C) Extracto para minería
Fuente: Morales (2011). *El oro verde de las selvas de Colombia*. Especial para BBC Colombia.

Debido a que es una técnica transmitida en su mayoría por tradición oral dentro de las comunidades afrocolombianas, no se dispone de información técnica que permita determinar las tasas de recuperación de metales preciosos. Dentro de muchas de las distinciones realizadas, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), con el respaldo de la Unión Internacional para la Naturaleza (UICN) y los gobiernos de naciones como Holanda, Noruega, Alemania e India (El Tiempo, (2010), otorgo el premio SEED, el cual reconoce la importancia del proyecto “oro verde” para la conservación de los recursos naturales a través de la implementación de este tipo de técnicas ancestrales.

Tabla 4. Densidad específica principales minerales auríferos.

MINERAL	DENSIDAD ESPECIFICA (g/cm³)
Cuarzo	2.65
Feldespato	2.62 - 2.76
Magnetita	4.9 - 5.2
Platino	14 - 19
Oro	15.6 - 19.3

Fuente: Brooks, W; Mena, F; Sierra, J. (2015). *Green gold – Dirty gold, Tadó, Dept. Chocó, Colombia.*

Diferentes autores entre los que se encuentran Vidal (2009) y Brooks et al. (2015), referencian el uso de otras plantas que son aptas para la amalgamación del oro dentro de las que se encuentran: Malva (*Hibiscus furcellatus*), Guácimo blanco (*Goethalsia meiantha*) y Yarumo (*Cecropia virgusa*); esta última es empleada igualmente en investigaciones para la bioremediación de suelos contaminados con Hg; sin embargo, resaltan que las propiedades amalgamantes no pueden ser exclusivas de estas especies y se pueden obtener resultados similares con especies aun no exploradas de los géneros *Malachra* y *Matisa*.

3.3.2 Bacterias

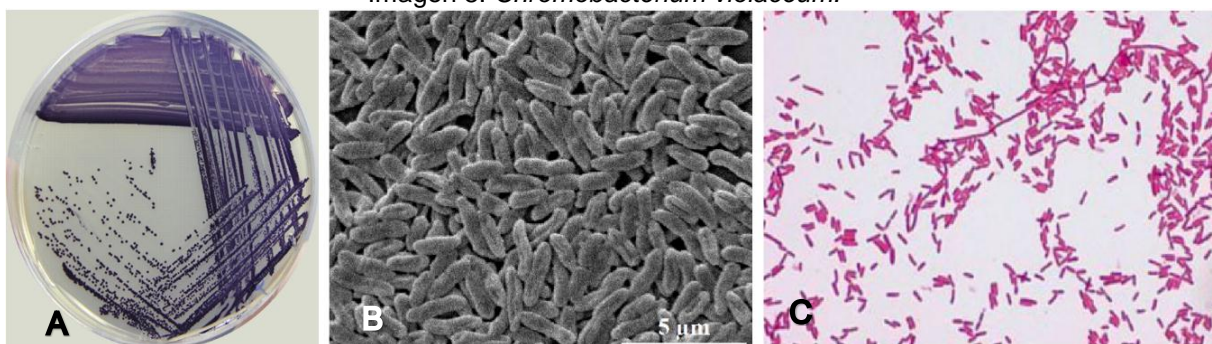
Si bien, el estudio de los microorganismos se inicia en 1674 a partir de las observaciones realizadas por el biólogo Antón Van Leeuwenhoek (Murray, Pfaüer & Rosenthal, 2006), no fue sino hasta el año 1947 que se iniciaron las primeras investigaciones con bacterias acidófilicas aplicadas a la minería, las cuales tienen la capacidad de obtener la energía necesaria para sus procesos metabólicos a partir de la oxidación de hierro y azufre (Cortón & Saavedra, 2014). Industrialmente, se han implementado dos procesos que utilizan microorganismos para la extracción de metales preciosos o facilitan y mejoran su recuperación (Misari, 2016)

3.3.2.1 Biolixiviación

De acuerdo con Ballester (1991) citado por López (2014), la biolixiviación es el proceso mediante el cual se solubiliza el metal por la catálisis que los microorganismos ejercen a través de la transferencia de electrones, convirtiéndolos en compuestos metálicos solubles en agua. En este caso, la formación de cianuro (cianogénesis), se da como metabolito secundario y se presume que es con el fin de inhibir organismos competidores (Brandl, Faramarzi, Krebs, Pensini & Stagars, 2004). La poca energía necesaria para la aceptación de electrones, se ve reflejada en la baja presión y temperatura a la que ocurren las reacciones.

El uso de organismos cianogénicos se ha empleado con éxito en industrias mineras para la lixiviación de oro, reduciendo los riesgos ambientales asociados a los métodos tradicionales de lixiviación de oro, ya que el cianuro producido por las bacterias es de naturaleza volátil y puede reducirse fácilmente en presencia de sales y otros compuestos presentes en el medio de crecimiento (Ilyas & Lee, 2018). Los aislamientos microbianos más comúnmente estudiados son *Chromobacterium violaceum* (Imagen 8) y *Pseudomonas fluorescens* (Imagen 9); sin embargo, se han identificado diferentes microorganismos que poseen esta capacidad.

Imagen 8. *Chromobacterium violaceum*.



