



**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL**  
*Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!*



# ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN LA EXPLOTACIÓN ILEGAL DE MINERALES AURÍFEROS EN COLOMBIA

AUTOR

SALAMANCA NAVAS, ANDRES FELIPE

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DIPLOMADO EN GESTIÓN AMBIENTAL

PAMPLONA-NORTE DE SANTANDER

MAYO 2021



**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL**  
*Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!*



# ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN LA EXPLOTACIÓN ILEGAL DE MINERALES AURÍFEROS EN COLOMBIA

AUTOR

SALAMANCA NAVAS, ANDRES FELIPE

Trabajo de grado-modalidad monografía-presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO AMBIENTAL

ASESOR DE MONOGRAFÍA

RIVERA ALARCON, HECTOR URIEL

MSc.Ing. Ambiental

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DIPLOMADO EN GESTIÓN AMBIENTAL

PAMPLONA-NORTE DE SANTANDER

MAYO 2021



## TABLA DE CONTENIDOS

Introducción.....	4
Planteamiento Del Problema .....	6
Objetivos .....	8
Objetivo General.....	8
Objetivos Específicos.....	8
Justificación.....	9
Antecedentes .....	11
Capítulo I.....	17
1.1 Áreas Protegidas, Zonas Restringidas y Áreas Libres Para La Actividad Minera En Colombia .....	17
1.2 Tipos De Minería Aurífera .....	20
1.1.1 Minería Aurífera Bajo La Modalidad De Aluvión (EVOA).....	21
1.1.2 Minería Aurífera Bajo La Modalidad De Filón o Veta.....	23
1.3 Métodos Utilizados Para la Explotación Aurífera en Colombia .....	26
1.3.1 Exploración.....	26
1.3.2 Explotación.....	27
1.3.3 Transporte y Comercialización de Oro.....	41
1.3.4 Cierre de la mina .....	41
Capítulo II.....	43
2.1 Impactos al Recurso Hídrico y Ecosistemas Acuáticos .....	43
2.1.1 Efectos del Mercurio y el Cianuro en el Recurso Hídrico.....	46
2.2 Impactos al Recurso Suelo, el Paisaje y los Ecosistemas Terrestres.....	49
2.2.1 Incidencia del Mercurio en el Suelo, su Fauna y Flora.....	52
2.3 Impactos a la Atmósfera .....	55
2.4 Impactos Sociales y a la Salud de los Mineros. ....	56
3.2 Riesgos a la Salud Humana por la Exposición a Mercurio o Cianuro. ....	60
Capítulo III.....	64
3.1.1 Producción más Limpia en Procesos de Minería Aurífera.....	65
3.1.2 Técnicas Biológicas Para el Beneficio de Oro. ....	81
Conclusiones.....	84
Referencias Bibliográficas .....	87



## Introducción

El oro es uno de los minerales de mayor valor económico para la nación debido ya que éste se encuentra en la mayor parte del territorio colombiano, en 2020 su producción aumentó un 29,9 % en relación a 2019, alcanzando la mayor producción en 4 años según la Revista Portafolio, (2021), consiguiéndose una reserva de 47,6 toneladas del mineral, generando un aumento importante en los impuestos y las regalías para el país, sin embargo, se estima que más del 60% de la minería de oro en Colombia es ilegal (Suárez, 2020) y aunque la minería informal siempre ha existido, este alarmante aumento se asocia al incremento en su precio en los mercados internacionales convirtiendo la explotación aurífera en una de las más rentables sumado al ahorro en los costos de licencias, permisos y programas ambientales que no se están cumpliendo.

Las consecuencias que dicha actividad ilegal ha traído consigo catastróficos problemas para los ecosistemas y la salud humana, dejando desérticas e inhabitables grandes extensiones de territorio, contaminando de forma casi irremediable el recurso hídrico y su biota por la acumulación de mercurio o arsénico e impactando de forma directa no solo la salud de la población cercana a las minas sino también afectando su seguridad y vulnerando sus derechos humanos, en muchos casos la población es asesinada o desplazada por los grupos que explotan las canteras, constituyendo así, un gran conflicto social y ambiental para las autoridades y el país. En este sentido, la presente monografía se compone de tres capítulos en donde se abordará en su primer capítulo los inadecuados procedimientos existentes que se realizan para la extracción de oro, la falta de planeación e irresponsabilidad ambiental, dando paso al segundo capítulo, en donde, se pretende exponer los impactos a la salud humana, a la cultura y a la vulnerabilidad de derechos humanos, así como, los impactos a los ecosistemas que esta actividad genera, además de



abordar más a fondo el impacto que ocasiona el uso del mercurio como elemento principal para la separación del oro de otros elementos. Por último, en el tercer capítulo se busca indagar sobre nuevos métodos y tecnologías más eficientes y menos contaminantes para el aprovechamiento de este mineral.



## Planteamiento Del Problema

Actualmente en Colombia se han ido incrementando exponencialmente las actividades en explotación de minerales y en su mayoría ilegal, es decir, que ejercen sin título minero, pues ahora parece ser que se ha convertido en un boom ilícito en casi todo el país, según las cifras expuestas por el Ministerio de Minas y Energía (2017), de los 32 departamentos que componen a Colombia, estas actividades ilícitas están presentes en al menos 25 departamentos. Un patrón más claro sería, que a partir del año 2018 se han elevado dichas acciones, pues se reportaron 92.046 hectáreas cubiertas por explotación ilícita de oro en aluvión, de las cuales 52% se encuentra en zonas exceptuadas de la minería, tales como parques naturales, humedales Ramsar, reservas forestales entre otras áreas de protección ambiental especial.

Este auge minero ocasiona cientos de millones en pérdidas por regalías que deja de percibir el estado colombiano, asimismo a nivel ambiental los impactos producidos pueden llegar a ser irreversibles debido a la alteración de los suelos, las fuentes hídricas y la destrucción de los diferentes ecosistema a causa del uso desmedido de sustancias o compuestos como el ácido sulfúrico, cianuro, mercurio y demás elementos químicos que suelen ser usados en estas prácticas ilegales, de igual forma se practica la desertización o tala indiscriminada y no autorizada de bosques y reservas naturales, que coinciden en su mayoría con los territorios en explotaciones ilícitas de minerales. Cabe resaltar que se pueden identificar otros tipos de actividades que afectan el medio ambiente como la utilización de maquinaria pesada para excavar, extraer y transportar materiales, cambiando así todo el entorno paisajístico, debido a las alteraciones en los ecosistemas, que estimula el detrimento valioso del agua y suelo, que aumenta la formación de fenómenos erosivos.

Otra problemática presente y que acrecienta enormemente los impactos negativos sobre el



medio ambiente y en a la comunidad en general del país, es el conflicto armado que es concurrido en casi todo el territorio colombiano por parte de los grupos armados como, por ejemplo, el ELN, disidencias de las Farc, las Bacrim y demás grupos subversivos al margen de la ley, que se han embarcado en el negocio de extracción de oro artesanal puesto que hoy por hoy es hasta 20 veces más rentable que la cocaína. Sumado a esto, la necesidad y la falta de conciencia y educación ambiental de miles de colombianos, los convierte en un blanco fácil para que los grupos al margen de la ley les ofrezcan un pago extra por el oro que se extraiga, por lo cual se motiva a realizar una extracción sin ningún tipo de control o manejo ambiental, destruyendo así, el mismo entorno en donde conviven con numerosas familias. Otro aspecto importante es que estos colectivos operan de primera mano en dichas áreas de explotación aurífera; ocasionando un grave daño social y ambiental, además de producir millonarias fuentes de ingresos que permanecen en la ilegalidad y que son usados para crear conflictos y terror en la población, lo cual, ha desatado un acometimiento contra la minería criminal que involucra la seguridad nacional del país.

Se estima que solo el 13% del oro extraído en el país cada año proviene de minas reconocidas como legales, y el resto que equivale a unos 7 mil millones de pesos, que quedan en los bolsillos del sector informal y las organizaciones criminales, y utilizan las "vacunas", para obtener una parte de todo el mineral extraído, y prestan "plantes" a los mineros en forma de usureros para obtener excavadoras, pólvora y otras herramientas para la minería.

A partir de lo anterior nace la siguiente pregunta de investigación para la formulación del problema:

¿Qué planes y acciones ambientales necesita actualmente el gobierno colombiano para lograr un mejor óptimo desarrollo de las actividades mineras ambientalmente sostenibles?



## Objetivos

### Objetivo General

Aportar una base teórica que permita comprender y analizar los impactos ambientales que se generan en los procesos de explotaciones ilícitas de minerales auríferos en Colombia.

### Objetivos Específicos

- Recopilar información sobre los procesos más utilizados para la explotación aurífera en Colombia.
- Explorar la bibliografía existente sobre los efectos de la explotación ilegal aurífera a los ecosistemas y la sociedad.
- Analizar la existencia de nuevas tecnologías para extracción de minerales menos contaminantes y eficientes.



## Justificación

En la actualidad se aprecia la debilidad de las autoridades administrativas y ambientales colombianas en el monitoreo y mantenimiento del control de la minería ilegal, lo que se refleja en la alta tasa de operaciones mineras que no cumplen con los estándares mínimos ambientales o de seguridad, y por ende ambiental, social y se han violado los derechos culturales.

De acuerdo a esta problemática nace la necesidad de investigar e indagar a profundidad los impactos ambientales y sociales que generan los procesos ilegales de extracción de mineral y de que manera se puede llevar a cabo esta actividad de manera responsable con el medio ambiente. Por otra parte, por medio de este estudio se busca crear conciencia sobre el desastre ecológico y cultural por el que atraviesa el país y el planeta a causa de la minería, porque si bien es cierto que la extracción aurífera genera grandes beneficios monetarios, el oro no es un recurso indispensable para vivir y es necesario entender que ni la más grande cantidad de oro servirá para suplir las reservas de agua que se están contaminando, desperdiciando y acabando en todo el mundo a causa de esta actividad.



# ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL

*Avanzamos... ¡Es nuestro objetivo!*



## Antecedentes

Diferentes autores concuerdan en que, a nivel mundial la minería aurífera artesanal o a pequeña escala también conocida como MAPE, es la más desarrollada y, por ende, es el mayor contribuyente a los sectores económicos formales e informales, y la que más problemáticas tanto ambientales como socioeconómicas y culturales trae consigo, sin embargo, cabe resaltar que este tipo de minería no es la única que genera problemas, la megaminería de oro, aunque posee títulos mineros no se descarta como generadora de graves impactos negativos hacia el medio ambiente. A continuación, se muestran algunos casos de estudio que muestran la gravedad de esta actividad a nivel mundial, nacional y local.

Según, la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo industrial (2006), la minería aurífera artesanal y de pequeña escala se ejerce en más de 70 países por aproximadamente entre 10 y 15 millones de mineros, incluidos entre 4 y 5 millones de mujeres y niños y aunque, las actividades de la MAPE se realizan en todo el mundo, son más frecuentes en Sudamérica, África y Asia (Hinton, J.; Veiga, M. M. y Beinhoff, C., 2003).

La mayoría de las definiciones de minería artesanal y de pequeña escala tienen las siguientes características: sector laboral informal, uso limitado de máquinas herramienta, trabajo intensivo en mano de obra, bajo capital y baja productividad, yacimientos mineros y acceso limitado a la tierra y los mercados. Estas características ilustran el posible ciclo de pobreza en las comunidades mineras artesanales y de pequeña escala, especialmente donde las tecnologías de minería y procesamiento ineficientes proporcionan pequeñas cantidades de productos y bajas ganancias. Los riesgos para la salud y el medio ambiente asociados a este tipo de trabajo agravan este ciclo. (Hentschel, Hruschka & Priester 2003).



Un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud (2017), ratifica que los problemas de la MAPE surgen a partir de la ausencia de regulación sobre este sector; como la falta de educación sobre los riesgos para la salud de los mineros; los accesos limitados a equipos de protección y conocimientos técnicos previos y la imposibilidad de obtener capacitaciones pertinentes al trabajo, su bajo nivel de educación o baja tasa de alfabetización ejerce mayores problemas de salud puesto que pueden agravarse por la falta de acceso en los mineros a recursos técnicos y financieros necesarios para adoptar prácticas de minería más sofisticadas (Walle, 2007). Las comunidades de MAPE a menudo tienen poco o ningún acceso a agua potable, saneamiento adecuado o atención médica, esto puede empeorar cuando la minería se encuentra en áreas remotas o la migración a gran escala aumenta el flujo de pacientes ejerciendo presión sobre el sistema de salud local.

Otro problema importante lo muestra el doctor Timarán, (2016) sobre el peso para el desarrollo económico de la minería a pequeña escala en Latinoamérica, particularmente en los países andinos (aproximadamente el 60 % de la producción total del metal ha correspondido a la minería en pequeña escala). Sin embargo, en la mayoría de estos países este tipo de minería se desarrolla como una "minería depredadora" y se le reprocha por explotar la riqueza nacional de una manera desorganizada con grandes costos sociales y ambientales.

Los efectos de la minería ilegal abarcan mucho más de lo que se cree, tal es el caso, de la devastación presentada en 6 de los países amazónicos de América del sur, Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Según, El especial "Según los informes, hay 2.312 sitios de minería ilegal y 245 áreas de minería no autorizadas en las que se extrae oro, diamantes y coltán. La presencia de dragas, botes y otros equipos implementados para la obtención de oro que ha arrastrado con bosques enteros, además del abuso que se le da al mercurio ocasionando daños a la salud de los residentes



locales (principalmente indígenas) afectando ríos y todos los seres vivos que habitan allí. Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) no están exentas de actividades ilegales, porque según el informe, de las 649 ANP identificadas, 55 tienen sitios mineros ilegales activos o estanques dentro de sus límites, y 41 han sido dañados indirectamente, ya sea en zonas de amortiguamiento o fronteras (Praeli, 2019).

Uno de los países que más adelanta estudios sobre los impactos asociados a esta actividad minera es Perú, tal es el caso, documentado por Zapata (2020), sobre los impactos medioambientales ocasionados por la minería ilegal en Madre de Dios, que han afectado áreas naturales protegidas en el Departamento como la Reserva Nacional Tambopata, en donde, se han destruido bosques, alterado los cauces de los ríos, contaminando grandes áreas con mercurio, destruyendo la vegetación ribereña y alterando el paisaje. Así mismo, según indica “Amazonía saqueada” la minería ilegal en Madre de Dios ha contribuido a que la deforestación en ese país alcance niveles jamás registrados. Informes del Proyecto de Monitoreo de la Amazonía Andina (MAAP) utilizados en este estudio dan cuenta de cómo esta actividad ilegal ingresó a la reserva a partir del año 2015. A través de imágenes satelitales se observa cómo en setiembre de ese año el territorio no había sido afectado y solo dos meses después ya mostraba zonas deforestadas dentro de la reserva causadas por minería ilegal. Otro análisis de MAAP presentado en abril del año pasado indica que la deforestación causada por la minería entre enero de 2017 y febrero de 2018 fue de 1320 hectáreas, en las áreas de La Pampa (sector Balata), Alto Malinowski y en la Reserva Nacional Tambopata.

Por su parte, la amazonia colombiana se ve fuertemente intervenida dentro de las cuencas de los ríos Putumayo, Caquetá, Apaporis, Guainía e Inírida, entre otros. Esta actividad afecta áreas de manejo especial (territorios indígenas, parques nacionales, sitios Ramsar, reservas forestales y zonas fronterizas) (Praeli, 2019). Sin embargo, la región amazónica no es la única afectada en



Colombia, recientes estudios como el presentado por Cantero, Rhenals, & Moreno (2015), evidencia las afectaciones al suelo causadas por la minería de aluvión en el departamento de Córdoba, Colombia, señalando un total de 12 áreas intervenidas que mostraban grado extremo de degradación del suelo, con un 75% de remoción de coberturas vegetales, así mismo, la función biótica del suelo se vio seriamente afectada, ya que la minería perturba totalmente la biodiversidad edáfica, finalmente, la actividad minera generó un impacto de ocupación en el que hubo una pérdida total del suelo y de su potencialidad, siendo casi imposible utilizar estas tierras para sembrar algún tipo de cultivo.

Otro tema importante es la utilización de mercurio en la industria minera ilegal, el cual, es un contaminante tóxico, que actualmente afecta no solo la salud de los mineros, sino también existen evidencias de los graves impactos a las comunidades indígenas. Así mismo, los peces muestran altas concentraciones de mercurio en su interior convirtiéndose en un fuerte problema de salud pública. En Colombia la zona más afectada por este mineral es la cuenca del río Caquetá. Según un estudio del Instituto Nacional de Salud de Colombia en el río Apaporis reveló que hasta el 80% de las poblaciones indígenas en esta región están contaminadas por mercurio (Praeli, 2019).

Según el caso presentado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en el informe final de la consultoría “Propuesta de prevención y manejo de la contaminación por mercurio en la región de La Mojana, en Sucre se encontraron cantidades muy superiores a los estándares mínimos para la acumulación de mercurio en cuerpos de aguas y especialmente en las plantas acuáticas, y en el caso de los peces la acumulación se encuentra bastante cercana al valor máximo permitido. La presencia de mercurio en esta zona altera la función ambiental de estos humedales de regular los cauces de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge, amortiguar las inundaciones y facilitar la decantación y acumulación de sedimentos, así



como también afecta la dinámica de sus aguas y la biodiversidad de las especies de fauna y flora, que ahí encuentran su hábitat (Díaz M. , 2004).

Otros estudios realizados en la cuenca del Río San Jorge analizando la contaminación mercurial en Caimito (Sucre), a causa de la minería en el Sur de Bolívar, se encontraron niveles elevados de mercurio en peces como el bocachico, la pácora, la mojarra amarilla, en moncholo y el doncella, afectando directamente la actividad económica de esta región que subsiste de la pesca (PNUMA & MADS, 2012).

La situación de la contaminación del recurso hídrico y de las especies que habitan en él para territorios colombianos que tienen presencia de metales pesados u otros tipos de contaminantes ha sido documentada desde hace más de veinte años por diversas fuentes (Campos, 1990; Madrid, 2015; Parra y Espinosa, 2008; Mancera-Rodríguez y Álvarez-León, 2006; Botero y Mancera, 1996). Sin embargo, el análisis de lo que sucede en el suelo y las mezclas suelo-agua-contaminante rara vez se menciona en los estudios nacionales, y esto es crucial cuando la sustancia que produce el impacto ambiental es un metal pesado como el mercurio. En la provincia de Antioquia, los recursos naturales que intervienen en los diferentes procesos de extracción minera se han visto afectados significativamente en estos últimos años, siendo el agua como el principal recurso más deteriorado. Esto se debe a la ausencia de control de sustancias tóxicas y en algunos escenarios compuestos altamente venenosos e ilegales como el cianuro y el mercurio. Si bien se han realizado muchos trabajos y esfuerzos para remediar los daños y el impacto ambiental, cabe señalar que no todas las tecnologías denominadas convencionales y no convencionales son aplicables a la realidad del país, ni tampoco a las consecuencias de la minería aurífera mezclada con el mercurio (Valdés, 2020).



Como respuesta ante esta problemática a nivel mundial, diferentes países se enfocan en el estudio y desarrollo de nuevos métodos y tecnologías enfocados en la Producción mas Limpia (PML), en donde, se busca evitar el uso de mercurio y cianuro. En este sentido, investigadores rusos de la universidad Estatal de Krasnoyarsk y del Instituto de Química y Química Aplicada del Siberian Branch, desarrollaron un método para sustituir el cianuro. El método consiste en agregar un reactivo a una solución compleja que contiene metales preciosos que forma un enlace con el oro y la plata. De esta manera, se obtiene un compuesto en el que el átomo central del metal está rodeado por varios iones, generalmente cianuro o tiocianato (usando el nuevo método). Por lo tanto, los aniones resultantes se pueden separar de la solución usando una columna de intercambio iónico. Este último, así como la plata y el oro, deben eliminarse de la columna, y luego los minerales deben ser extraídos de la solución. Aunque el método parece simple, los químicos tienen que trabajar mucho para seleccionar el adsorbente que pueda capturar la mayor cantidad de metales preciosos de la solución y separar de la columna. (Servicio de Información y Noticias Científicas (SINC), 2008).

En el caso particular de Colombia, se adelantan medidas para optimizar los procesos ya existentes como la sustitución de algunas sustancias tóxicas aplicadas por Bórax, Tiourea o solventes orgánicos, así mismo, se busca la aplicación de técnicas físicas mas eficientes como la separación por concentración gravimétrica sin la utilización de mercurio, la separación por corrientes verticales, la separación por medios densos o de flotación y por corrientes superficiales o de flujo laminar, finalmente, se investiga mas a donde la utilidad de emplear técnicas biológicas tanto para remediar suelos contaminados como para sustituir el mercurio en el proceso de amalgamación (Sánchez, 2018).

## Capítulo I

### 1.1 Áreas Protegidas, Zonas Restringidas y Áreas Libres Para La Actividad Minera En Colombia

De acuerdo al código de minas en su artículo 34, los proyectos de exploración y desarrollo de minerales no se realizarán en áreas declaradas y demarcadas de acuerdo con la normativa vigente, como la protección y desarrollo de recursos naturales renovables o el medio ambiente, por lo que se determinan áreas que pueden ser excluidas del ámbito minero y que identifican en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), estas áreas integran el Sistema de Parques Nacionales Naturales (SNPNN), Parques naturales regionales, reservas forestales, ecosistemas de páramo y humedales en el ámbito de la Convención de Ramsar. Las zonas PNN y los parques naturales con características regionales no pueden ser explotados para la minería, sin embargo, en el caso de las reservas forestales se puede realizar un proceso de sustracción para que la autoridad minera apruebe el desarrollo de las actividades de manera limitada. En Colombia, el 12% del territorio tiene jurisdicción en la PNN, pero cuando se integran todas las entidades de gestión especial, esta proporción llega al 50% del total del país. (*Ministerio de minas y energía, 2019*).

Así mismo, el Código de Minas (art. 35) Establecer áreas mineras restringidas, incluidas áreas urbanas o densamente pobladas alrededor de ciudades; áreas de ocupación de construcción rural aprobadas por el propietario; áreas definidas como áreas con especial valor arqueológico, histórico o cultural; playas, áreas de marea baja y ríos servidos por empresas de transporte público; Áreas públicas ocupadas por el proyecto o destinadas a servicios públicos, siempre que sean incompatibles con la actividad; mientras las autoridades comunitarias correspondientes no ejerzan prioridad para obtener derechos mineros para exploración y explotación en un plazo determinado, estas áreas constituyen zonas mineras indígenas o comunidad negra o mixta. En el

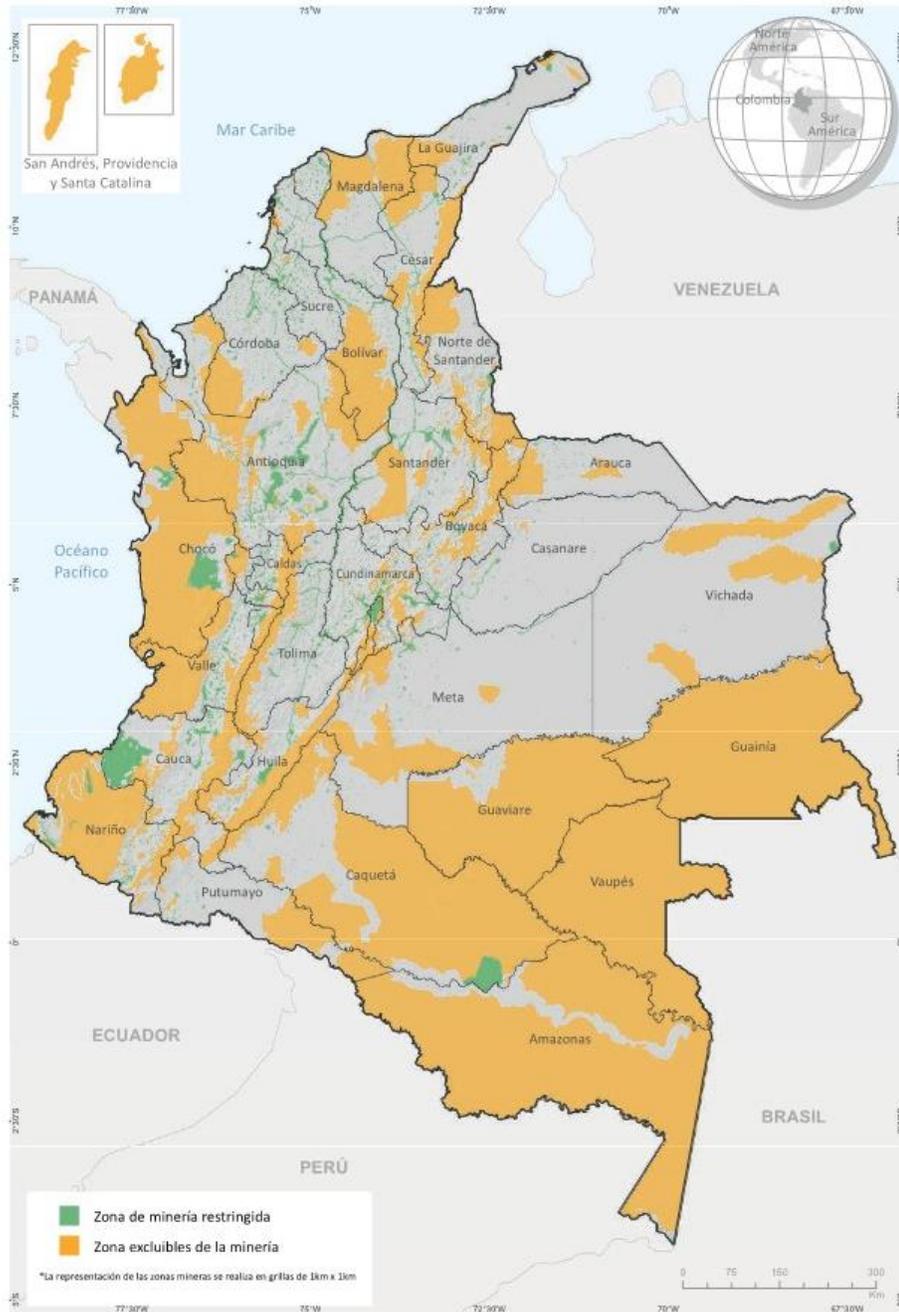


complejo nacional, el 3,4% del territorio presenta ciertas restricciones. La categoría periférica urbana de la ciudad o centro de población representa el 50% del área restringida total. Las áreas de servicio público representaron el 25% y las áreas mineras de los resguardos indígenas y las comunidades negras el 24%; finalmente, las áreas de valor arqueológico y las áreas de baja mar representaron el 1% restante del país. (Ministerio de minas y energía, 2019 ).

Las áreas no incluidas en las dos primeras categorías, las áreas que pueden excluirse de la minería y las áreas de minería restringidas se clasifican como áreas libres. Se puede requerir que estas áreas obtengan todas las licencias de desarrollo (protección de la propiedad y licencias ambientales). Sin embargo, si estas áreas se encuentran en territorio étnico, se debe consultar con la comunidad antes de los permisos ambientales, en este caso la comunidad puede solicitar declaraciones de área minera, las cuales tendrán prioridad sobre cualquier tercero para obtener los permisos. La licencia correspondiente. Si la comunidad no requiere la declaración del área minera, se puede otorgar la licencia a un tercero si se cumplen todos los requisitos, y esto no perjudicará el valor cultural, social y económico de estos grupos. (ANM, 2019). En este sentido, menos de la mitad del territorio nacional (44,4 %), está catalogado bajo este criterio (Ministerio de minas y energía, 2019 ). En la figura 1 se pueden apreciar las zonas libres, excluibles y de restricción mineras en Colombia.

**Figura 1.**

*Zonas de minería restringida y excluibles de la minería en Colombia.*



*Tomado de Explotación de oro de aluvión, evidencias a partir de percepción remota, UNODC, MINENERGÍA.2018.*

## 1.2 Tipos De Minería Aurífera

Debido a la diversidad de ambientes geológicos en donde se pueden encontrar reservas auríferas se ha generado la necesidad de desarrollar diferentes sistemas de extracción del mineral, los cuales varían dependiendo de la profundidad e inclinación de los depósitos auríferos, las características geomecánicas de las rocas aledañas al mineral y de la forma física en cómo se pueda encontrar el oro. Otro factor importante a tener en cuenta son las condiciones sociales, culturales y económicas de la región con potencial aurífero. (Ministerio del medio ambiente, 2002).

Actualmente, se contemplan dos tipos de yacimiento según las características geográficas de formación: primarios, conocidos como de filón o veta, generalmente de origen subterráneo y secundarios o de aluvión (EVOA), que se practican a cielo abierto y puede ser realizada en tierra o en agua.

Según el Ministerio de minas y energía (2016) existen 4 tipos de minería en Colombia; minería de subsistencia; es una actividad que realizan personas naturales o grupos dedicados a la minería a cielo abierto, recolectando arena y guijarros de río, arcillas, metales preciosos, piedras preciosas y piedras semipreciosas para esta industria se utilizan herramientas manuales, sin necesidad de implementar ningún tipo de maquinaria o maquinaria pesada para su puesta en marcha. Así mismo, de acuerdo a las hectáreas de explotación otorgadas por el respectivo título minero, se puede considerar la minería a pequeña escala (Menor o igual a 150Ha), la minería a mediana escala (Mayor a 150Ha pero menor o igual a 5.000Ha) y la gran minería (Mayor a 5.000Ha pero menor o igual a 10.000Ha) (Función pública, 2016), igualmente, el código de minas (2016) establece dicha clasificación según su producción como se muestra a continuación (Ver tabla 1).

**Tabla 1**

*Clasificación de la Minería a pequeña, mediana y gran escala en etapa de explotación.*

Pequeña		Mediana		Grande	
A cielo abierto	Subterránea	A cielo abierto	Subterránea	A cielo abierto	Subterránea
<b>Hasta 15.000</b>	Hasta 250.000	> 15.000 hasta	> 250.000 hasta	> 300.000	> 1.300.000
<b>Ton/año</b>	m3/año	300.000	1.300.000 m3/año	Ton/año	m3/año
		Ton/año			

*Tomado de código de minas, 2016.*

### **1.1.1 Minería Aurífera Bajo La Modalidad De Aluvión (EVOA).**

El aluvión hace referencia al material detrítico ubicado y transportado en cercanías de los afluentes de agua como ríos y quebradas. Ese material puede estar compuesto por arena, grava, arcilla, limo o rocas sedimentarias, como material no consolidado (Cifuentes, 2012).

La minería de oro de aluvión, es una de las actividades más antiguas del mundo dedicadas a la extracción de ese mineral (Brooks, Öztürk, & Cansu, 2017). Su fácil disposición en forma de pequeños granos, polvo o escamas finas en los depósitos aluviales, su bajo nivel de inversión económica y su alto precio en el mercado, hacen a esta actividad algo muy lucrativo para algunas personas o empresas (Balanta & Vidal, 2020). Adicionalmente, este tipo de minería es fácilmente adaptable a todas las escalas de extracción, ya que permite ser ejecutada en pequeña escala por mineros artesanales mediante el uso de tecnología de bajo costo y rudimentarias (Macdonald, 1983), o a escalas mayores por grandes industrias mineras.

El grado de mecanización de los procesos empleados en la extracción de oro aluvial varían considerablemente dependiendo principalmente de la escala y de los recursos económicos invertidos en esta industria (Balanta & Vidal, 2020). En Colombia cerca del 82% de la

explotación del oro es realizada por aluvión (PNUMA & MADS, 2012) y aproximadamente el 87% de las minas de este mineral carecen de títulos mineros, permitiéndoles incurrir a la ilegalidad (MME., 2011).

Este tipo de explotación consiste en la obtención de oro depositado en los cauces de los ríos o en las tierras aledañas a éstas, subdividiendo esta modalidad en explotación de oro de aluvión (EVOA) en tierra y en agua. Los yacimientos de oro aluvial se forman con el paso del tiempo cuando el curso de agua corre o pasa por territorios ricos en oro, gracias a la erosión del agua los restos de roca descienden, sin embargo, el oro al ser más denso queda en el fondo de estos cauces o tierras aledañas a ellos adoptando formas de pepitas, escamas finas o polvo (CDE, 2020).