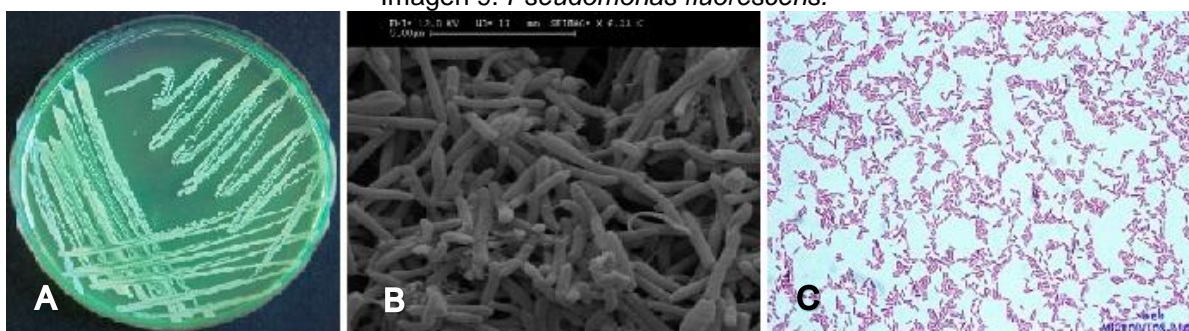
A) Cultivo en Agar Nutritivo, B) Microscopía de Barrido Electrónico (MBE), C) Tinción de Gram

Fuente: A) <https://plus.google.com/+DangTranHoang/posts/3Yrkk5JKwGj>, B)

<http://www.mdpi.com/1420-3049/23/9/2125>, C) <https://alchetron.com/Chromobacterium-violaceum#->

Chromobacterium violaceum es un cocobacilo Gram negativo anaerobio, presente en suelos y aguas. Puede crecer a temperaturas entre los 10°C y 40°C, con un pH neutro de entre 7-8 y produciendo la mayor cantidad de cianuro en el inicio de la fase estacionaria. Por otro lado, *Pseudomonas fluorescens* son bacterias aeróbicas con forma de barra que producen pigmentos fluorescentes difusibles en el período de crecimiento que se da entre los 25°C y 30°C con pH óptimo para la cianogénesis de 8,3 (Ilyas & Lee, 2018).

Imagen 9. *Pseudomonas fluorescens*.



A) Cultivo en Agar Nutritivo, B) Microscopia de Barrido Electrónico (MBE), C) Tinción de Gram
Fuente: A) <http://www.cresa.cat/blogs/sesc/wp-content/uploads/2012/05/92.09-Pfluorescens>, B) <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/sm/c4sm00946k/unauth#divAbstract>, C) http://microbitosblog.com/wp-content/uploads/2015/04/pseudomonas_aeruginosa_tincion-gram-negative1

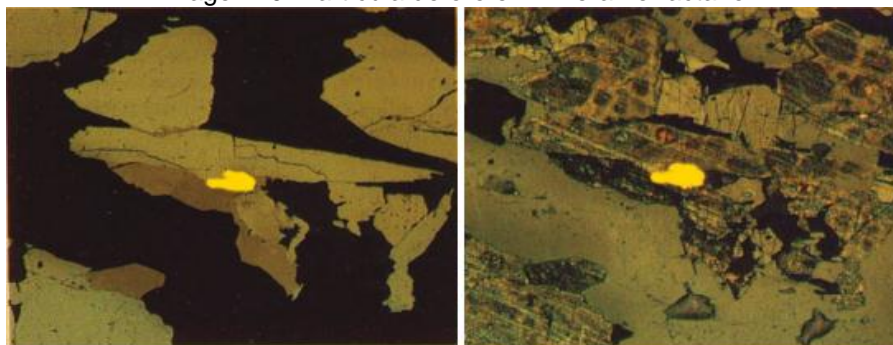
La biolixiviación de oro usando *Chromobacterium violaceum* y *Pseudomonas fluorescens* ha sido empleada por Pham & Ting (2009) en estudios para la recuperación de oro en residuos electrónicos con eficiencias de hasta el 80% en condiciones de laboratorio y concluyen que la eficiencia depende de variables tales como el tipo de mineral, el contenido de oro en los cuerpos minerales y el tamaño de partícula.

3.3.2.2 Biooxidación

En la biooxidación, los minerales de sulfuro que conforman el material aurífero, son oxidados por microorganismos empleando el hierro y azufre elemental para formar sulfatos metálicos solubles y producir ácido sulfúrico (Ilyas & Lee, 2018). De acuerdo con Misari (2016), ésta es una técnica empleada como pre-tratamiento

para minerales refractarios, los cuales presentan el metal encapsulado y no puede ser recuperado directamente en forma económica a través de tratamientos convencionales (Imagen 10). Para el caso del oro, cuando este se encuentra asociado a minerales sulfurados como la pirita o arsenopirita, esta es solubilizada por microorganismos con el fin de dejar libre el oro. Posteriormente es recuperado a través de la implementación de alguna técnica de concentración (Cortón & Saavedra, 2014). La facilidad con la cual se puede extraer el oro se encuentra relacionada con el tamaño de grano y a su distribución dentro del mineral refractario (Misari, 2016).

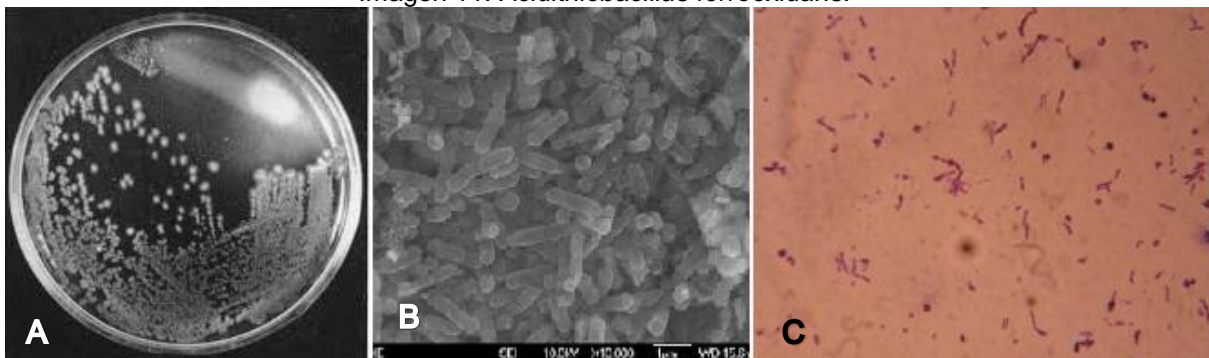
Imagen 10. Partícula de oro en mineral refractario.