**Evidencias y hallazgos de EVOA en Colombia.** En el año 2014 se detectaron en Colombia 78.939 hectáreas con evidencia de explotación de EVOA en tierra con uso de grandes maquinarias, distribuidas en 17 departamentos de la nación, en donde, el 79% de la explotación de aluvión en tierra corresponde a los departamentos de Chocó (46%) y Antioquia (33%) con un total de 62.508 hectáreas. Así mismo, se encuentran afectados 147 municipios de Colombia abarcando un 13% del total en el país, en donde, Antioquia se encuentra como el mayor afectado con un total de 46 municipios en donde los principales resultados de la encuesta EVOA se concentraron en 10 ciudades: Nechí, Zaragoza, Cáceres, El Bagre, Tarazá, Caucasia, Segovia, Remedios, Anorí y Amalfí, que aportaron el 92% del EVOA del sector y el 31% de los datos nacionales. De igual forma, los 27 municipios del Chocó (90%) reportaron evidencia de este fenómeno, y solo los municipios de Acandí, Bahía Solano y Juradó no mostraron daños ambientales notorios. EVOA se concentra en 11 ciudades: Nóvita, Istmina, Condoto, Cantón de San Pablo, Quibdó, Unión Panamericana, Medio Atrato, Tadó, Río Quito, Medio San Juan y



Certeguí. Este departamento alberga el 18% del número total de ciudades afectadas del país. ( Ministerio de justicia y del derecho; UNODC, 2016).

El incrementado de la actividad minera ha provocado la intervención en zonas protegidas por la ley, según el informe presentado por el Ministerio de minas y energía, (2019 ) el 52% de EVOA en tierra, se encuentra en zonas excluibles de minería, el 13 % en zonas de minería restringida y el 35 % en áreas libres, permitidas para la explotación bajo el marco normativo, además se evidencia presencia de EVOA en agua en algunos parques nacionales naturales, un dato bastante preocupante para la salud de los ecosistemas colombianos.

En cuanto a Territorios Administrativos Especiales, en 2018 se registraron 724 hectáreas en la EVOA en resguardos indígenas, y un total de 24 resguardos se vieron afectados por este fenómeno: Chocó (293 hectáreas) fue el sector más afectado; seguido de cerca por Guainía (139 hectáreas), Cauca (124 hectáreas) y Antioquia (119 hectáreas). En cuanto a las alarmas de agua generadas por EVOA, 14 resguardos en los ríos Putumayo, Caquetá, Apaporis y Guainía se ven afectados directamente por este fenómeno, y 6 resguardos se ven afectados indirectamente, ubicados en la cuenca media del río Caquetá. Por otro lado, 37.973 hectáreas de EVOA (76 comités comunitarios, que representan el 49% del total nacional) se encontraron en tierras de comunidades negras, principalmente en Choco (que representan el 35% del total nacional). (Ministerio de minas y energía, 2019 ).

### **1.1.2 Minería Aurífera Bajo La Modalidad De Filón o Veta**

Los depósitos primarios, también llamados filamentos, de filón o vetas, son de origen magmatico, es decir, de la capa fundida que asciende desde debajo de la corteza hasta la superficie. Este movimiento reduce la presión y la temperatura en el magma, haciendo que parte de los minerales se separen y cristalicen (se extiendan) en la roca; muchos otros son empujados y

reemplazados en la roca preexistente; la parte del magma inyectada en la roca y grietas asciende bajo presión formando lechos rocos que contienen objetos denominados batolito y stock. Los minerales son separados por la columna ascendente de magma primario, dando como resultado un proceso llamado diferenciación de magma, en el cual algunos minerales permanecen en la etapa inicial de cristalización, mientras que otros minerales se enriquecen en la etapa final de cristalización, produciendo concentrados hidrotermales en solución y metales. ; esas soluciones, al perder temperatura, comienzan a generar el proceso de deposición y cristalización en las fracturas de la roca, formando enjambres de venas y venillas (las de mayor tamaño se conocen como vetas o filones) (PNUMA & MADS, 2012).

La mayoría de los depósitos filonianos carecen de una investigación detallada que los relacione con ciertos modelos de depósitos, aunque están relacionados espacialmente con cuerpos intrusivos; solo en algunos de ellos es posible definir características de sobrecalentamiento de manera muy general. Puede ser alta vulcanización y baja vulcanización, y temperatura media (orogénica) (Ministerio de Minas y Energía; Servicio Geológico Colombiano, 2019). Según Castro y Lozano (1995), los yacimientos hidrotermales en Colombia son en su mayoría de tipo cuarzo-adularia, y unos pocos son de tipo sulfato ácido.

Por otro lado, las vetas pueden estar compuestas por minerales de cuarzo, carbonatos, mica, etc. En la mayoría de los casos, los minerales metálicos no superan el 5% de la masa filoniana total. El oro es uno de una gran cantidad de metales que se encuentran en las costuras. Existe en su estado natural en forma de laminas, escamas y agujas. El tamaño suele estar entre 10 y 300 micrones; cuando el tamaño es mayor, producen tan llamados semillas, granos y cochanos; además, el oro se encuentra en otros minerales formadores de metales relacionados con la plata, el telurio y el selenio (silvanita, krennerita, calaverita, petzita, nagoyita, etc.), que son muy

difíciles de manejar; de manera similar, el oro está acompañado de cobre y zinc, hierro, plomo, arsénico, antimonio y muchos otros sulfuros de tierras raras. (PNUMA & MADS, 2012).

Según el Ministerio de Minas y Energía y el Servicio Geológico Colombiano (2019), Las vetas tienen diferentes direcciones, pero las principales tendencias son noroeste-sureste y noreste-suroeste, y el espesor está entre 0,4-2,5 m y en casos especiales entre 5-6 m. Esta dirección preferencial de las vetas es de carácter regional, lo que indica que el control orgánico es de origen tectónico y está relacionado con la estructura tectónica del bloque Norlandino.

La minería artesanal es selectiva; por su baja capacidad de procesamiento, es beneficioso para vetas que contienen altas concentraciones de oro por un lado y oro libre medio y grueso por otro; es decir, las que superan las 40 micras; estas condiciones conducen al uso de filones incluso de pocos centímetros también puede ocasionar entre el 60% y el 70% de la pérdida de mineral; aunque muchos yacimientos tienen alto contenido de oro, no han sido extraídos por pequeños mineros artesanales porque el contenido de metal no muestra una cantidad suficiente de oro libre. La minería a pequeña escala tiene mayor capacidad de producción y tecnología. Al utilizar la concentración por gravedad y la amalgamación, se utiliza el oro libre más grande contenido en el depósito primario; el proceso de recuperación complementario está dirigido a oro más pequeño (<75 micrones) conocido como oro cianurable o polvo de cara; este beneficio se realiza por cianuración mediante agitación o percolación; cuando la complejidad de los minerales a tratar es alta, la pequeña minería tampoco puede recuperar buena parte del oro contenido en los depósitos, y en las colas del proceso de beneficio se pierde aproximadamente el 30% del metal (PNUMA & MADS, 2012).

**Evidencias y hallazgos de yacimientos filonianos en Colombia.** Las regiones con yacimientos filonianos que tienen aún alguna importancia se localizan en los municipios de Segovia y Remedios, en el nororiente del departamento de Antioquia, y la serranía de San Lucas, en el sur del departamento de Bolívar. Otras áreas importantes de extracción de oro son Vitas-California en la provincia de Santander; Santa Isabel-Líbano, al norte de Ibagué en Tolima, y Santa Cruz en Nariño, Anchicayá-Piedrancha. Las minas más tradicionales son El Silencio (Segovia), El Limón (Zaragoza) y La Bramadora (Guadalupe) en la provincia de Antioquia; Vetas (California), en la provincia de Santander; Marmato (ciudad de Marmato) en la provincia de Caldas; La Equis (ciudad de Kibudo). ) en la provincia de Chocó y El Diamante (ciudad de La Cruz) en la provincia de Nariño. Actualmente, el proyecto minero San Ramón de Red Eagle Mining en la ciudad de Santa Rosa (Antioquia) se encuentra en etapa de desarrollo y es considerado uno de los nuevos proyectos de gran trascendencia para el país. (Ministerio de Minas y Energía; Servicio Geológico Colombiano, 2019).

### **1.3 Métodos Utilizados Para la Explotación Aurífera en Colombia**

Según el ministerio del medio ambiente (2002) y el Ministerio de minas y energía (2019), se encuentran establecidas tanto para la actividad minera por aluvión como la de filón, las etapas de exploración, desarrollo, explotación, transporte y comercialización y cierre.

#### **1.3.1 Exploración.**

La planeación adecuada de la explotación de aurífera depende en gran medida de su fase exploratoria, en donde, se deberán escoger los depósitos explotables mediante la realización de cateos al terreno en estudio o realización de apiques para el posterior estudio del material presente, este tipo de apique se puede realizar en las llanuras de inundación de los ríos o playas o

succionando material directamente del cauce del río mediante pequeñas dragas de succión en el caso de la minería de aluvión (GEMMA, 2018). Asimismo, la prospección geológica se utiliza para localizar anomalías provocadas por depósitos minerales. El propósito de la investigación es determinar estos indicios para evaluar los recursos y reservas contenidos en el depósito. En esta etapa, se utilizan métodos geológicos, geoquímicos y aéreos (teledetección). En la minería aurífera, los mineros informales suelen encontrar primero un depósito explotable. (Ministerio del medio ambiente, 2002).

### ***1.3.2 Explotación.***

La fase de explotación depende del tipo de yacimiento que se esté explotando, por ejemplo, el oro de aluvión se encuentra relativamente cerca de la superficie y la capa de suelo o roca que recubre el mineral es delgada, por esta razón se realizan explotaciones a cielo abierto o de tipo superficial, en el caso de las vetas se encuentran a una profundidad mayor por lo que se deben realizar perforaciones subterráneas (Contraloría de Cundinamarca, 2017). En general, para ambos tipos de minería se llevan a cabo las etapas de planeamiento y montaje, desarrollo, beneficio y transformación y cierre.

**Diseño y Planeamiento.** Según el Ministerio de minas y energía (2019), para la minería informal a pequeña y mediana escala esta fase no se cumple en la mayoría de regiones con potencial aurífero. Dentro de esta fase se incluyen actividades de organización, diseño, establecimiento de infraestructura y equipos para la extracción del mineral. El objetivo del diseño y planeamiento minero es buscar el aprovechamiento racional del yacimiento o depósito permitiendo la máxima recuperación de reservas, de tal forma que el proyecto sea técnico, económico, social y ambientalmente viable y sostenible en el tiempo (Agencia Nacional de Minería, 2018).



Esta fase deberá comprender, como mínimo de acuerdo con los resultados de los trabajos de exploración, la selección del área y análisis del plan minero, para determinar el índice máximo de desmonte económico y el grado límite permisible, y de esa manera identificar el bloque o área minera tanto a cielo abierto como subterránea junto con sus mantos, estratos y materiales explotables, que con la secuencia lógica el objetivo de la explotación integral y razonable de yacimientos minerales o yacimientos minerales (Agencia Nacional de Minería, 2018).

Posteriormente, Se designará el área de minería a cielo abierto, la selección de métodos de minería para establecer los mejores criterios de geometría del tajo, como la profundidad máxima, el ancho del fondo del tajo, el ángulo de pendiente total, la altura del terraplén, la longitud plazo de rampa de acceso, y se especificará la operación y los beneficios económicos de cada área minera. Se describirán las principales actividades de la operación minera, y se ordenará la minería según el bloque, nivel, manto y ley, además de las metas de producción mineral establecido para la minería a cielo abierto, las instalaciones necesarias y su ubicación y tamaño, el plan de perforación y voladura de los desechos, el material de calidad ROM mineral para ROM, ley y producción anual de minerales. Se realizará la pre-secuenciación de vertidos y rellenos, se calcularán balances de materiales, ciclos de transporte de minerales y residuos, se propondrán líneas eléctricas, sistemas de control y planes maestros de bombeo de aguas de escorrentía y se realizarán suelos, infraestructura e instalaciones de apoyo removido y apilado bajo tierra, junto con otras operaciones mineras relacionadas a esta práctica extractiva de oro a cielo abierto. Las reservas probadas y las reservas estimadas se estimarán con base en la calidad estimada de bloques, horizontes, depósitos y vetas, y minerales de boca de minerales (incluida la pérdida de minerales y la dilución de rocas por minería). Se calculará el porcentaje de recuperación de reservas y la vida útil de la mina. Se realizará el cronograma general del

proyecto, incluidas las tareas de preparación y desarrollo, requisitos de personal, carga de trabajo y desempeño de cada clase, etc. Se definirá el equipo minero principal y auxiliar requerido para la minería a cielo abierto, así como el equipo requerido para la preparación, procesamiento y beneficio de los minerales, y se especificarán los diferentes parámetros que se utilizarán para calcular su desempeño, como la tasa de producción horaria. equipo, disponibilidad, uso, planificación de tiempo, factores de eficiencia, vida útil, cronogramas de mantenimiento y reemplazo de equipos, etc. Con base en la producción esperada y los resultados de las pruebas metalúrgicas, se definirá el sistema y método de beneficio más adecuado, así como una descripción de la planta, el equipo y sus respectivos costos. (Agencia Nacional de Minería, 2018).

En el caso de la exportación subterránea, se precisarán las área estándar para seleccionar el método de desarrollo, como profundidad de entrada, sistema de ventilación, resultados de análisis geotécnicos, etc. El diseño del canal principal y la planificación del desarrollo, acondicionamiento y extracción de los estratos y cuerpos mineralizados se realizarán de acuerdo a sus respectivos niveles de producción anual. Como parámetro de diseño, el desempeño de la mina debe reflejarse en el nivel técnico del plan minero. La escala de la mina debe mostrar la secuencia de corredores, rieles guía, cruces, tambores, frentes mineros y otros avances productivos requeridos para minar el yacimiento o depósito minero cada año; esta serie de avances se dividirá en bloques, niveles, lechos, estratos y venas y cuerpos mineralizados. Las reservas y leyes probadas se estimarán con base en bloques, horizontes, capas, minerales, vetas y cuerpos duro o ricos en metales. Se calculará el porcentaje de recuperación de reservas y la vida útil de la mina. Se compilará el cronograma general del proyecto, incluidas las tareas de los procesos, preparación y desarrollo, requisitos de personal, carga de trabajo y desempeño de cada clase, etc. Se completará el diseño detallado del trabajo minero, incluidos los trabajos de

perforación y voladura u otros sistemas de arranque manuales o mecánicos; carga, transporte y descarga de materiales; soporte, ventilación, iluminación, drenaje; infraestructura e instalaciones de apoyo requeridas para la minería subterránea y el desarrollo en si del proyecto. También se incluirá el diseño del basurero a cielo abierto y otras instalaciones importantes que requiere el proyecto. Determinar los equipos de minería principales y auxiliares necesarios para la minería subterránea. Con base en la producción esperada y los resultados de las pruebas metalúrgicas, se definirá el sistema y método de beneficio más adecuado, así como una descripción de la planta y el equipo y sus respectivos costos. Se considerará la organización administrativa de la mina subterránea y el organigrama propuesto, requerimientos anuales de personal, capacitación del personal, seguridad minera y salud ocupacional. (Agencia Nacional de Minería, 2018).