A) Partícula encapsulada en la matriz de pirita, B) Matriz después de la lixiviación
Fuente: Misari (2016). *Tecnología de la lixiviación bacteriana de minerales- Biolixiviación*

La biooxidación se ha aplicado comercialmente con éxito como técnica complementaria para reducir elevados consumos de lixiviantes en diferentes minas alrededor del mundo: Harbour Lights Mine (Australia), Fairview Mine (Sudáfrica), Sao Bento (Brasil), The Newmont Gold Company (EE. UU.) (Ilyas & Lee, 2018). Dentro de los organismos más estudiados se encuentran *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Ferroplasma acidiphilum* (Cortón & Saavedra, 2014); sin embargo, el aislamiento microbiano más comúnmente empleado en biooxidación es *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Imagen 11), la cual es una bacteria Gram negativa de forma basilar, con flagelo polar que le permite movilidad, aislada en 1950 por la empresa Gencor en una mina de uranio (Misari, 2016).

Imagen 11. *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

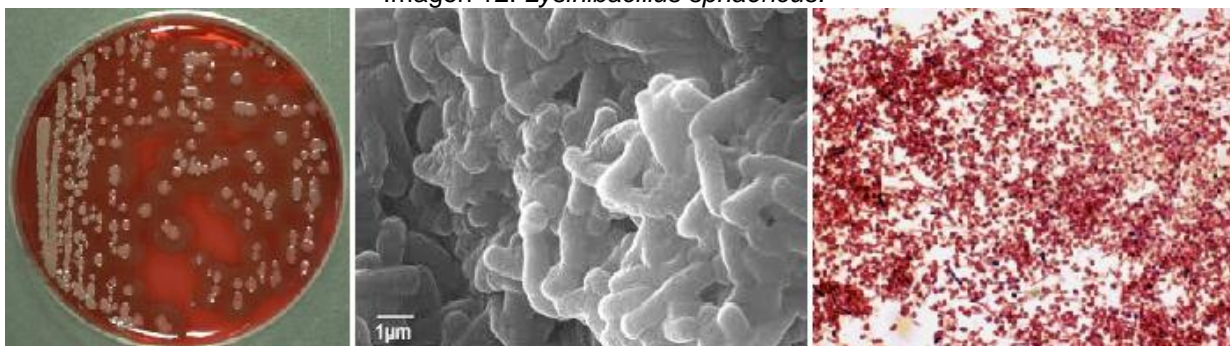


A) Cultivo en Agar Nutritivo, B) Microscopia de Barrido Electrónico (MBE), C) Tinción de Gram
Fuente: A) <https://jb.asm.org/content/jb/83/4/761.full.pdf>, B)

https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron-microscopy-image-of-Acidithiobacillus-thiooxidans-strain-CLST_fig2_321909906, C) https://www.researchgate.net/figure/Gram-staining-of-A-vegetative-cells-and-B-spores-of-Lysinibacillus-sphaericus-OT4b31_fig2_257306747

Lysinibacillus sphaericus (Imagen 12) es un bacilo Gram positivo esporular que fue reconocido como *Bacillus sphaericus* hasta cuando en el 2007, se propuso su cambio de genero por presentar lisina en la pared celular (Bojacá, et al., 2013).

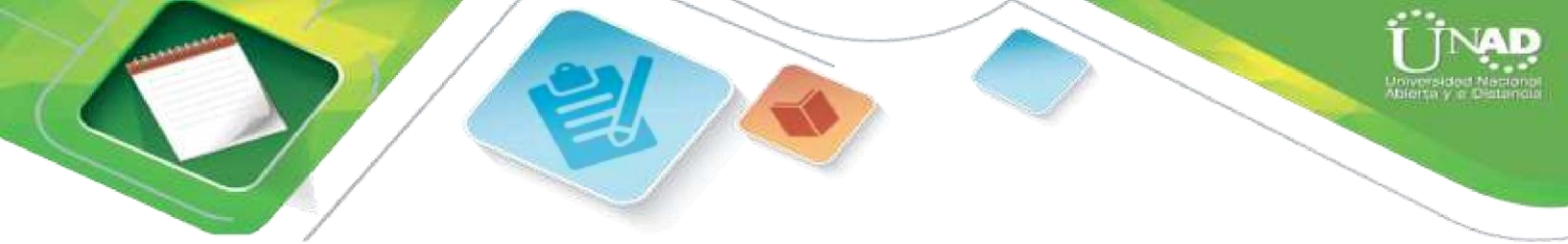
Imagen 12. *Lysinibacillus sphaericus*.



A) Cultivo en Agar Nutritivo, B) Microscopia de Barrido Electrónico (MBE), C) Tinción de Gram
Fuente: A) http://atlas.sund.ku.dk/microatlas/food/bacteria/Bacillus_sphaericus/ B)

https://en.wikipedia.org/wiki/Lysinibacillus_sphaericus C) https://www.researchgate.net/figure/Gram-staining-of-A-vegetative-cells-and-B-spores-of-Lysinibacillus-sphaericus-OT4b31_fig2_257306747

Una reciente investigación adelantada por Bustos, Dussán e Ibarra (2018), comprobó la capacidad de absorción de oro de dos cepas de *Lysinibacillus sphaericus*, aisladas en una mina de oro aluvial del municipio del Bagre (Antioquia). En los ensayos realizados, evidenciaron porcentajes de recuperación de oro de



entre 25% y 85% las primeras 2 horas y del 75% al 95% después de 48 h (Bustos, et al., 2018).

Las dos cepas investigadas, también tienen la capacidad de producir posibles nanopartículas de oro en intervalos de tiempo cortos (Bustos, et al., 2018). Se requiere profundizar en las investigaciones ya que la selectividad de las cepas para la recuperación de oro, puede verse afectada por metales traza, minerales y factores ambientales del mineral aurífero; sin embargo, al ser una cepa nativa, tienen amplio potencial de aplicación en campo.