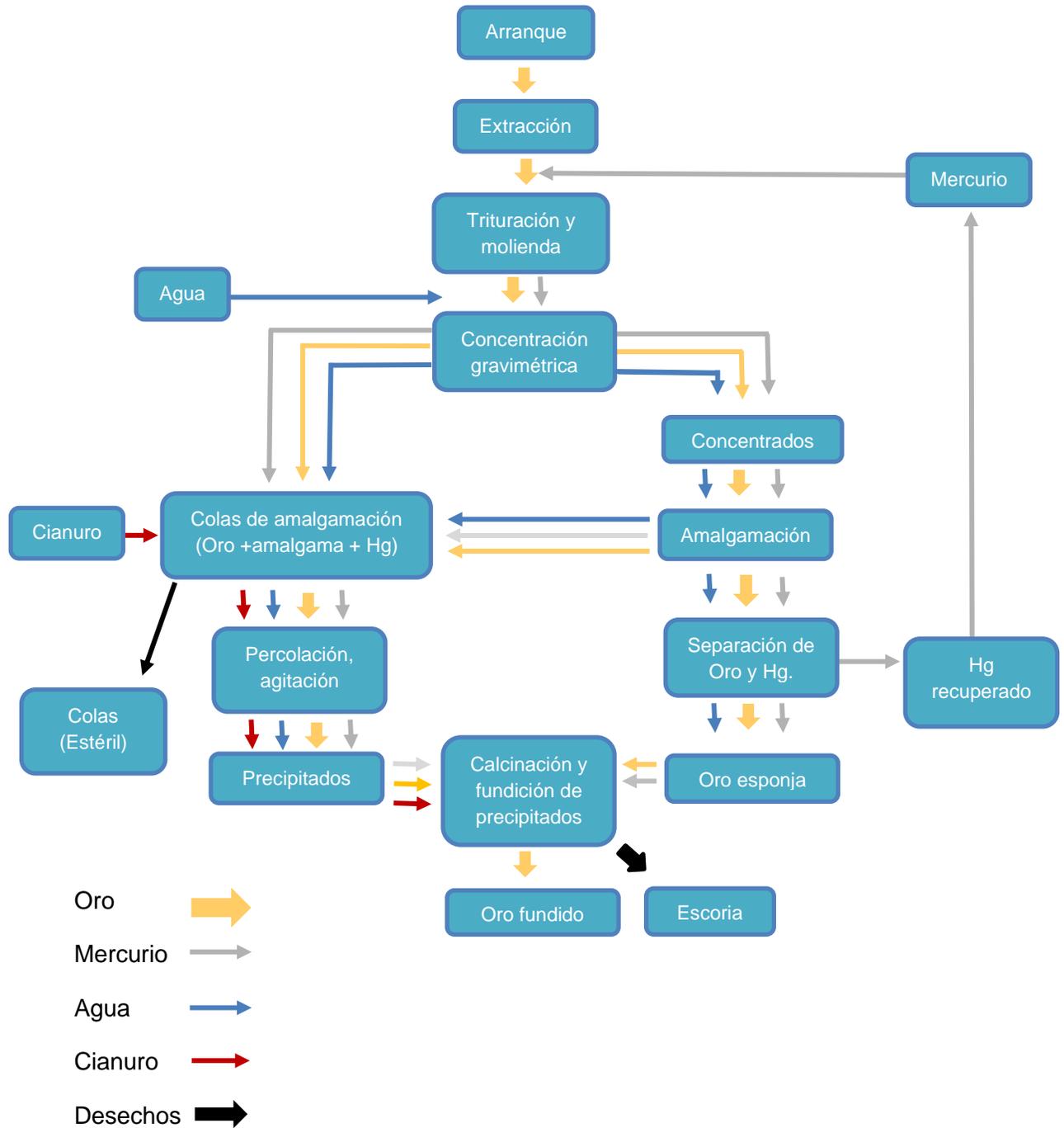
**Beneficio y transformación de minerales.** En esta etapa, se busca separar los minerales de otras sustancias o elementos que se pueden agregar o acompañar, es decir, eliminar sustancias de ganga para aumentar el contenido o contenido metálico de la forma concentrada que es más fácil de manejar y tiene mayor valor agregado. En las minas de Colombia, los intereses de los minerales se llevan a cabo en el área directa de la minería o en la capital de la ciudad. (Castillo A. C., Análisis y evaluación de la problemática socioambiental ocasionada por el uso del mercurio en la minería aurífera artesanal en Colombia, 2013).

**Beneficio del Oro en Minería de Filón.** Los minerales extraídos de las vetas primarias o depósitos de oro llegan al concentrador en un rango de tamaño de partícula muy desigual; antes de iniciar el proceso de beneficio, este mineral se apila en un patio de recepción de carga o tolva de almacenamiento, que consta de varias etapas u operaciones.. En la figura 2 se muestra el proceso esquemático general en el proceso de beneficio de oro en filón.



**Figura 2.**

*Modelo tradicional de minería aurífera.*



A continuación, se definen cada una de las etapas que se llevan a cabo en el proceso de beneficio de oro.

**Arranque.** Para extraer el oro en grandes cantidades Es necesario preparar el terreno, esta preparación se realiza mediante el uso del proceso de desinversión, es decir, se remueve la cobertura vegetal del suelo para poder encontrar el depósito minero que contiene el material mineralizado (Ramos-Betancur, 2007), Se puede iniciar mediante métodos mecánicos (formas continuas y discontinuas), o se puede realizar perforando con materiales explosivos (formas discontinuas) (MinMinas, 2015)El arranque continuo se realiza superando la resistencia y cohesión de herramientas, máquinas o piezas en la roca por interacción mecánica. [...] Permiten la extracción y el transporte continuo, tales como rozadoras, ruedas de cangilones, máquinas mineras, dragas, etc. Existen procedimientos cíclicos e iterativos en arranque discontinuo, entre los cuales las tecnologías más comunes son las siguientes: energía mecánica, energía, energía química (explosivos), láser, energía térmica, aplicaciones de energía hidráulica(Ministerio de Minas y Energía; Servicio Geológico Colombiano, 2018). En el arranque mecánico, la máquina utiliza los impacto, el raspado, la presión hidráulica, la grava o excavación para aflojar los minerales. [...] las máquinas de impacto como martillos hidráulicos, eléctricos y neumáticos [o herramientas manuales] "(MinMinas, 2015); y el arranque con explosivos se utiliza para fragmentar rocas duras y se complementa con martillo picador o martillo manual.

**Trituración y molienda.** El mineral aurifero almacenado en el patio o tolva receptora se reduce de tamaño triturando rocas con un diámetro de más de 3 pulgadas o 4 pulgadas; esta operación generalmente se realiza manualmente y con varillas de acero; luego las rocas se cargan

en una mordaza de la trituradora o enviado al molino de martillos para descargar las rocas menores de 12 mm posteriormente, el material obtenido se muele disminuyendo aún más su tamaño liberando el oro de otros minerales, se pueden utilizar molinos de pisosoles, barriles, molinos chilenos, molinos de bolas, en esta etapa se generan altos consumos de agua, combustible y energía (PNUMA & MADS, 2012). Durante la molienda se logra que el material de la mina quede polvo para luego proceder a lavarlo y extraer el mineral (oro), (González L. C., 2017).

En algunos procedimientos se aplica el mercurio en la fase de la molienda, lo cual es muy contaminante porque solo una parte del mercurio se combina con oro y el resto se pierde, debido a que parte del mercurio permanece en la cola, si no se aplican los procedimientos correctos, eventualmente entrarán directamente al medio ambiente. (Alianza por la Minería Responsable, 2017).

**Concentración gravimétrica.** Este es un proceso basado en minimizar al máximo los minerales que no tienen interés económico (regateo), que acompañan el oro y el beneficio de las concentraciones de este metal precioso, el proceso se realiza en presencia de agua. Se utilizan técnicas de separación por gravedad o cribado, al ser más pesado que el agua, el oro se va al fondo del tanque, batea de sedimentación, también se pueden utilizar canalones, cribas vibratorias, separadores hidráulicos o concentradores centrífugos cuando la extracción es más grande (ONU, 2018), de esta manera el oro se concentra con las partículas más pesadas, y el agua se lleva las partículas más livianas, (González L. C., 2017), los materiales de ganga como rocas grandes u otros minerales que puedan ser retirados en este proceso se catalogan como material estéril y se depositan en zonas especiales para su desecho o su devolución al cauce o llanura aluvial, en algunos casos se utilizan para rellenar antiguas excavaciones. Finalmente, el mineral

queda acompañado por los algunos elementos a los que posteriormente se le agrega nuevamente el mercurio, para reunir las partículas de oro (Alianza por la Minería Responsable, 2017).

**Amalgamación con mercurio.** La amalgamación se realiza en bateas o baldes de forma manual, en canalones y en molinos de molienda, en donde, hay grandes pérdidas en las colas del proceso, en concentradores centrífugos debido al alto caudal de circulación que se produce en el concentrador, se perderá el mercurio finamente disperso. los amalgamadores tipo "jackpot, por Como sistema abierto, hay una gran cantidad de pérdida de mercurio en forma gaseosa en el tambor de amalgama o “coco”, lo que facilita la amalgamación controlada y efectiva en un circuito cerrado y reduce significativamente la pérdida de mercurio. o en placas amalgamadoras que son las más usadas, en donde, una vez se culmina el proceso de separación por gravedad aprovechando las propiedades químicas del oro, la mena resultante se mezcla con mercurio en una plancha de amalgamación que son elaboradas con cobre o con una mezcla de cobre y zinc con lo cual se busca la recuperación de oro fino, así, el mercurio atrapa el mineral en una masa moldeable, viscosa y de color blanco brillante que se llama amalgama; posteriormente, esta amalgama se presiona para eliminar el exceso de mercurio (en el caso manual se hace a mano, y en el caso de la gran minería se hace con prensa); luego del proceso de fusión se realiza realizado, los Residuos finales, llamados “colas de amalgamación” Por lo general, contiene oro, amalgama y mercurio, que no se pueden recuperar por completo, por lo que debe someterse a un proceso de cianuración posterior o una disposición final adecuada. (Alianza por la Minería Responsable, 2017), en los casos en donde no se utiliza cianuro directamente se procede a calentar la amalgama hasta el punto de ebullición del mercurio, con el objeto de evaporarlo, aquel que aún se encuentra presente, generalmente esta quema se realiza al aire libre (Casallas & Martínez, 2014) y da como resultado un oro poroso conocido como “esponja de oro”, posteriormente, esta esponja se funde y

para producir oro doré sólido que se refina en oro de 24k para su posterior comercialización generalmente, a nivel internacional (Stapper, 2012).

El uso inadecuado de mercurio puede causar una gran cantidad de pérdidas. Existe en forma de mercurio líquido durante el procesamiento del mineral y en forma de vapor de mercurio y compuestos inorgánicos durante la separación del oro y el mercurio., (Galvéz, 2008). Existen algunas tecnologías que le permiten limpiar y reactivar el mercurio. Algunos de ellos son: pasar el mercurio a través de un paño, lavar con detergente, cal o ácido clorhídrico diluido, o destilar en un destilador para eliminar contaminantes no volátiles. (SERNAGEOMIN, SONAMI, BGR, 2008).

Existen dos aplicaciones para la utilización del cianuro en la minería primero; se puede usar como un método independiente para la separación del oro de otros minerales, en donde se busca evitar el uso del mercurio y segundo; se puede usar como un procedimiento complementario en la amalgamación con mercurio, a continuación, se explicará su utilización en ambos casos.

**Utilización de cianuro en el proceso de amalgamación con oro.** Siguiendo con el modelo de la ilustración 1, una vez se obtiene la cola de amalgamación, se procede a la aplicación de cianuro alcalino en donde se obtiene una disolución selectiva de metales preciosos, en este caso oro, posteriormente esta disolución se precipita y finalmente se obtiene el oro a través de la calcinación y función (MADS, PNUMA, 2012). La precipitación de la cola de amalgamación se realiza con zinc en polvo extrayendo el oro presente en la disolución, en esta fase se encuentra mercurio líquido proveniente de arenas contaminadas (Metallurgist , 2017).



Los minerales contaminados con mercurio (arenas y lodos) las arenas y lodos no contaminados con mercurio se acumulan en tanques y charcas de sedimentación; estos materiales son luego llevados al proceso de cianuración. Cuando el material es fácil de disolver por el cianuro, este proceso se lleva a cabo a través del sistema de percolación, y cuando el mineral es difícil de manipular, el cianuro se lleva a cabo mediante agitación. (MADS, PNUMA, 2012).

Luego del proceso de precipitación, las arenas con cianuro se neutraliza en algunos casos, luego se saca del tanque y se amontona en patios o botaderos diseñados para tal fin; lamentablemente, muchos de estos desechos se vierten directamente en arroyos que pueden ser llevados a las fuentes hídricas. En estos desechos, el mercurio también existe en forma de mercurio metálico líquido, sales de mercurio o compuestos complejos, que no solo provocan emisiones y liberaciones al medio ambiente, sino que también se registran como pérdidas de mercurio durante el proceso de beneficio. (MADS, PNUMA, 2012).

Una vez se estima que ha precipitado todo el oro contenido en la solución, este sedimento se coloca en un recipiente metálico y se calienta hasta obtener una "pasta" completamente seca; en esta operación no solo se evapora el agua, sino también la solución de cianuro y el precipitado. Parte del mercurio sobre el zinc también se evapora. El precipitado seco se utiliza para fundir y refinar el oro y las esponjas obtenidas por destilación. Para fundir, se añaden los denominados rellenos de fundente, que consisten en bórax, carbonato de sodio y nitrato de potasio. Se mete la mezcla obtenida en un horno a una temperatura mínima de 1200 °C durante 1,5 a 2 horas para fundir el material; en este momento, se vierte la parte metálica (oro + plata + otros metales) en el molde, y se separa la hebillita metálica de la escoria. Durante el proceso de fundición, todo el mercurio que queda en el precipitado se volatiliza., produciendo mercurio y otros gases de zinc y metales pesados, muchos de los cuales son altamente tóxicos. Finalmente, los botones de oro se

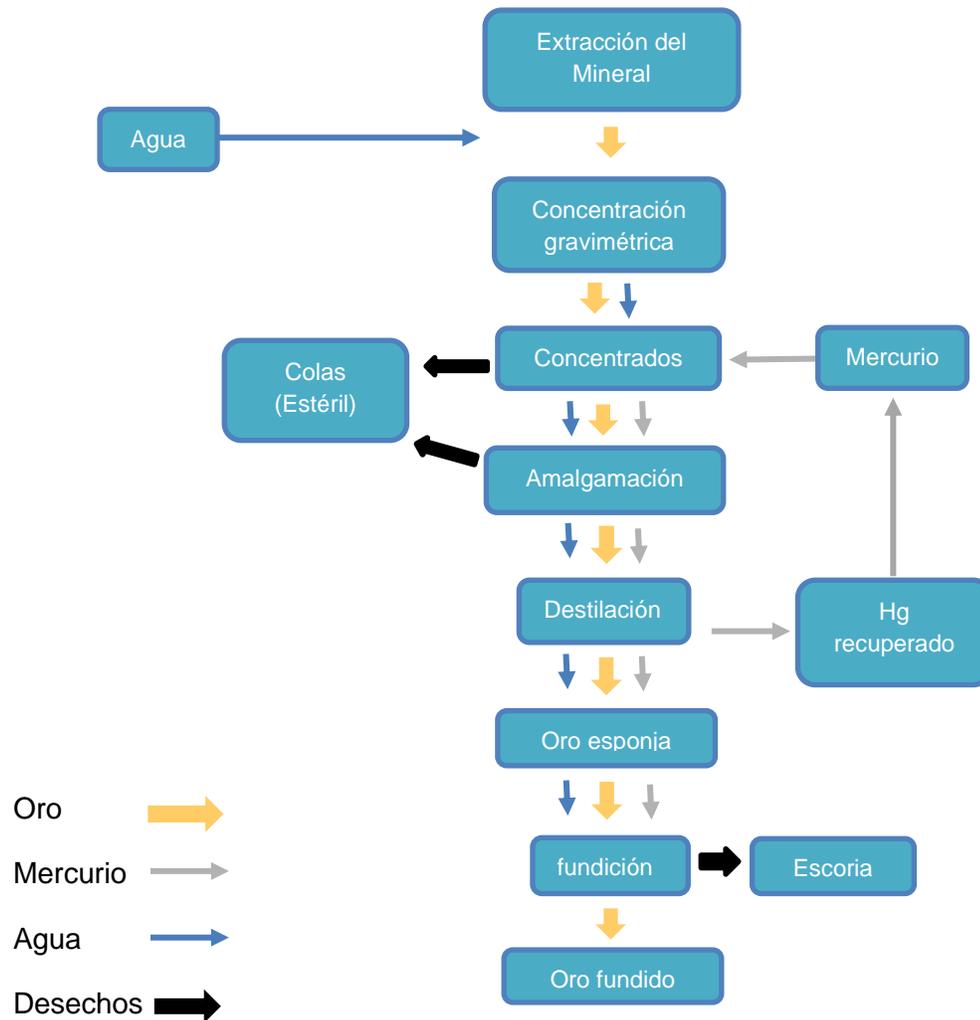
separan químicamente mediante la adición de ácido nítrico; el oro se separa de la solución y luego se funde nuevamente hasta obtener oro de alta calidad. (MADS, PNUMA, 2012).

**Extracción con cianuro.** La técnica llamada cianuración tiene como objetivo evitar el uso de mercurio; se ha implementado durante casi un siglo. La cianuración con agitación puede lograr una tasa de recuperación de oro de más del 90%, incluida la adición de una solución de lixiviación. En algunos casos, la solución es solo cianuro concentrado, mientras que en otros casos, se agrega cianuro y sales, como cloruro y nitrato. en contacto con el material que contiene oro previamente molido a un nivel muy fino. Luego se percibe que el oro puede ingresar a la solución junto con la fase acuosa, dejando todos los materiales minerales restantes. Estos materiales minerales se eliminan de la mezcla para continuar trabajando con la solución. Mediante la química de precipitación, el oro se puede recuperar y dejar la fase acuosa que contiene cianuro y otros materiales necesarios para el manejo correcto de la solución para evitar los subproductos de la contaminación (Casallas M. , 2015).

**Beneficio del Oro en Minería de aluvión.** En los depósitos aluviales, la naturaleza libera partículas de oro de la ganga que las acompaña a lo largo del tiempo geológico y también concentra los metales preciosos de manera tan eficiente y selectiva que se pueden recuperar de inmediato. El sistema de beneficio se realiza por concentración en peso, combinado en algunos casos, y destilación en algunos casos. (PNUMA & MADS, 2012). En la figura 3 se muestra el esquema básico del procedimiento de beneficio de oro de aluvión.

### Figura 3

*Esquema básico en el beneficio de oro de aluvión.*



**Extracción del mineral.** En esta fase se utilizan retroexcavadoras o dragas hidráulicas que se encargan de levantar los “materiales auríferos”, (Ramos-Betancur, 2007), en los casos en donde la extracción se realiza en cuerpos de agua con mayor caudal o más profundos se utilizan dragas succionadoras de oro, para posteriormente depositarlos en los lugares donde se realizara la separación gravimétrica. Es un proceso en el cual se demanda altos recursos económicos para el combustible y mantenimiento de las máquinas, sin embargo, “no necesita mayor asesoría técnica

ni mano de obra fuera de un cateador y personal de beneficio para los canalones” (Ramos-Betancur, 2007).

**Concentración gravimétrica.** Es el método de concentración aurífera más utilizado para la extracción de oro manual y en pequeña escala en áreas aluviales; dado que el oro existe en estado libre y el tamaño suele ser superior a 40 micrones, tiene una excelente respuesta a los procesos y equipos mecánicos o de concentración por gravedad. Los metales de las fincas mineras (la misma finca de beneficio en casi todos los casos) se someten a una separación por tamaño de partícula; esta selección se hace manualmente removiendo rocas y grava (en el caso de la minería artesanal) del material a ser extraído. La minería a gran escala se realiza mediante pantallas, dejando un material más pequeño (arena) para la separación mecánica o método gravimétrico. En la minería de oro aluvial a pequeña escala (escalado, monitoreo con bombas y dragas de menos de 4 pulgadas), separando el oro mediante bandejas y drenajes de no más de 3 metros de largo; finalmente se concentran todos los materiales en la olla para obtener oro libre, que se destina para la venta. La zanja de drenaje en zigzag se usa para el sitio de dragas y retroexcavadoras grandes de más de 4 pulgadas, generalmente entre 9 y 12 metros de largo; colocando los materiales de minería en la tolva y luego separando los materiales a granel de allí a través de una pantalla; la arena pasa a través de varias estructuras, al final de la operación, después de 12 a 24 horas, el tejido que cubre el fondo de la zanja de drenaje se recolecta, agita y se lava en tanques de plástico; entonces se deposita el concentrado, que generalmente representa menos del 1% del total de la carga; estos concentrados auríferos se separan completamente en una tina o por amalgamación.

**Amalgamación.** Hay dos formas de llevar a cabo este proceso en la minería aluvial, la amalgamación se puede realizar "in situ", en la que se agrega mercurio directamente al pozo de excavación, a medida que la carga se mueve y transporta, el oro libre existente se amalgama parcialmente. Esta técnica se utiliza a menudo en minas aluviales con bombas de grava y desagües. La mezcla se realiza en el pozo y la pulpa fluye a través de la bomba y la tubería hasta la zanja de drenaje. Debido a la fuerte agitación que se produce durante el transporte, la mayor parte del mercurio de la pulpa se tritura y se pierde en el pegamento junto con las partículas de amalgama. En este sistema, la tasa de recuperación de oro fino es muy baja y la pérdida de mercurio es alta porque es difícil recuperar el mercurio en polvo y las partículas de amalgama en el drenaje. (MADS, PNUMA, 2012).

Por otra parte, se puede realizar la Amalgamación en canalones, donde, el mercurio se agrega directamente a la estructura; el material que fluye a través de ella se concentra y recolecta al final del día, se agita y se limpia en recipientes de plástico; cuando se usa un sistema semicerrado, el mercurio se agrega a la recolección en el desagüe y se deposita dentro de un plástico en el cual el concentrado del tanque se mezcla uniformemente removiendo o perforando manualmente hasta que se combinen el mercurio y el oro; luego al concentrar en la olla se separa el mercurio y la amalgama del concentrado; finalmente el mercurio y la amalgama son exprimido para obtener mercurio metálico y pasta de amalgama (PNUMA & MADS, 2012).

**Destilación de amalgamas.** En la minería aluvial, la amalgama obtenida se separa del mercurio mediante un proceso de destilación, para ello se coloca la pasta sobre un elemento metálico y se quema al aire libre por el calor del horno o la acción de la llama del soplete. En algunos concentradores de oro aluvial, utilizan destilador para recuperar el mercurio contenido en la amalgama.

### **1.3.3 Transporte y Comercialización de Oro**

Una vez consolidado el oro, es transportado y comercializado a nivel nacional e internacional, generalmente el oro alcanza precios elevados en los mercados, actualmente su precio oscila entre los 130 y 140 millones por kilo de oro, lo que lo hace un mineral bastante llamativo para su extracción y comercialización, en el caso de la minería ilegal esta actividad se hace más llamativa, por el ahorro en los costos que conllevaría obtener un título minero, implicando licencias, permisos, planes de restauración, y seguridad laboral.

Según la Asociación Colombiana de Minería (ACM), para el 2019 se estima que entre el 70% y el 80% del oro exportado se produce a través de la minería ilegal, y sus actividades se concentran en las provincias de Antioquia, Chocó, Nariño, Valle del Cauca, Cauca, Córdoba y el río Bolívar. Asimismo, este fenómeno también ha comenzado a aparecer en los Llanos Orientales, Putumayo, Amazonas y Vichada. Los registros del Ejército Nacional muestran que 152 ciudades del país se encuentran actualmente afectadas por la minería ilegal (Revista portafolio , 2019).

### **1.3.4 Cierre de la mina**

Una vez agotado el mineral las operaciones de explotación se detienen y se procede a retirar la maquinaria y al desmantelamiento de las instalaciones. De acuerdo al plan minero ambiental, como actividad posterior al desmantelamiento se debe ejecutar el plan de Obras de Recuperación geomorfológica, paisajística y forestal del sistema alterado y el Plan de cierre de la explotación y abandono de los montajes y de la infraestructura (Ley 685, 2001),

En una operación minera aluvial El cierre de la mina debe hacerse de forma paulatina, pues se acumulará una gran cantidad de grava y lodos a lo largo del proceso. Además, a medida que el



agua se acumula, se crean callejones, huecos de tamaño y profundidad considerables, lo que dificulta la regeneración natural, además de la grava y lodo puestos debidamente tratados (ver C.1) en el pozo, lo que puede cerrar la mina de manera efectiva. Para ello, también se recomienda: o Después de llenar los huecos, los desechos se apilan en forma de montículos, que luego son amontonados por excavadoras, no es necesario ampliarlos, o también se recomienda no nivelar y despejar el montículo para ayudar a controlar la materia orgánica producida por las plantas y evitar inundaciones y pérdidas de tierra causadas por la escorrentía de agua de lluvia. (Ministerio del ambiente, 2014), sin embargo, debido a la inexistencia de títulos mineros, los encargados de explotar el material no se encuentran bajo ningún tipo de obligación legal ni moral, por lo que la mayoría de los sitios en explotados simplemente son abandonados.

## Capítulo II

La gran magnitud de las actividades de minería aurífera ilegal en Colombia ha modificado, destruido y agotado una gran cantidad de ecosistemas y recursos naturales, además de afectar la calidad de vida de toda la población colombiana.

### 2.1 Impactos al Recurso Hídrico y Ecosistemas Acuáticos

Como se ha mencionado en el capítulo anterior los procesos y técnicas para la extracción del oro varían respecto a la escala de la minería y a su grado de tecnificación. Una característica de muchas empresas mineras de diferente escala es el uso de sustancias altamente tóxicas como el mercurio o el cianuro, el cual causa daños a la naturaleza a través de la contaminación de ríos, lagos y la alteración de la red trófica de algunos ecosistemas debido a la acumulación y biomagnificación de estos elementos (Balanta & Vidal, 2020).

Independientemente del tipo de explotación y de la escala la actividad minera demanda grandes volúmenes de agua para los procesos y operaciones de obtención del mineral, los cuales contribuyen especialmente a la polución y contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, así como a la disminución del recurso hídrico (Ministerio del medio ambiente, 2002).

Según el hidrogeólogo, Fernando Díaz (2012), en la actualidad se desarrolla una megaminería del agua, recurso que se extrae, se explota, se contamina y desecha y que no se recuperará jamás. Esta megaminería se produce al mismo tiempo que se ejecuta la megaminería del oro, en donde, se reduce el caudal de ríos e incluso puede eliminar cursos de agua, esto se debe a que el agua forma parte de un balance sensible y cualquier modificación a escala repercute directamente en el volumen total hídrico. Así mismo, cuando se realizan las canteras es necesario



succionar el agua para poder así, extraer el mineral, en este punto se ocasiona una depresión de esas aguas, que implica un agotamiento del recurso subterráneo y una disminución del recurso superficial (Aranda, 2012).

Por otra parte, la calidad del recurso hídrico se ve fuertemente intervenida, se alteran los cauces por remoción de las areniscas del fondo de los ríos, aumentando el riesgo de inundación ocasionado por la disminución parcial o total de la infiltración de las aguas pluviales, se altera la turbidez de cuerpos de agua cercanos al aumentar la cantidad de sólidos suspendidos o sedimentos a causa de la constante remoción y agitación de los cuerpos de agua (Casallas & Martínez, 2014), los procesos de sedimentación, originados en la minería, operaciones de puesta en marcha de los minerales, como los tratamientos de residuos y actividades causadas por procesos asépticos y corrosivos; en su conjunto, pueden ser utilizados para transportar y acumular materiales sólidos en cuerpos de agua; en la minería aluvial, los sedimentos se depositan en el lecho y bordes de la corriente de agua, los cuales producen deterioros, presas en los caudales cambiando su dinámica y aumentan el riesgo de inundaciones y avalanchas. (Ministerio del medio ambiente, 2002). Así mismo, las instalaciones de saneamiento, la vegetación submarina, las sustancias en descomposición y los servicios agrícolas también introducen cargas orgánicas, que emiten diversos contaminantes orgánicos que tienen efectos de eutrofización y contaminación del agua, que tienen un impacto grave en la salud humana y el medio ambiente. (Ministerio del medio ambiente, 2002).

En la minería subterránea de oro, en la etapa de minería y en las actividades de relleno de antiguas minas o pozos con residuos y relaves, el proceso de meteorización por sulfuro y azufre existente en el depósito conduce al drenaje ácido es un factor importante. Las operaciones de excavación exponen estas sustancias a la acción combinada de agua, oxígeno y bacterias para



hacerlas alcanzar un nuevo equilibrio químico, lo que conduce a la acidificación del agua, corrosión, cambios en la absorción de cationes metálicos, aumento de la solubilidad de plantas y animales, elementos metálicos, acuíferos, flujo de agua superficial y contaminación del suelo (Ministerio del medio ambiente, 2002). La oxidación química del sulfuro provocará la formación de drenajes ácidos, que en muchos casos serán acelerados por la acción de las bacterias. Los principales elementos involucrados son: sulfuro activo, oxígeno y agua (vapor o líquido) y bacterias que actúan como catalizadores. Su formación provocará graves problemas de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, pues una vez finalizado el ciclo productivo su impacto puede durar décadas o incluso cientos de años, siendo necesario prevenir su formación y realizar el tratamiento más adecuado cuando se forme. También hay reportes de que varios miles de peces y crustáceos murieron a causa de estos contaminantes en los ríos, que destruyeron las riberas, aguas de los ríos y la aparición de lagos con color y turbidez. Esto se debe a que además del canal de pH bajo que contiene una gran cantidad de sólidos en suspensión, el contenido de sulfato y metales es alto. (Aduvire, 2006). Estas aguas provenientes de destilación son vertidas directamente a los cuerpos de agua y se producen Cuando la amalgama no se destila, sino que se disuelve en ácido nítrico o una mezcla de ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, la mezcla pobre en oro se desecha en el suelo o en la masa de agua. En estos fluidos se encuentran compuestos y estados metálicos de mercurio, como nitrato de mercurio, cloruro y sulfato. De manera similar, cuando la solución magra se neutraliza con una mezcla de agua y cal; el mercurio en este fluido existe en forma de metal y nitratos, cloruros, cloratos y sulfatos, y el contenido es muy pequeño; una vez neutralizado, la solución será tirada al suelo y entra en la corriente de agua superficial. (PNUMA & MADS, 2012). Estos relaves que contienen mercurio se descargan cerca de los cuerpos de agua, por lo que el suelo, ríos, arroyos, estanques y lagos han estado contaminados durante mucho tiempo. Durante décadas, miles de sitios contaminados

*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*

seguirán viéndose afectados y el impacto se extenderá más allá del nivel local, lo que provocará graves peligros para la salud ambiental a largo plazo para la población que vive río abajo en el área minera. (PNUMA, 2010).

Por otra parte, La operación de maquinaria como dragas, dragalinas, motobombas y equipos, así como su mantenimiento, son fuentes de contaminación con estos elementos, en especial las aguas provenientes de talleres, zonas de lavado, derrames en zonas de almacenamiento y accidentes. Así mismo, el uso de combustibles y lubricantes, se acumulan en las redes tróficas y afectan e inciden al deterioro de las condiciones físico químicas y biológicas de las corrientes con la consecuente restricción del uso, modificación del hábitat y productividad del ecosistema (Ministerio del medio ambiente, 2002).

### **2.1.1 Efectos del Mercurio y el Cianuro en el Recurso Hídrico**

Las actividades de extracción de oro artesanal y en pequeña escala en todo el mundo se consideran la mayor fuente de emisiones de mercurio (Persaud, Telmer, Costa, & Moore, 2017), La mayoría de los mineros incluso conocen los riesgos y efectos del uso de mercurio en el proceso de extracción de oro, y su uso de mercurio causa daños irreparables al medio ambiente. Además de las comunidades que viven en el área afectada por la minería y aguas abajo del área, este impacto puede continuar durante décadas después de que cesen las actividades mineras. La minería artesanal o de pequeña escala de oro es una actividad con altos riesgos ocupacionales, industriales y ambientales, considerando que en muchos casos se maneja de manera manual e ilegal y no cumple con los lineamientos de protección en el trabajo pues las condiciones son de alto riesgo para los trabajadores, la seguridad industrial y salud ocupacional (Castillo, 2013). El ingreso y distribución del mercurio en los recursos hídricos generan un alto riesgo ecológico en



este tipo de ecosistemas generando su bioacumulación en organismos vivos acuáticos y su deposición en sedimentos (Eagles-Smith et al., 2016).