4 ANÁLISIS SOCIO CULTURAL

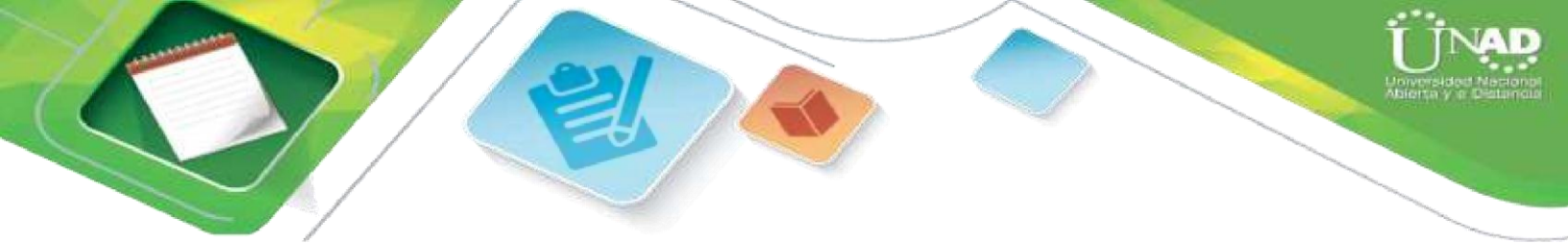
Presencia del estado y control territorial

La presión social y económica que ejercen los grupos al margen de la ley es consecuencia de la poca o nula presencia institucional, los cuales, de acuerdo con la Defensoría del Pueblo (2015), extorsionan a los pequeños mineros, con pagos que oscilan entre un millón y siete millones de pesos mensuales por cada retroexcavadora que se encuentre trabajando en las áreas mineras. El deficiente control territorial del estado colombiano, igualmente queda en manifiesto en un informe de la Contraloría General de la Republica en el cual se concluye que entre los años 2010 y 2016, el 80 % de los proyectos mineros eran ilegales y los procesos sancionatorios ambientales relacionados con la extracción ilícita de minerales fueron 2.630, de los cuales tan solo 398 tuvieron fallo (Victoria, 2017).

Comunidad y hábitos regionales

La llegada de la minería a distintas regiones del país que no han sido de tradición minera, ha llevado al cambio de vocación de los pobladores, los cuales antes buscaban el sustento en las actividades de pesca, ganadería o agricultura. De acuerdo con la Defensoría del Pueblo (2015). Estos cambios de hábitos y costumbres en las actividades de desarrollo social, logran perturbar las economías locales, llevando a una inestabilidad generalizada y atraso en las regiones, representado en poca inversión social, falta de apropiación de territorios y poca presencia estatal.

Diferentes iniciativas de responsabilidad social como Corporación oro verde o ONG`s como Mineros (El Tiempo, 2010), han llegado a las distintas regiones mineras con programas para la ejecución de minería ambientalmente responsable, reemplazando los métodos tradicionales de extracción de oro con mercurio, por técnicas que emplean otro principio de operación, como por ejemplo plantas nativas (Morales, 2011). Sin embargo, la desescolarización que se presenta en la mayoría



de las comunidades de la MAPE, han limitado el alcance de estas iniciativas debido a que el uso del mercurio aún se encuentra arraigado en el saber de las actividades de mineras.

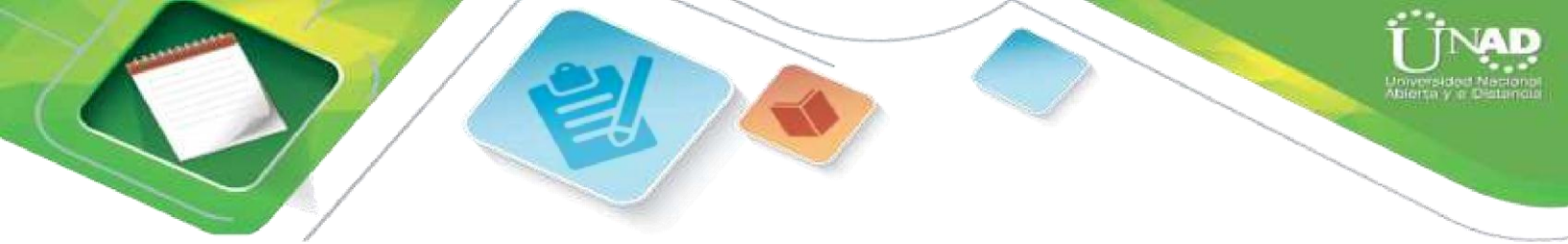
5 CONCLUSIONES

Alrededor del mundo se han implementado diferentes técnicas que permiten el aprovechamiento del oro minimizando los impactos asociados al uso del mercurio, especialmente en la Minería Artesanal y a Pequeña Escala (MAPE). Empresas mineras invierten en investigaciones con el fin de obtener eficiencia en la operación y reducir los impactos asociados a las actividades de extracción de oro. A menores impactos ocasionados con el desarrollo de la actividad minera, menores costos se tendrán por los permisos de operación.

De igual manera, ha habido innumerables esfuerzos en laboratorios para lixiviar oro de manera segura y amigable con el medio ambiente; sin embargo, se requieren amplios conocimientos en el manejo de reactivos y equipos de laboratorio, el control de las variables fisicoquímicas se dificulta en campo y los tiempos de recuperación no siempre se encuentran dentro de los estándares de la minería artesanal y a pequeña escala, haciendo inviable y poco práctica la implementación de estas metodologías.

Cada una de las técnicas investigadas operan bajo unos parámetros técnicos específicos, por lo tanto, es necesario realizar una caracterización inicial del material aurífero con el fin de implementar la técnica apropiada para así estimar las tasas de recuperación de oro; sin embargo, es posible también la implementación de sistemas de aprovechamiento de oro en múltiples etapas, en los cuales se realiza reprocesamiento del material aluvial con empleando diferentes principios de operación y equipos; aumentando la eficiencia de la operación.

Bajo este panorama, la implementación de técnicas biológicas se abre un espacio importante en la industria MAPE para el aprovechamiento de oro sin mercurio. Al ser técnicas de bajo costo, que no requieren de conocimientos adicionales y no se



necesita de infraestructura especializada, el minero común puede encontrar una alternativa viable sin degradar su entorno o padecer de afectaciones a la salud propias de la minería tradicional con mercurio.