Una de las formas de mercurio más fácilmente asimilables por los organismos acuáticos es el metil-mercurio, que además de bioacumularse, puede biomagnificarse a la red trófica de otros ecosistemas (Alpers et al., 2016). Incluso, puede llegar indirectamente al ser humano a través del comercio y consumo de pescado (Gbogbo, Otoo, Huago, & Asomaning, 2017). A parte de esto, la presencia de mercurio en cuerpos de agua dulce puede afectar su disponibilidad para el ser humano (Gyamfi, Appiah-Adjei, & Adjei, 2019), esta acumulación se debe a que la arena de la capa aluvial entra en contacto con el mercurio durante el proceso de amalgamación y simplemente se arroja a la corriente de agua o al área circundante en el mismo sitio de extracción; el mercurio es un metal líquido de alto peso molecular que se deposita rápidamente en la capa inferior del lecho del río o la pila de relaves. Allí comienza el proceso de metilación; en el caso de la extracción de oro, los lodos y arenas contaminados con mercurio se depositan en el sedimentador, pero generalmente cuando la estructura se obstruye, muchos de ellos escapan al cuerpo de agua. De igual forma, luego del proceso de neutralización de la amalgama con cianuro, se forman otros compuestos, como el cloruro de mercurio ( $HgCl$ ) y el cloruro de mercurio ( $HgCl_2$ ), que se combinan con el compuesto de mercurio formado por cianuración y una pequeña cantidad de mercurio metálico que aún existe y arrastrado por el flujo de las aguas de lavado a los suelos y a las corrientes de agua. (PNUMA & MADS, 2012).

De acuerdo con el Decreto 1584 de 1984 (modificado por el Decreto 3930 de 2010) de la república de Colombia, las concentraciones permisibles de mercurio para el agua potable o de consumo humano deben estar por debajo de los 0.002 mg/L. En algunas regiones mineras como el alto Cauca (Colombia), es posible encontrar concentraciones de mercurio en cercanías a los

0.005 mg/L (Vélez-Torres, Venegas, & Eric, 2018). Debido a la dinámica de los ríos, las concentraciones de mercurio pueden encontrarse a varios kilómetros aguas abajo de la misma cuenca hidrográfica, afectando a los seres humanos y otros organismos vivos que se encuentran distantes a la fuente de ese contaminante (Morway, Thodal, & Marvin-DiPasquale, 2017).

El uso de cianuro para recuperar oro es otra práctica común entre la población minera, que incluye el tratamiento de minerales con cianuro de sodio o cianuro de potasio, y trituración. El cianuro tiene la propiedad de disolver el oro y la plata contenidos en los minerales, y los metales preciosos se recuperan por precipitación con zinc (virutas o polvo). Teniendo en cuenta la toxicidad de los metales, estos métodos básicos pueden tener efectos graves sobre la salud y el medio ambiente. Asimismo, en el proceso de lixiviación de cianuro, debido a la inyección de residuos de cianuro en el basurero, la movilización de metales pesados o la producción de la solución ácida antes mencionada, se produce un daño ambiental a largo plazo y el impacto a corto plazo es causado por accidentes. Puede ocurrir durante la operación o desbordamiento, y puede filtrarse a cursos de agua de manera impredecible. (Moran, 2004).

Debido a la alta toxicidad del cianuro, el efecto sobre los peces expuestos al cianuro es catastrófico, esto se debe a que son las especies más sensibles y se ven perturbadas por concentraciones relativamente bajas de cianuro. (Moran, 2004) . Por ejemplo, los peces mueren por exposición a concentraciones de cianuro en el rango de microgramos por litro. Las concentraciones de cianuro que matan a más del 50% de la población en 96 horas son altamente tóxicas. (Ingles & Scott, 2002). La exposición crónica se describe como exposición a niveles subletales de cianuro: algunos efectos crónicos pueden durar hasta diez días después de una fuga. Además, la exposición prolongada al cianuro afectará la reproducción, la fisiología y los niveles

de actividad de muchos peces y puede incapacitar los recursos pesqueros. Parece que los efectos tóxicos del HCN no son acumulativos. (Moran, 2004).

## 2.2 Impactos al Recurso Suelo, el Paisaje y los Ecosistemas Terrestres

El suelo puede considerarse como el primer recurso en ser alterado, desde la fase exploratoria se pueden generar impactos de remoción en masa especialmente en la minería de filón o subterránea al comenzar a cortar caminos que permitan el acceso a afloramientos o sitios de muestreo, también se incluye la excavación de zanjas, pozos, canales de exploración, pozos de perforación, generación de lodos, construcción de edificios, construcción de patios de almacenamiento, transformación de caminos internos, perforación, voladura, remoción de desechos, minería de minerales y procesamiento de grava. En la minería subterránea, los asentamientos pueden ocurrir en actividades relacionadas con soporte, perforación, voladuras y transporte externo. (Ministerio del medio ambiente, 2002).

Los movimientos en masa incluyen todos los movimientos de ladera abajo de rocas, detritos o tierras por efecto de la gravedad (Proyecto Multinacional Andino, 2007). Los tipos de movimiento masivo desencadenados por las actividades mineras incluyen: caída (deslizamiento de tierra) y asentamiento (hundimiento), que pueden causar una serie de impactos, como destrucción de viviendas, bloqueo de carreteras, accidentes, etc. (Mosquera, et al., 2019).

Otro efecto importante es la activación del proceso de erosión, que se produce por la remoción de la cubierta vegetal y la superficie del suelo en el terreno obviamente ondulado. Una vez expuesto a la lluvia y la luz solar, desencadenará el despojo de materiales a corto y mediano y largo plazo (Ministerio del medio ambiente, 2002), este impacto está vinculado generalmente a la apertura de caminos, trincheras, construcción y montaje, remoción de estériles y la extracción del

mineral. El manejo inadecuado de explosivos en las operaciones mineras, la colocación de rocas de las minas en la ladera de las montañas y el uso de pequeños arroyos y ríos como vertederos de desechos han causado inestabilidad del terreno, lo que ha provocado desprendimientos de rocas, barrancos, procesos de hundimiento y deslizamientos de tierra. Normalmente, los sedimentos estériles que carecen de una capa vegetal pueden dar lugar a la formación de enormes barrancos, quebradas y deslizamientos de tierra. En ocasiones, la ubicación de estos depósitos no tiene un plan de mina consistente, y se encuentran cerca de cuerpos de agua, por lo que la escorrentía superficial traslada estos sólidos en suspensión a las zanjas de drenaje que conducen a presas y aumentan la sedimentación y la turbidez. (PNUMA & MADS, 2012).

Debido a las actividades de extracción aurífera y la descarga directa de aguas residuales, las propiedades físicas y químicas del suelo se modifican por la incorporación de mercurio, cianuro, combustible, grasa y aceite; la generación de lixiviados, generación de desechos y escombros. (Machado, Ospina, Henao, & Marín, 2010).

Por otra parte, la eliminación definitiva de coberturas vegetales de diferente tipo, genera a la pérdida de toda la biodiversidad edáfica y de las funciones ecosistemáticas del suelo, las especies del tipo mamíferos, aves, anfibios y reptiles que dependen de las plantas para su subsistencia son eliminadas o deben migrar a lugares que pueden ser no aptos para ellos. De manera similar, la minería a cielo abierto, los sumideros o la pérdida de suelo en áreas aluviales pueden provocar procesos de erosión que reduzcan la productividad, la estabilidad ambiental, especialmente la estabilidad de las plantas, y afecten la regulación del agua a nivel de ecosistemas y unidades geográficas de la cuenca. (Ayala Mosquera, Diaz Muegue, & Gómez - Fernández, 2019). Además, la pérdida de cobertura vegetal conduce a cambios en la estructura y composición de la vegetación, degradación de la calidad del hábitat en diferentes taxones,

cambios en la dinámica de los ecosistemas, debido al proceso de extracción y ganancia. (Machado, Ospina, Henao, & Marín, 2010). En este sentido, según la revista Divulgación Científica de la Universidad del Rosario, entre los años 2001 y 2018 se deforestaron alrededor de 146.540 hectáreas en las minas legales colombianas, lo equivalente a que cada concesión minera deforeste más de 400 hectáreas de bosque en el país. Según estudios realizados sobre minería aurífera se puede estimar que se talan directamente 15 árboles por cada kilogramo de oro (Echandía, 2020); a estas cifras se le debe sumar lo correspondiente a la deforestación a causa de la minería ilegal que corresponde a más del 60% en el país. Este tipo de deforestación ha tenido un impacto grave en el medio ambiente del Océano Pacífico, Amazonas y Magdalena Central. Entre 1990 y 2010, se talaron un promedio de 310 349 hectáreas de bosque cada año. Esto significa que en diez años Colombia perdió 6,206.00 hectáreas de bosque, o el 5.4% del área del país. (Ayala Mosquera, Diaz Muegue, & Gómez -Fernández, 2019).

Según el Ministerio de justicia y del derecho; UNODC (2016), La pérdida total de coberturas de alto valor ambiental asociadas con las actividades de extracción de oro de aluvión o mina corrida en 2014 fue de 24,450 hectáreas, concentradas en Chocó (77%), que es uno de los puntos calientes de biodiversidad más importantes del mundo; cabe señalar que EVOA 51% La El área del país se concentra en los ríos Quito, Bajo Nechí, Directos Bajo Nechí y Tamaná-Subcuencas de los ríos Directos San Juan. Asimismo, se ha determinado que existen minería ilegal en terrenos de parques naturales y reservas nacionales, erosión de suelos y pérdida de cobertura de alto valor ambiental por actividades de minería aluvial, áreas de bosque de galería, bosques de ribera, se conectan los diferentes animales, especies de plantas y su hábitat.

El panorama se oscurece un poco más al considerar la pérdida de cobertura de vegetación secundaria o en proceso de sucesión vegetal, con una pérdida de cobertura de 21.768 ha, esto



indica que mensualmente se pierden 1.814 hectáreas, de las cuales 1.378 hectáreas se pierden en el Chocó, que se ubica en el corredor biogeográfico (América del Norte-América del Sur), que es una de las 10 regiones más diversas del mundo con una variedad de endémicas especies y ecosistemas estratégicos, es vital proteger el suministro de agua y cientos de especies de flora y fauna que actualmente figuran en el Libro Rojo de Especies en Peligro de Extinción. Es de especial importancia a nivel nacional la tasa de pérdida de bosques naturales causada por esta actividad de 2013 a 2014. Se informa que cada mes se talan 223 hectáreas de bosque, de las cuales 192 hectáreas se encuentran en Choco. El 55% de la cobertura perdida de alto valor ambiental (bosque natural y otros tipos de cobertura terrestre, como vegetación secundaria) se concentra en el concejo comunal del Medio Atrato Acia, los alcaldes de Condoto e Iró, Istmina y parte de San Juan en el medio, de ACISANP Estado de San Pablo, mayor de Acadesán y Nóvita (IDEAM, IDEAM. Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono, 2015).

### **2.2.1 Incidencia del Mercurio en el Suelo, su Fauna y Flora.**

La contaminación por metales pesados como el cobre, el zinc y el mercurio utilizados en el proceso de fusión es uno de los efectos más graves de la lenta y difícil restauración del suelo. Entre los metales pesados, uno de los metales pesados que más problemas causa es el mercurio, considerado un contaminante a nivel mundial. (López-Tejedor, Sierra, Rodríguez, & Millán, 2010).

Las condiciones del suelo son generalmente favorables para la formación de compuestos orgánicos e inorgánicos formando complejos con aniones orgánicos; es decir, en el suelo, el mercurio sufrirá reacciones químicas y biológicas extensivas para formar compuestos orgánicos e inorgánicos, como el metilmercurio, que es el compuesto orgánico más tóxico. (Caiza, 2018) El comportamiento de complejación controla en gran medida la movilidad del mercurio en el suelo.

La mayor parte del mercurio que se encuentra en el suelo se combina con una gran cantidad de materia orgánica, y solo cuando se combina con humus o suelo en suspensión se puede lixiviar a través de la escorrentía. Por estas razones, el mercurio permanece en el suelo durante mucho tiempo, por lo que el mercurio acumulado en el suelo continuará siendo liberado en el agua superficial y otros medios durante un largo período de tiempo (tal vez cientos de años). (Pirrone et al., 2001).

En el suelo, el mercurio se acumula en mayor medida en los primeros centímetros, las concentraciones suelen disminuir según se avanza en profundidad. Esto se debe a que la disponibilidad del Hg no solo depende de su especiación química sino también de las propiedades del suelo particularmente el pH, potencial redox y contenido en coloides del suelo. En el caso de la minería aurífera al generarse la acidez del suelo, es decir, la disminución del PH, se favorece a la acumulación de metales pesados, Asimismo, durante la ejecución de las operaciones mineras existen condiciones reductoras más adecuadas para la formación de metilmercurio, como se mencionó anteriormente, el metilmercurio es la forma más tóxica que existe de este elemento, por lo que el tipo de suelo será un factor importante puesto que se acumula debido al tipo del suelo. su concentración disminuye gradualmente en los primeros 20 cm del suelo, y luego se estabiliza en profundidad. La concentración de mercurio en la solución del suelo se controla mediante la reacción de adsorción-desorción de la materia orgánica y sus minerales, lo que reduce la pérdida por volatilización del mercurio en el suelo. Sin embargo, debido al proceso de lixiviación, la lluvia provocará una disminución en la concentración de mercurio en la capa orgánica superficial y un aumento en la concentración de mercurio en la capa orgánica profunda. (López-Tejedor, Sierra, Rodríguez, & Millán, 2010).

Por otro lado, el crecimiento y la reproducción de los invertebrados se ven fácilmente afectados por la contaminación del suelo por mercurio. Dado que se encuentran al comienzo de la cadena alimentaria, pueden transferirse y pasarse a niveles tróficos superiores. Los invertebrados más estudiados son diferentes tipos de gusanos, que se consideran biomarcadores de la toxicidad del suelo. Debido a la intoxicación secundaria de mercurio por depredadores vertebrados, el grado de bioacumulación de mercurio en los invertebrados del suelo es más elevada (Mahbub, et al., 2017).

En las plantas, el mercurio puede extraerse del sistema de raíces de la planta y transferirse al interior de la planta. La tasa de transferencia de mercurio a las plantas a través de las raíces es muy lenta y no depende de la concentración total de mercurio presente en el suelo, sino de la cantidad de mercurio fácilmente disponible. (López-Tejedor, Sierra, Rodríguez, & Millán, 2010). La forma inorgánica del suelo es absorbida más fácilmente por las raíces, especialmente cuando se combina con ácido fúlvico. Se ha demostrado que el mercurio intracelular se une a SH, fosfato y otros grupos activos en ADP y ATP, cambiando así la permeabilidad de la membrana y la actividad mitocondrial. La toxicidad del mercurio en las plantas puede afectar el sistema antioxidante, la fotosíntesis y su crecimiento, cambiando así su desempeño. También afecta la absorción de nutrientes y la homeostasis e induce genotoxicidad. (Matsuyama, et al., 2017). Estudios recientes han demostrado que las plantaciones de arroz también pueden acumular metilmercurio de suelos contaminados en áreas mineras de mercurio. (Zhang, et al., 2010), de esta forma, el mercurio puede atravesar la cadena alimentaria. Los experimentos con cultivos de cebada, altramuces, garbanzos, lentejas y berenjenas en suelos contaminados con mercurio encontraron que las raíces tenían la mayor concentración de mercurio, seguidas de los tallos, las hojas y los frutos. (Caiza, 2018).

El cambio de paisaje está relacionado con el cambio y reducción de componentes naturales en zonas de desarrollo y botaderos. En caso de deslizamientos de tierra, movimiento a gran escala y formación de nuevos relieves, cambios de color, fracturas visuales en la cuenca, y la percepción de foco en la mina desfavorable a otros puntos, se formarán depresiones y excavaciones. Estos cambios serán drásticos, parciales, permanentes y en gran medida irreversibles. (Hernández-Jatib, Ulloa-Carcasés, Almager-Carmenate, & Rosario-Ferrer, 2014). El movimiento de maquinaria pesada, el uso de áreas de almacenamiento de borde, la remoción y apilamiento de todos los materiales, el tratamiento de arena con mercurio y cianuro, la esterilidad de los productos de lodos como proceso de beneficio, la acumulación de materiales en basureros, y los impactos de las zonas urbanísticas no reestructurantes en el suelo el impacto ambiental causado por el paisaje está relacionado con la pérdida de capacidad de producción y restricciones de uso (Hoyos & Arcila, 2016).

### **2.3 Impactos a la Atmósfera**

La contaminación atmosférica se asocia a la generación de material particulado PM10 Y PM0,5 debido al aumento de gases, polvo y vapores en casi todas las etapas de perforación y excavación, así como por la generación de dióxido de carbono debido a la utilización de maquinaria pesada, vehículos para el transporte del material y del personal (Hoyos & Arcila, 2016), sin embargo, la principal causa de contaminación se debe a las emisiones de mercurio en los procesos de amalgamación que se realizan casi siempre al aire libre, ya que, En su estado elemental, es volátil, lo que propicia su transporte de larga distancia en la atmósfera, por lo que la contaminación ambiental que provoca es un problema grave a nivel mundial. Actividades como la extracción de oro con mercurio metálico han promovido su distribución mundial y han afectado los ecosistemas y la salud humana. (VERBEL, CASTRO, & GALLARDO, 2013).



En cuanto al cianuro, existe principalmente en el aire en forma de gas cianuro de hidrógeno. Una pequeña parte del cianuro en el aire existe en forma de diminutas partículas de polvo. El polvo eventualmente caerá sobre el suelo y el agua. (ATSDR, 2021) El cianuro de hidrógeno gaseoso se acumulará en la atmósfera y puede dar lugar a la formación de otros compuestos, que "tienen consecuencias impredecibles en la atmósfera", como el conocido efecto invernadero y los productos de agotamiento de la capa de ozono emitidos por el dióxido de carbono y los clorofluorocarbonos a lo largo de los años. (CFC)) respectivamente (Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco – Facultad de Ciencias Naturales, 2005).

#### **2.4 Impactos Sociales y a la Salud de los Mineros.**

Si bien en Colombia en las últimas décadas se ha impulsado la producción minera, con cierto grado de contribución a la ocupación y el empleo (Martínez & Aguilar, 2012), Este sector económico también ha provocado fuertes tensiones sociales y ambientales, con poco efecto incremental en el mejoramiento de la economía y menor en la consolidación de los factores de desarrollo de las zonas rurales y marginales del país, por lo que no ha recreado un buen estado. Por el contrario, entre la población local, la existencia o convocatoria de proyectos mineros es la causa de eventos disruptivos del orden público e inestabilidad social comunitaria, y por estrategias en territorios mineros potenciales son introducidos en el tránsito de grupos extrajudiciales, controlando represivamente la libre movilización, secuestro y establecimiento de cupos ilegales para el ingreso de empresas mineras y cupos permanentes en ciertos sectores liderados por estos grupos. (Melo Ascencio, 2016), como lo que sucede en la tierra de una comunidad negra en la provincia de Chocó que está bajo presión de ciertos grupos al margen de la ley que insisten en realizar actividades mineras. Si esta situación entra en conflicto con el



patrón y comportamiento de convivencia pacífica en la comunidad afrocolombiana, esto puede estimular el desplazamiento forzoso de la población (IIAP MinMinas., 2013).

En este sentido, los impactos socioculturales se empiezan a evidenciar en la minería a mediana escala y gran minería. En términos de patrimonio e identidad cultural, debido a la existencia de la población inmigrante, los elementos de la agenda cultural y las creencias religiosas locales han sufrido una fuerte erosión y penetración cultural, la cultura étnica y las referencias patrimoniales se han perturbado y no son reconocidas en la forma de gobierno, pero generalmente son asimilados a la comunidad. La vinculación con el proceso de organización étnica y la formalización de la minería evidencia la fractura de la estructura cultural social y étnica, lo que limita el desarrollo de actividades de liderazgo conjunto y colectivo, no se conocen las actividades de liderazgo local, no se respetan las normas internas y los acuerdos de gobernanza y planes de ordenamiento territorial, y muchas veces incumplen los acuerdos de relación y contribución, para reducir el impacto socioambiental de las áreas estresadas y degradadas por las actividades mineras. En materia de derechos humanos, este es uno de los factores más afectados. Es en la resolución de conflictos (desapariciones, amenazas a líderes, asesinatos, acusaciones ilegales de grupos ilegales, etc.), desconocimiento e ilegalización de las reivindicaciones territoriales nacionales, y falta de respeto a la raza, cultura y derechos ambientales. De igual forma, el impacto en los servicios sociales se refleja en el impacto de la infraestructura, el aumento de problemas insalubres y la inadecuada e ineficaz infraestructura de los sistemas de salud y saneamiento por la propagación de enfermedades tropicales, que aumentan la tasa de deserción escolar en los niños debido a que los padres tienen una gran movilidad y están lejos de las familias nucleares, esto significa que los niños son desatendidos y desacompañados en el proceso de educación y formación. Finalmente, en cuanto a la generación

de empleo, se espera la dependencia ocupacional de los proyectos mineros, la producción de ingresos es indirecta y circunstancial puesto que no se promoverá la cadena productiva con una perspectiva endógena, y no hay condición para la asimilación del sistema formal de empleo introducido. (Ayala Mosquera, Diaz Muegue, & Gómez -Fernández, 2019).

En el ámbito económico, existe un gran superávit y una alta inversión en gastos operativos. Debido a la expectativa de regalías mineras, se están reconstruyendo las condiciones de corto plazo para el enriquecimiento de las entidades territoriales. (Martínez & Aguilar, 2012). Por otro lado, en términos de generación de ingresos se genera un gran superávit, del cual entre el 12% y el 20% se paga a familias numerosas, y sus recursos se consumen en el corto plazo, lo que no puede garantizar la sostenibilidad del mediano plazo, ocasionando flujos de excedentes económicos hacia los centros densamente poblados del interior y proveedores de servicios y suministros mineros que no tienen cimientos sólidos o no están asociados al proceso de construcción comunitaria en la región, no tienen entidades declaradas a nombre del territorio correspondiente y no tienen inversión en la comunidad minera (Ayala Mosquera, Diaz Muegue, & Gómez -Fernández, 2019).

En el mismo contexto, en el panorama socioeconómico que involucra la existencia, gestión e inversión del Estado, la comunidad espera formular soluciones e inversiones para remediar las principales deficiencias de sus servicios públicos y sociales, que se encuentra protegida por los siguientes hechos: desarrollo y comercialización de los materiales y minerales que se obtienen del terreno y se cobrarán por regalías, la misma multiplicación y bendición volverá a su pueblo o región, convirtiéndose en una solución; expectativas que no sucederán en la mayoría de los casos y causarán insatisfacción y exacerbar las dificultades y conflictos con el sector minero (Ayala Mosquera, Diaz Muegue, & Gómez -Fernández, 2019).

Por otra parte, la salud de los mineros se ve gravemente comprometida debido a que gran parte de las minerías pequeñas y artesanales de oro aluvial no cuentan con un servicio sanitario adecuado para sus trabajadores (OMS, 2017), así como tampoco cuentan con sus respectivos programas de higiene, ni de salud y seguridad en el trabajo, a causa de ello, muchos mineros están expuestos a accidentes laborales ocasionados por: quemaduras térmicas y eléctricas, explosiones, derrumbamientos, inundaciones, atrapamientos y atmósferas contaminadas. También, los mineros pueden sufrir de mareos, desmayos, falta de aliento o dificultades respiratorias, palpitaciones y sed excesiva (González, Bonilla, Quintero, Reyes, & Chavarro, 2016).

Adicionalmente, la naturaleza estacional y migratoria de la minería favorece el desarrollo de actividades diferentes a la minería como la venta de sustancias alucinógenas y la prostitución, favoreciendo la propagación de enfermedades de alto riesgo como infecciones de transmisión sexual (ITS), VIH y SIDA (Balanta & Vidal, 2020). Estos problemas se asocian a problemas familiares, económicos y al detrimento social que se presenta en algunas zonas mineras, muchos trabajadores presentan consumo de drogas, alcohol y otro tipo de sustancias farmacodependientes, causando problemas psicosociales en esta población (OMS, 2017).

También se habla que la minería aurífera genera conflictos por el uso del suelo, según un estudio realizado por UPME-UIS (2014), Los resultados muestran que el área de intervención minera se estima en 52.352 hectáreas, lo que significa que se ha intervenido poco menos del 1% del área explotable, lo que representa el 0.05% de la superficie terrestre del país esta área aumentará con el aumento del tiempo de extracción, y aumentará la disposición final de residuos e infraestructura relacionada a medida que aumente el área, incluso para infraestructura fuera de los derechos mineros. Al desarrollar terrenos bajo el método de minería a cielo abierto, los

cambios en el uso del suelo son más prominentes, ya sea el área minera o el área donde se procesan materiales estériles o materiales remanentes en el proceso minero. Los cambios en el uso del suelo también pueden conducir a la fragmentación del ecosistema, por lo que se considera en los estudios de impacto ambiental para gestionar las afectaciones en el entorno. (Ayala Mosquera, Diaz Muegue, & Gómez -Fernández, 2019).

Adicionalmente, debido a los desorbitantes incentivos económicos que esta actividad genera, este negocio es utilizado por narcotraficantes para el lavado de activos según lo reportado por el fiscal Martínez Neira al ministerio de hacienda (Revista portafolio , 2019).

Según el Ministerio de minas y energía, (2019), Se han identificado ocho métodos informales de lavado de dinero en el sistema de mercado legal; crédito por entrada de producto, compra de oro de MS sin registro, registro de todo el grupo familiar como MS, usurpación de grupos de MS, registro de MS, comercialización simultánea en múltiples cooperativas, Utilizando la zona franca para legalización, contrabando y no repatriación.

### **3.2 Riesgos a la Salud Humana por la Exposición a Mercurio o Cianuro.**

Debido a su naturaleza, el mercurio elemental es altamente volátil a la temperatura ambiente (OMS, 2013). Es por ello que durante los procesos de fundición y calcinación de las amalgamas las concentraciones de mercurio que se liberan al aire pueden ocasionar efectos nocivos a la salud de las personas, reduciendo sus expectativas de vida (Bonilla, 2020). Está comprobado que la contaminación por mercurio en seres humanos altamente expuestos como los mineros, incrementa el riesgo de contraer de cáncer de tráquea, de bronquios, de pulmón, de estómago e hígado, además, incrementa el riesgo de padecer otras enfermedades como, la silicosis, enfermedades en la sangre, piel y sistemas musculoso esquelético (Esisler, 2003). Uno

de los síntomas más comunes al inhalar vapor de mercurio son las náuseas, vómitos, dolores de cabeza, fiebre, escalofríos, calambres abdominales y diarrea, los cuales se generan cuando el mercurio alcanza a ingresar a los pulmones (Balanta & Vidal, 2020). En el caso de la ingesta, los síntomas más comunes e inmediatos se reflejan con dolores en el tracto gastrointestinal (OMS, 2013). El mercurio es una sustancia altamente tóxica, incluso, exponerse a bajos niveles de ese metal puede provocar efectos crónicos como gingivostomatitis, fotofobia, temblores y síntomas neuropsiquiátricos como fatiga, insomnio, anorexia, depresión, nerviosismo, irritabilidad y problemas de memoria (Balanta & Vidal, 2020). Otro impacto importante en la salud de los mineros es la denominada "enfermedad de Minamata", que puede provocar graves daños en los nervios, como ataxia, temblor, parestesia, parálisis cerebral, pérdida de visión y audición y enfermedades cardiovasculares. Estas manifestaciones también pueden ocurrir en los hijos de madres que han estado expuestas al metilmercurio, especialmente en las etapas finales del embarazo. Se dice que este contacto puede incluso provocar malformaciones fetales. (Instituto Nacional de Salud, 2012).

Debido a las dificultades de obtener un diagnóstico confiable, muchos médicos suelen confundir los síntomas de la contaminación por mercurio con fiebre, alcoholismo, malaria u otras enfermedades tropicales (Lozada, 2017). En algunos casos, se suele obviar como una causa directa del uso del mercurio en actividades mineras (Balanta & Vidal, 2020).

Gracias a su bajo costo y a la facilidad para extraer el oro, el mercurio es una materia prima eficaz para muchos mineros artesanales o para algunas empresas mineras, sumado a ello, la falta de conocimiento y educación provoca que se ignoren otros métodos igual de eficaces y de bajo costo como la trituración, la molienda y la extracción magnética (Balanta & Vidal, 2020). En algunos casos se incluyen estas técnicas en el proceso de separación del oro, sin embargo, como

los veámos en el primer capítulo, luego de ellas se sigue aplicando mercurio por sus excelentes resultados para separar el oro de las demás sustancias, en este caso, no se hablaría de desconocimiento de técnicas menos contaminantes sino, de implementación de la técnica más eficiente sin importar las consecuencias al medio ambiente o a su propia salud.

Desde otro punto de vista, los mayores problemas de salud humana están relacionados con metilmercurio, que parece ser una amenaza para los sistemas cardiovascular y nervioso, debido a que la presencia del metilo le permite atravesar con facilidad las membranas biológicas, una vez en el interior de la célula se une a grupos tioles o imídicos de las proteínas, lo que facilita su desnaturalización (Castillo F. , 2005). El metilmercurio puede ser absorbido por los organismos acuáticos y bioacumularse, principalmente en los peces y representa más del 90% del Hg total del pescado y marisco. La ingesta semanal tolerable de metilmercurio es de  $1,3\mu\text{g}/\text{kg}$  de peso corporal y de  $4\mu\text{g}/\text{kg}$  de peso corporal para el mercurio inorgánico (Caiza, 2018).

Por otra parte, la utilización de cianuro especialmente después de la aplicación previa de mercurio conlleva a aumentar los impactos negativos, considerando esta sustancia como altamente tóxica. Su contacto directo puede ocasionar diferentes tipos de cáncer, problemas respiratorios, convulsiones, pérdida de conciencia y sofocación (Obiri, Doodoo, Okai-Sam, & Essumang, 2006). Esta sustancia ingresa al cuerpo humano a través de la piel y la exposición a mujeres embarazadas puede causar malformaciones fetales. Además, puede tener efectos fatales y complicaciones como palpitaciones cardíacas, irritación, tensión en el pecho e intoxicaciones. (Pérez, 2011).

Según otros autores, el cianuro interfiere en la respiración humana a nivel celular y puede causar efectos graves y agudos, incluidos respiración rápida, temblores, asfixia y muerte (Lu,

2012). Los efectos crónicos incluyen lesiones neuropatológicas, dificultad respiratoria, dolor en el pecho, náuseas, dolores de cabeza y agrandamiento de la glándula tiroidea (Hinton, Veiga, & Beinhoff, 2003).

La exposición a pequeñas cantidades de cianuro puede ser fatal. La gravedad del efecto depende en parte de la forma del cianuro, como el gas de cianuro de hidrógeno o la sal de cianuro. La exposición a corto plazo a altas concentraciones de cianuro puede dañar el cerebro y el corazón, y puede causar coma y muerte. El cianuro tiene un efecto tóxico a 0.05 miligramos de cianuro (mg / dL) o más por decilitro de sangre, y se han producido casos fatales a 0.3 mg / dL o más (1 decilitro es 1 litro o una décima parte de 100 ml)). Algunas personas que inhalaron 546 ppm de cianuro de hidrógeno murieron después de 10 minutos de exposición, mientras que 110 ppm serían potencialmente mortales después de 1 hora de exposición. Las personas que ingieren una pequeña cantidad de cianuro en un período corto de tiempo pueden morir a menos que reciban un tratamiento inmediato. Uno de los primeros signos de intoxicación por cianuro es dificultad para respirar, respiración profunda y falta de aire, seguidos de convulsiones y pérdida del conocimiento. Estos síntomas aparecerán rápidamente, dependiendo de la cantidad de cianuro ingerida. Ya sea comiendo, bebiendo o inhalando cianuro, el efecto de un mayor contenido de cianuro es similar. El cianuro ingresa al cuerpo humano lentamente a través de la piel. El contacto de la piel con cianuro de hidrógeno o sales de cianuro puede causar irritación y úlceras. Algunos trabajadores que han inhalado tan solo 6 a 10 ppm de cianuro de hidrógeno durante muchos años experimentan dificultad para respirar, dolor de pecho, vómitos, trastornos sanguíneos, dolores de cabeza y bocio. (ATSDR, 2021)

### Capítulo III

#### 3.1 Tecnologías y Métodos para la Producción más Limpia en la Minería Aurífera.

El avance tecnológico y la investigación han permitido establecer e implementar técnicas de producción más limpia (PML), en donde, se mejoran los procesos existentes durante cada una de las etapas de un proceso, con el objetivo de reducir al mínimo los impactos que se generan en cada una de ellas; se define entonces, PML es como la aplicación de estrategias ambientales, de prevención e integrales a los procesos de producción, productos y servicios para mejorar la eficiencia global y reducir los riesgos humanos y ambientales. PML se puede utilizar para procesos, productos y diferentes servicios prestados a la sociedad en cualquier industria. La ventaja de la implementación de PML es que, en la mayoría de los casos, requieren una pequeña cantidad de inversión y brindan beneficios económicos, ambientales y sociales a las personas que las aplican. Desde esta perspectiva, la propuesta resultó ser un aporte importante para resolver los problemas ambientales de la minería. Sin embargo, como subrayaron los investigadores, la implantación de esta tecnología tiene en cuenta una serie de medidas técnicas, que deben complementarse con acciones de formación y sensibilización de operadores y gestores, estas medidas deben incluirse en la asistencia técnica. Es por ello que la introducción de tecnologías limpias debe ser integral e involucrar al personal directamente relevante. El éxito de tales medidas depende del nivel de compromiso del máximo representante de la empresa. (Carrillo, Zenteno, & Celís, 2010).