El árbol de balsa (*Ochroma pyramidale*) es sin duda una de las alternativas de MAPE más interesantes y con mayor proyección en campo, debido a que se aprovecha una especie de árbol endémica que está presente en casi todas las áreas de influencia de los distritos mineros identificados en Colombia. Esta técnica, al ser transmitida como saberes ancestrales y estar arraigada en la identidad sociocultural de algunas comunidades de mineras, ejercería un impacto social menor y tendría buena aceptación en el gremio minero; sin embargo, existe poca información documentada acerca del uso de *Ochroma pyramidale* en la minería artesanal, por lo que se requiere avanzar en investigaciones acerca de la química del proceso, las eficiencias en la recuperación de oro y los impactos al medio ambiente asociados a su uso en la pequeña minería.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 911metallurgist, (2016). *Colectores y química de la flotación*. Recuperado de <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/colectores-y-quimica-de-laflotacion/>
- Appel, P; Na-Oy, L. (2012). *The borax method of gold extraction for small-scale miners*. Blacksmith Institute Journal of Health & Pollution, 2(3). Recuperado de <http://www.journalhealthpollution.org/doi/pdf/10.5696/2156-9614-2.3.5>
- Aylmore, M. (2005). *Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores*. Developments in Mineral Processing, Vol. 15. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/251460902_Alternative_lixivants_to_cyanide_for_leaching_gold_ores
- Bojacá, V; Dussán, J; Lozano, L; Montenegro, T. (2013). *Mosquitos, minería y petróleo - Lysinibacillus sphaericus: la versatilidad de un microorganismo en beneficio del ambiente y la salud pública*. Recuperado de <http://hipotesis.uniandes.edu.co/hipotesis/images/stories/edesp2013pdf/Mosquitos%20mineria%20y%20petroleo.pdf>
- Brandl, H; Faramarzi, M; Krebs, W; Pensini, E; Stagars, M. (2004). *Metal solubilization from metal-containing solid materials by cyanogenic Chromobacterium violaceum*. Journal of Biotechnology 113. 321–326. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165604003220>
- Bravo, N. (2013). *Análisis de supervivencia, desarrollo y fotosíntesis de tres especies forestales en plantaciones jóvenes establecidas en el bosque seco tropical*. (Trabajo de grado Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/11848/1/29180796.2014.pdf>
- Brooks, W; Mena, F; Sierra, J. (2015). *Green gold – Dirty gold, Tadó, Dept. Chocó, Colombia*. Natural Resources. 6, 534-542. Recuperado de

- <https://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=61147>
- Bustamante, M; Gaviria, A; Restrepo, O. (2008). *Notas de clase de la asignatura: concentración de minerales*. Instituto de minerales CIMEX – Universidad nacional de Colombia. Recuperado de <https://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/notas-de-clasede-la-asignatura-concentracion-de-minerales>
- Bustos, M; Dussán, J; Ibarra, H. (2018). *The Golden Activity of Lysinibacillus sphaericus: new Insights on gold accumulation and possible nanoparticles biosynthesis*. *Materials* 11(9), 1587. Recuperado de <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/9/1587>
- Camacho, R; Montero, M. (2015). *Manual de identificación de especies forestales en bosques naturales con manejo certificable por comunidades*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. Bogotá, Colombia. Recuperado de https://www.sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/Manual_identificacion.pdf
- Carrillo, M. (2013). *Estudio comparativo de la lixiviación de dos minerales auroargentíferos con cianuro y tiourea*. (Trabajo de grado universidad industrial de Santander). Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2013/148325.pdf>
- Carrillo, M; Córdoba, E; Delgado, J. (2013). *Lixiviación con tiourea de dos minerales auroargentíferos santandereanos*. *Revista colombiana de materiales* 5, 319-324. Recuperado de <http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/view/19478/16525>
- Concha, H. (2007). *Estudio de la concentración gravimétrica de minerales auríferos en un jig de laboratorio*. (Trabajo de grado Universidad del valle). Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893875/1/CB0343306.pdf>

- Corantioquia (2016). *Manual de gestión del recurso hídrico: minería de oro. Producción y consumo sostenible*. Recuperado de http://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gesti%C3%B3n%20ambiental/Producci%C3%B3n%20y%20Consumo%20Sostenible/Manuales_GIRH/Mineria_Oro.pdf
- Cortón, E; Saavedra, A. (2014). *Bioteología microbiana aplicada a la minería*. Revista Química Viva 3, 13. Recuperado de <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v13n3/saavedra.pdf>
- Daphnia. (1998). *Disolventes orgánicos*. Revista Daphnia, Vol 12. 425. Recuperado de <http://www.daphnia.es/revista/12/articulo/425/Disolventesorganicos>
- Defensoría del pueblo (2015). *La minería sin control – un enfoque desde la vulneración de los derechos humanos*. Delegada para los derechos colectivos y del medio ambiente. Recuperado de <http://www.defensoria.gov.co/public/pdf/InformedeMinerla2016.pdf>
- Díaz, F. (2014). *Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano*. Revista de salud pública. Vol, 16. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://scielosp.org/pdf/rsap/2014.v16n6/947-957>
- Eksteen, J; Oraby, E. (2015). *Gold leaching in cyanide-starved copper solutions in the presence of glycine*. Hydrometallurgy 156. 81–88. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X15300220>
- El Tiempo, (2010). *Chocoanos que se ganan la vida con el 'oro verde' ganaron premio Seed de la ONU*. Versión digital, diario El Tiempo. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-7295214>
- Eppers, O. (2017). *El uso de bórax para una producción de oro sin mercurio en la minería a pequeña escala*. Arequipa, Perú. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/318418780_El_uso_de_borax_para_una_produccion_de_oro_sin_mercurio_en_la_mineria_a_pequena_escala

- Español, S. (2012). *Contaminación con mercurio por la actividad minera*. Biomédica- revista del instituto nacional de salud. Vol, 32. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://www.revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/1437>
- Fernández, C. (2017). *El mercurio: una intoxicación silenciosa*. El Tiempo, versión digital. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/vida/salud/analisis-sobre-losefectos-del-mercurio-en-el-cuerpo-76270>
- Friedrich, P. (1920). *Repertorium specierum novarum regni vegetabilis. Ochroma Pyramidale*. Beihefte 5, 123. Berlín Alemania. Recuperado de <https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/6505#/summary>
- Gnen, N; Korpe, E; Selegil, U; Yildirim, M. (2007). *Leaching and CIL processes in gold recovery from refractory ore with thiourea solutions*. Minerals engineering 20, 559-565. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687506003062>
- Gualdrón, Y. (11 de mayo 2015). Extraer oro sin mercurio o sin cianuro dejó de ser una fantasía en el país. *El Tiempo*. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15730275>
- Guerrero, R. (2015). *Estudio físico – químico comparativo de lixiviación con cianuro y tiourea en concentrados de oro, procedente de la planta de beneficio “franromec” del cantón camilo Ponce Enríquez, provincia del Azuay*. . (Trabajo de grado universidad técnica de Machala). Recuperado de <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/4272/1/CD000031RESUMEN-pdf>
- Hilson, G; Monhemius, A. (2006). Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? *Journal of Cleaner Production* 14, 1158-1167. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652605000636>

- Hinojosa, O. (2016). *Concentración gravimétrica de menas auríferas*. Revista metalúrgica UTO 38, 38-50. Recuperado de http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rmuto/n38/n38_a06.pdf
- Hurlbut, C; Klain, C. (1997). *Manual de mineralogía*. Vol. 2. (Traducido al español de manual of mineralogy). Barcelona: Editorial Reverte. Recuperado de https://books.google.com.co/books?id=ol2xn_6jgn0C&printsec=frontcover&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Ilyas, S; Lee, J. (2018). *Gold metallurgy and environment*. Boca Ratón, Estados Unidos: Taylor and & Francis group
- Lenntech. (2016). *Mercurio-Hg. Propiedades químicas del mercurio*. Recuperado de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm>
- Lenntech. (2016). *Oro-Au. Propiedades químicas del oro*. Recuperado de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/au.htm>
- León, R. (2017). *Eficiencia del método ecológico sin mercurio respecto al tradicional con mercurio en la extracción de oro en minería artesanal en Ollachea – Puno*. (Trabajo de grado, universidad nacional del altiplano). Recuperado de http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6409/Le%C3%B3n_Banegas_Ruth%20Gabriela.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Llamosas, J. Villachica, L. Villachica, C. (2012). *Oro ecológico – Tecnología para la obtención de oro sin mercurio en la minería de pequeña escala*. Recuperado de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/CC5180149410151E05257BF9007746A7/\\$FILE/oroecologico.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/CC5180149410151E05257BF9007746A7/$FILE/oroecologico.pdf)
- López, J. (2014). *Aplicabilidad de la biolixiviación como un método sustitutivo de la amalgamación con mercurio para la recuperación del oro en la minería artesanal en el sur de Perú*. (Trabajo de grado, universidad politécnica de Cataluña). Recuperado de

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24014/JOSE%20VICTOR%20LOPEZ%20GUERRERO%20PFG_Memoria_2013-14.pdf

MADS. (2014). *Plan Único Nacional de Mercurio*. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. <http://www.minambiente.gov.co/index.php/sala-deprensa/2-noticias/1613-el-uso-sostenible-de-los-bosques-prioridad-deminambiente-763>

Martínez, X. (2004). *Mercurio como contaminante global*. Departamento de química, Universidad autónoma de Barcelona. Barcelona, España. Recuperado de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3174/xgm1de1.pdf>

Minambiente. (2013). *Ley 1658 de 2013. Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso del mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=600:plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-51>

Ministerio de trabajo y asuntos sociales. (1996). *Fichas internacionales de seguridad química: tiourea*. España. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FI/SQ/Ficheros/601a700/nspn0680.pdf>

Minminas. (2016). *Pan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio. La ruta hacia un beneficio sostenible del oro*. Ministerio de minas y energía. República de Colombia. Recuperado de <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/0/PES+Eliminaci%C3%B3n+Mercurio+%281%29.pdf/e2774fb2-e2a3-4229-8103-2183e5a71e18>

Misari, F. (2016). *Tecnología de la lixiviación bacteriana de minerales- Biolixiviación*. Lima, Perú: organismo supervisor de la inversión en energía y minería – Osinergmin. Recuperado de

https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Biolixiviacion.pdf

Morales, L. (2011). *El oro verde de las selvas de Colombia*. Especial para BBC Colombia. Revista Semana. Recuperado de <https://www.semana.com/nacion/articulo/un-oro-verde-selvas-colombia/244669-3>

Murray, P; Pfaüer, M; Rosenthal, K. (2006). *Microbiología médica*. 5a ed. Madrid: Elsevier

Naranjo, D. (2012). *Flotación de oro nativo grueso, como sustituto de la amalgamación tradicional*. (Trabajo de grado Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/7226/1/43469333.2012.pdf>

OMS. (2017). *El mercurio y la salud*. Organización mundial de la salud. Centro de prensa. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/>

Perea, C. (2016). *Evaluación de una metodología alternativa a la cianuración para la disolución de oro empelando solventes orgánicos*. (Tesis de maestría, universidad nacional de Colombia). Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/55035/1/1065623713.2016.pdf>

Pham, V; Ting, Y. (2009). *Gold bioleaching of electronic waste by cyanogenic bacteria and its enhancement with bio-oxidation*. Advanced Materials Research Vols. 71-73. 661-664. Recuperado de <https://www.scientific.net/AMR.71-73.661>

PNUMA, 2013. *Convenio de Minamata sobre el mercurio*. Organización de las Naciones Unidas ONU. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Recuperado de http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/Minamata%20Convention%20on%20Mercury_booklet_Spanish.pdf

- PNUMA; MADS (2012). *Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala*. Acuerdo 4030-09-04-2203. Programa de las naciones unidas para el medio ambiente & Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf
- Programa nacional de riesgos químicos (2008). *Mercurio: cartilla de información*. Departamento de salud ambiental. Ministerio de salud de la nación. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <http://www.fmed.uba.ar/depto/toxico1/mercurio.pdf>
- Quiminet. (2008). *Tipos de solventes y sus aplicaciones*. Recuperado de <https://www.quiminet.com/articulos/tipos-de-solventes-y-sus-aplicaciones28015.htm>
- Ramírez, A. (2008). *Intoxicación ocupacional por mercurio*. Anales de la facultad de medicina. V 69 – 1. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-55832008000100010
- Rivera, S. (2017). *Optimización de concentración gravimétrica de oro en la mesa vibratoria de la mina "Vicentina"*. (Trabajo de grado Universidad del Azuay). Recuperado de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/7028/1/12976.pdf>
- UNEP. (2012). *Reducing mercury use in artisanal and small-scale gold mining: a practical guide*. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de <http://web.unep.org/globalmercurypartnership/reducing-mercury-useartisanal-and-small-scale-gold-mining-practical-guide%C2%A0>
- UPME. (2014). *Estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro*. Unidad de Planeación Minero Energético - Ministerio de minas y energía. Recuperado de http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Cadena_Mercurio_Tomo_II.pdf

ANEXOS

Anexo A: HDS / MSDS Mercurio

MERCURIO		ICSC: 0056 Marzo 2001	
CAS: RTECS: NL: CE Índice Anexo I: CE / EINECS:	7439-97-8 OVA550000 2809 080-001-00-0 231-106-7	Hg Masa atómica: Masa atómica: (200,6)	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible. En caso de incendio se despiden humos (o gases) tóxicos e irritantes.		En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.
EXPLOSIÓN	Riesgo de incendio y explosión.		En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN		(HIGIENE ESTRICTA) (EVITAR LA EXPOSICIÓN DE MUJERES (EMBARAZADAS) (EVITAR LA EXPOSICIÓN DE ADOLESCENTES Y NIÑOS)	(CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS)
Inhalación	Dolor abdominal. Tos. Diarrea. Jaqueo. Vómitos. Fiebre o temperatura corporal elevada.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, fresco. Re respiración artificial si estuviere indicada. Proporcionar asistencia médica.
Piel	(PUEDE ABSORBERSE) Enrojecimiento.	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón. Proporcionar asistencia médica.
Ojos		Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. Lavar las manos antes de comer.	Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Evacuar la zona de peligro en caso de un derrame abundante. Consultar a un experto. Ventilar. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos no metálicos. NO verterlo al alcantarillado. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. Traje de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración.		Material especial. No transportar con alimentos y piensos. Clasificación UE Símbolo: T, N Fr: 25-33-50/53 S: (12)-(7)-45-60-61 Clasificación NU Clasificación de Peligros: NL II Grupo de Envasado: NU III	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (0)-800CSH-11		Medidas para contener el efluente de extinción de incendios. Separado de alimentos y piensos. Bien cerrado.	
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: left;"> <p>IPCS International Programme on Chemical Safety</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005</p> </div> </div>			

VEÁSE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

MERCURIO		ICSC: 0056
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Metal pesado líquido y móvil, plateado, inodoro.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS Por calentamiento intenso se producen fuertes explosiones. Reacciones violentamente con amoníaco y halógenos originando peligro de incendio y explosión. Ataca aluminio y muchos otros metales, formando amalgamas.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: 0.025 mg/m³ (como TWA) (pie), A4, BEI establecido (ACGIH 2004). MAK: 0.1 mg/m³. Sh (sensibilización cutánea), Categoría de limitación de piel: III, Carcinógeno: categoría 3B (CfR 2003).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor y a través de la piel, (también como vapor)</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita la piel. La inhalación del vapor puede originar neumonitis. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central y al riñón. Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA La sustancia puede afectar al sistema nervioso central y al riñón, dando lugar a irritabilidad, inestabilidad emocional, temblores, alteraciones mentales, de la memoria y del habla. Puede producir inflamación y decoloración de las encías. Peligro de efectos acumulativos. La experimentación animal muestra que esta sustancia posiblemente cause efectos tóxicos en la reproducción humana.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: 357°C Punto de fusión: -39°C Densidad relativa (agua = 1): 13,5 Solubilidad en agua: ninguna Presión de vapor, Pa a 20°C: 0,28 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 6,93</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1,009</p>	
DATOS AMBIENTALES		
<p>La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos. Puede producirse una bioacumulación de esta sustancia en peces.</p>		
NOTAS		
<p>Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. A concentraciones tóxicas no hay alerta por el olor. NO llevar a casa la ropa de trabajo.</p>		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2013): VLA-ED: 0,02 mg/m³</p> <p>Notas: sustancia tóxica para la reproducción humana de categoría 1B. Esta sustancia tiene prohibida su comercialización y uso fitosanitario y/o brodicida. Esta sustancia tiene establecidas restricciones a la fabricación, comercialización o al uso especificadas en el Reglamento REACH.</p> <p>Agente químico que tiene establecido un valor límite indicativo por la UE; debe complementarse con una vigilancia sanitaria con control biológico de acuerdo con el artículo 8 del RD 374/2001. VLB: 30 µg/g creatinina en orina; 10 µg/L en sangre. Notas F,M.</p>		
NOTA LEGAL	<p>Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del ICPS y es independiente de cualquier legislación. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el ICPS, sus representantes o el INSHT, auto de la versión española.</p>	
© ICPS, CE 2005		

Anexo B: HDS / MSDS Borax

TETRABORATO DE DISODIO, DECAHIDRATADO		ICSC: 0567 Septiembre 1997	
Tetraborato de sodio, decahidratado Fimborato de sodio, decahidratado Borax			
CAS:	1303-96-4	B ₄ O ₇ ·Na ₂ ·10H ₂ O	
RTECS:	VZ2275000	Masa molecular: 381.4	
CE / EINECS:	215-540-4		
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible.		En caso de incendio en el entorno: usar un medio de extinción adecuado.
EXPLOSIÓN			
EXPOSICIÓN		¡EVITAR LA DISPERSIÓN DEL POLVO! ¡EVITAR LA EXPOSICIÓN DE MUJERES (EMBARAZADAS)! ¡	
Inhalación	Tos. Jaqueo. Dolor de garganta. Hemorragia nasal.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Posición de semincorporado. Respiración artificial si estuviera indicada.
Piel	Piel seca. Enrojecimiento. Dolor.	Guantes de protección.	Aclarar con agua abundante, después quitar la ropa contaminada y aclarar de nuevo.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Gafas ajustadas de seguridad protección ocular combinada con protección respiratoria si se trata de polvo.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si pueda hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor abdominal. Diarrea. Dolor de cabeza. Náuseas. Vómitos. Debilidad. Convulsiones.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Bañar la sustancia derramada e introducirlo en un recipiente; si fuera necesario, humedecer el polvo para evitar su dispersión. Recoger cuidadosamente el residuo, trasladarlo a continuación a un lugar seguro. Protección personal adicional: aspirador de filtro P2 para partículas nocivas.			
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
		Separado de ácidos.	
<p>IPCS International Programme on Chemical Safety</p> <p>Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 1998</p>			

VEASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

TETRABORATO DE DISODIO, DECAHIDRATADO

ICSC: 0567

DATOS IMPORTANTES

ESTADO FÍSICO; ASPECTO:

Cristales blancos o polvo cristalino.

PELIGROS QUÍMICOS:

La sustancia es una base débil.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN:

TLV: Boratos, compuestos inorgánicos 2 mg/m³ como TWA; 6 mg/m³ como STEL; A4 (no clasificable como cancerígeno humano); (ACGIH 2005).

MAK no establecido.

VÍAS DE EXPOSICIÓN:

La sustancia se puede absorber por inhalación y por ingestión.

RIESGO DE INHALACIÓN:

La evaporación a 20 °C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva de partículas en el aire cuando se dispersa.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN:

La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central, riñón e hígado, en caso de ingestión. Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA:

El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. La experimentación animal muestra que esta sustancia posiblemente cause efectos tóxicos en la reproducción humana.

PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición: 320 °C

Punto de fusión: 75 °C

Densidad relativa (agua = 1): 1.7

Solubilidad en agua, g/100 ml a 20 °C: 5.1

DATOS AMBIENTALES

La sustancia es nociva para los organismos acuáticos.

NOTAS

Jalkin, Pyrobor, Three Elephant, V-Bor son nombres comerciales. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en noviembre de 2008; ver Límites de exposición.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2011):

VLA-ED: (como Boratos, compuestos inorgánicos) 2 mg/m³

VLA-EC: 6 mg/m³

Notas: sustancia tóxica para la reproducción humana de categoría 1B.

Nota legal

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

© IPCS, CE 1998

Anexo C: HDS / MSDS Tiourea

					
<p>TIOUREA Tiocarbamida 2-Tiourea $CH_4N_2S/(NH_2)_2CS$ Masa molecular: 76.12</p>					
<p>Nº CAS 62-56-6 Nº RTECS YU2800000 Nº ICSC 0680 Nº NU 2611 Nº CE 612-082-00-0</p>					
					
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS		
INCENDIO	No combustible.	Evitar llama abierta.	En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.		
EXPLOSION			Los bomberos deberían emplear indumentaria de protección completa, incluyendo equipo autónomo de respiración.		
EXPOSICION					
• INHALACION			Aire limpio, reposo.		
• PIEL	¡PUEDE ABSORBERSE!	Traje de protección.			
• OJOS	Enrojecimiento.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.		
• INGESTION					
DERRAMAS Y FUGAS		ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO		
NO verter en el alcantarillado. Barrer la sustancia derramada e introducir en un recipiente hermético.		Separado de alimentos y piensos, oxidantes, bases fuertes. Mantener en lugar frío; mantener en una habitación bien ventilada.	NO transportar con alimentos y piensos. símbolo Xn símbolo N R: 22-40-51/53-63 S: (2-)36/37-61 Clasificación de Peligros NU: 6.1 Grupo de Envasado NU: III CE:		
			 		
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE					
ICSC: 0680		Preparado en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994			

D A T O S I M P O R T A N T E S	<p>ESTADO FISICO; ASPECTO Cristales incoloros, prácticamente inspidos.</p> <p>PELIGROS FISICOS</p> <p>PELIGROS QUIMICOS La sustancia se descompone en caso de incendio produciendo humos tóxicos de óxidos de azufre y de nitrógeno. Reacciona con oxidantes.</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION TLV no establecido.</p>	<p>VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber a través de la piel y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACION</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia irrita las mucosas, los ojos y el tracto respiratorio.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido puede producir sensibilización de la piel. La sustancia puede tener efectos sobre la médula ósea, dando lugar a anemia o bocio. Esta sustancia es posiblemente carcinógena para los seres humanos.</p>
	<p>PROPIEDADES FISICAS</p> <p>Se descompone por debajo del punto de ebullición a (véanse Notas) Punto de fusión: 176-178°C Densidad relativa (agua = 1): 1.4</p>	<p>Solubilidad en agua: escasa Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.5</p>
<p>DATOS AMBIENTALES</p>	<p>La descomposición térmica da lugar a contaminantes ambientales: óxidos de azufre y de nitrógeno.</p>	
NOTAS		
<p>Temperatura de descomposición no se encuentra referenciada en la bibliografía. Nombres Comerciales: Cercla, Sulourea, Thiourea (Dot), THU, Tszp 34.</p>		
INFORMACION ADICIONAL		
<p>FIGQ: 2-180 TIOUREA</p>		
<p>ICSC: 0680</p>		<p>TIOUREA</p>
<p>© CCE, IPCS, 1994</p>		
<p>NOTA LEGAL IMPORTANTE:</p>	<p>Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).</p>	