En este sentido, Si los mineros adoptan acciones de producción más limpia y procesos productivos orientados a la mejora continua, mediante el control y uso racional de materias primas y energía, para gestionar mejor o eliminar algunas sustancias tóxicas, reducir las



emisiones contaminantes y el volumen de residuos, serán compensados no solo por incrementar su producción, sino también aumentar sus ingresos, lo que les permitirá mejorar su calidad de vida, y la comunidad también se beneficiará de mejores condiciones ambientales. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2007).

### **3.1.1 Producción más Limpia en Procesos de Minería Aurífera.**

La transición a un proceso de PML inicia con una serie de acciones encaminadas a mitigar, reducir y compensar los impactos ambientales generados en cada una de las fases que se llevan a cabo en la minería aurífera. Diferentes autores han puesto a disposición mucha información sobre estas acciones, por ejemplo, en las etapas de extracción y explotación del material, según la Unidad de Planeación Minero Energética del ministerio de minas y energía de Colombia (2007), se recomienda, tanto en la minería de aluvión como de filón, ya sea, subterráneo o a cielo abierto rellenar las excavaciones realizadas con los estériles o sobrantes de los procesos finales de recuperación del oro, siempre y cuando éstos se encuentren libre de mercurio, cianuro o cualquier otra sustancia tóxica que pueda causar daño al suelo o a las aguas subterráneas y así, evitar la compra de material de relleno para estas áreas socavadas, si es que se compra, ya que la mayoría de estos socavones quedan abiertos. De igual manera, se requiere un plan minero que permita el diseño de métodos mineros y sistemas de drenaje, iluminación, ventilación, transporte y preparación adecuada para la minería para lograr una mayor eficiencia productiva y así evitar altas pérdidas minerales por desconocimiento de las características de los depósitos minerales. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2007).

**3.1.1.1 Mejoras en el Proceso de Beneficio Aurífero.** En cuanto al beneficio del material, es la etapa donde se deben aplicar los mayores esfuerzos debido a la utilización de mercurio y cianuro como elementos principales para separar el oro. Se mostrarán a continuación diferentes técnicas e implementos que pueden ser utilizados en cada etapa del beneficio de oro para mejorar su eficiencia y disminuir los impactos negativos al ambiente y a la salud humana.

Trituración y Molienda. para la trituración se recomienda trituradoras de mandíbulas y trituradoras de cono y para la molienda molinos o tambores de bolas (González L. C., 2017). Adicionalmente, A diferencia del circuito abierto, el molino tiene la ventaja de evitar la pérdida de mercurio de metal molido (polvo de mercurio) durante el proceso de fusión. La carga combinada y consecuentemente contaminada es mucho menor (Unidad de Planeación Minero Energética, 2007).

La UPME (2007), Se recomienda liberar el oro sin una molienda excesiva. Este hecho también se aplica al sulfuro de oro, porque una molienda excesiva triturará el oro demasiado fino y producirá partículas o escamas ultrafinas, que no solo reducirán la tasa de recuperación y, por lo tanto, afectarán negativamente el proceso de separación también aumenta el consumo de energía durante el proceso de trituración, lo que en algunos casos puede significar hasta un 50% del costo de procesamiento. Por otro lado, el enfoque ideal es no usar mercurio en el proceso de trituración, sino usarlo en un circuito cerrado para lograr una mayor eficiencia de reciclaje y evitar muchos problemas ambientales causados por el uso de mercurio para reducir el impacto de la amalgama en un ambiente oxidante, se puede agregar cal al agua ácida de manera cuantitativa. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2007).

**Concentración Gravimétrica.** se han desarrollado bastantes métodos en los últimos años para la realización del proceso de concentración gravimétrica de manera más eficiente, dentro de los

mejores se encuentran; La trampa laberíntica se utiliza para recuperar materiales pesados a la salida del proceso de molienda, incluidos oro, mercurio y amalgama. Este tipo de trampa consiste en una caja metálica construida en una fina lámina con dos o tres placas guía para cambiar la dirección del material entrante y hacer que las partículas más pesadas se asienten en el fondo de la trampa. Su diseño no permite su atasco ni la descarga de los materiales más pesados (como mercurio y oro); sin embargo, este tipo de trampa no es apta para grandes caudales, por lo que se están realizando pruebas para mejorar su eficiencia y aumentar el tiempo de mantenimiento. Por otro lado, en diferentes regiones del país, la implementación de esta trampa ha mostrado resultados satisfactorios en términos de recuperación de oro, lo que se relaciona con su bajo costo y fácil fabricación. De manera similar, se pueden implementar trampas en forma de cono. A diferencia de las trampas de laberinto, se puede utilizar en procesos de beneficio de alto flujo de agua o minería media para reducir el tiempo de obstrucción y mantenimiento; además, las pruebas realizadas por consultores de GTZ muestran que el oro, la amalgama, Las tasas de recuperación de mercurio e incluso concentrado son más altas. Básicamente, la trampa es un cono invertido con entrada de agua y relleno (arena, minerales, mercurio, amalgama, oro) y salida de agua y cola en la parte superior. En la parte inferior, tiene una entrada para agua a presión y un desagüe para material sedimentado. El agua del molino y / o zanja de drenaje cae por la tubería de entrada, y las partículas contenidas en el mismo tienden a depositarse en la parte inferior de la trampa; sin embargo, entra el reflujó con mayor velocidad del agua presurizada de su parte inferior, creando turbulencia y provocando la precipitación de partículas pesadas y / o más gruesas, lodos y partículas ligeras se arrastran hacia arriba y se descargan en la tubería de salida superior. Cada vez que un minero necesite metal, el concentrado se descargará a través de la tubería de limpieza. (Ministerio del Medio Ambiente, et al., 2003).

Otras tecnologías para la separación gravimétrica incluyen los hidroseparadores que permiten recuperar eficientemente la amalgama del concentrado de arenas negras y piritas después de la amalgamación del oro en un proceso rápido y seguro, no necesita motor, pero si agua a presión y por lo menos a 5 m de altura y es de bajo costo. Asimismo, se puede utilizar una mesa vibratoria. Entre sus ventajas se encuentran: descarga continua de productos, acceso a una gama completa de productos (concentrados, mezcla, cola), comportamiento visible de los materiales sobre el tablero, gran flexibilidad, manipulación y supervisión relativamente sencillas, Posibilidad de recuperar valiosos minerales acompañantes, buena tasa de recuperación y alto índice de enriquecimiento, incluso para minerales de grano fino, el agua y la energía rara vez se utilizan, pero hay algunas deficiencias; requiere atención continua y hay concentrados robados Peligro. Además, esta tabla se puede utilizar para mineral de oro filoniano (veta), utilizado para recuperar oro fino liberado y pirita / sulfuro múltiple como carga total o subproductos comerciales de concentrado obtenido de otros equipos de pesaje, tales como desagües o / y espiral (Unidad de Planeación Minero Energética, 2007).

Además, se puede usar una placa de amalgama, pero en lugar de zinc se agrega una capa de plata aplicada electrolíticamente, donde el oro migra al fondo de la pulpa, donde entra en contacto con el mercurio y es capturado para formar una amalgama. -También se puede recuperar oro granulado, después de gofrado o triturado. Por su parte, los equipos de separación Jig, presentan una efectividad del 85% para separar metales pesados, por lo que se esperaría una recuperación casi del total del mineral precioso después del proceso de jigging o cribado (Prado, 2017). Según la UPME, En el proceso primario, se puede instalar una máquina guía inmediatamente después del molino primario para recuperar oro grueso, oro en capas o esponjoso y los sulfuros gruesos liberados para evitar que regresen al molino innecesariamente en un

circuito cerrado para evitar que el oro continúe rodando. La máquina de jig es un tipo de equipo multifuncional, puede adaptarse a varios materiales, recupera oro y sulfuro de oro, no requiere electricidad, es eficaz para el laminado de oro, produce concentrado rico, tiene productos de emisión continua; sin embargo, Jig necesita personal experimentado y no puede recuperar oro muy fino.

Según, Medina, Hruschka, & Canales (2008), el concentrador de espiral se utiliza principalmente para la preconcentración de materiales auríferos, tanto primarios como secundarios. Otro uso es, para recuperar el oro y las piritas auríferas todavía existentes en las colas de los ingenios primarios ("scavenger"). De esta forma, la plusvalía se puede recuperar en la mayor medida posible, y también se evita la contaminación ambiental causada por la pirita. Por lo demás, los relaves descalcificados (sin partículas finas) se pueden mantener en el tanque de sedimentación y el agua fangosa se puede tratar en el tanque de sedimentación (con o sin floculantes según corresponda) para evitar la contaminación del río. En caso de escasez de agua, se puede reciclar. El uso de espirales en pequeñas minas aluviales está limitado por la dificultad de clasificar grandes volúmenes de carga en  $<2$  mm. Los modelos modernos tienen diseños de bobinas relativamente simples (como Reichert LG 7). Estas bobinas han ido superando gradualmente los tipos más antiguos de bobinas más complejas (bobinas Humphrey o Reichert WW6), con suministro de agua de lavado y corte concentrado en diferentes puntos. Al final de la espiral moderna, el cortador divide el producto en cuatro partes diferentes: concentrado, mezcla, pegamento y agua. Existen tipos específicos de bobinas para la limpieza posterior de concentrados concentrados o cargas con alto contenido de minerales pesados (las bobinas de grado medio y alto tienen más exportaciones de concentrado, pero rara vez se utilizan para el procesamiento de oro).



Por otra parte, la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín desarrollo un método bastante prometedor que permite mejorar la eficiencia en las técnicas gravitacionales. El método tradicional consiste en la separación de dos o más sustancias de diferente peso específico o densidad, la cual es originada por el movimiento relativo de las fuerzas gravitacionales, fuerzas de arrastre y empuje, para una concentración gravitacional eficiente es necesario considerar una buena liberación de partículas, la distribución de tamaños en la alimentación, la forma de las partículas y esencialmente las diferencias de densidad de los sólidos a separar, la concentración gravimétrica es una manera sencilla, que posee una alta capacidad de procesar material, es de bajo costo y presenta una eficiencia relativamente alta para separar minerales pesados valiosos del material que no presenta ningún valor económico, lo cual demuestra por que se usa ampliamente en la minería aurífera, generalmente en la minería de aluvión (Bustamante, Javiria, & Restrepo, 2005) sin embargo, posterior a esta técnica tiende a utilizarse el proceso de amalgamación con mercurio y cianuro, procesos altamente contaminantes, por esta razón se ha investigado más a fondo sobre el mejoramiento de esta técnica. En este sentido, La Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) y la Gobernación de Antioquia presentaron una planta piloto para la extracción de oro sin el uso de mercurio la cual, se fundamenta en la separación gravitacional, en donde, se esperaría una eficiencia mínima del 95% que comparada a la del mercurio (45%), es mucho más eficiente y limpia. Esta técnica se puede realizar con los métodos tradicionales como bateo o mesas vibratorias, La diferencia es que en lugar de agregar agua y reactivos, se agrega una sustancia biológica cuya composición permite capturar el oro libre, generalmente con mercurio, además de encapsularlo anteriormente este proceso solo se podía hacer por disolución con cianuro. A través de esta tecnología, se espera que los mineros obtengan mejores beneficios económicos y reduzcan significativamente el impacto sobre el medio ambiente y la salud

humana. (El Tiempo, 2016). Actualmente, esta técnica aun no es usada, sin embargo, se espera

*"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"*



que pronto pueda ser utilizada (CORANTIOQUIA, Centro Nacional de Producción Más Limpia , 2016).

Otra técnica bastante eficaz implica la implementación de un sistema de flotación, que se define como un método fisicoquímico de concentración o separación de partículas. La diferencia en las características superficiales de las partículas en una suspensión acuosa se utiliza para combinar la hidrofobicidad (independiente del agua) con la hidrofobicidad para separar partículas (relacionadas con el agua), asistidas por la inyección de burbujas (Bustamante, Gaviria y Restrepo, 2005). Con este método se recupera el oro libre presente tanto en depósitos aluviales como en filonianos (vetas), eliminando el uso del mercurio y aumentando el porcentaje de recuperación, ya que es más selectiva y amigable con el medio ambiente. En la flotación se concentra el mineral, el cual pasa a la etapa final donde se recupera el oro que se encuentra asociado con otros metales en el proceso de cianuración (CORANTIOQUIA, Centro Nacional de Producción Más Limpia , 2016). En el caso de la flotación por espuma, en el proceso de separación se utilizan las diferentes propiedades físicas y químicas de la superficie mineral: algunos minerales de la pulpa de grano fino se hacen hidrófobos mediante la adición de reactivos (colectores, activadores). El aire inyectado en el tanque (tanque de flotación) que contiene la pulpa trae las partículas hidrofóbicas a la superficie, donde flotan en forma de espuma y luego son retiradas. Debido a los cambios en el pH de la pulpa y los reactivos agregados, se pueden recuperar selectivamente diferentes minerales. La flotación rara vez se usa en la extracción de oro para recuperar solo oro libre, y más a menudo se usa para recuperar sulfuro de oro y oro libre ("flotación a granel"). Existen diferentes tipos de celdas de flotación en uso, en las que se combina la agitación de la pulpa y su aireamiento. En algunos casos, se ha probado la flotación para separar el oro libre de los concentrados de sulfuro en lugar de la amalgama. Esto solo se

aplica a partículas de tamaño limitado, porque el oro más grueso, de acuerdo con su masa, no flotará tan fácilmente. También es difícil hacer flotar partículas ultrafinas. Sin embargo, con el tamaño de partícula apropiado (aproximadamente de 100 a 20  $\mu\text{m}$ ), la separación de oro y sulfuro es factible. El uso de la flotación conlleva otros problemas ambientales, pues se utilizan diversos reactivos, especialmente cal, para ajustar el pH, colectores (xantatos), agentes espumantes, etc., como en el caso de la flotación selectiva de oro. Durante el proceso de flotación, el skimmer ayuda a crear las condiciones ideales de dinámica de fluidos (como el tamaño de la burbuja y la tasa de retención de gas) necesarias para la lechada en la celda de flotación. La espuma que producen es lo suficientemente estable como para mantener los minerales recolectados en la parte superior de la pulpa, moverse lo suficiente para eliminarlos y descomponerse rápidamente para facilitar las operaciones posteriores. Estas características juegan un papel importante en la viabilidad cinética del proceso de flotación y el grado general alcanzable y la tasa de recuperación de la celda de flotación o circuito de flotación. (ArrMaz, 2020). Por lo general, las minas pequeñas no tienen el conocimiento o los fondos de inversión necesarios para controlar de manera efectiva estos reactivos y luego descargarlos en los ríos. Además, debido a sus complejas operaciones (control de pH, dosificación de reactivo, tiempo de ajuste, etc.), el proceso de flotación requiere un cierto grado de conocimiento técnico, lo cual es poco común en los pequeños mineros. Por lo tanto, el uso de la flotación se limita (con algunas excepciones) a la minería industrial. (Medina, Hruschka, & Canales, 2008).

**Procesamiento y refinación.** Durante el proceso de función generalmente se realiza la quema de la amalgama al aire libre, en estos casos se han diseñado las retortas o los extractores que permitan capturar el mercurio para evitar que se libere a la atmósfera. Actualmente, existen algunos modelos sencillos y económicos que pueden reducir las emisiones entre un 75% y un

95%. El reciclaje de mercurio reduce las compras nuevas, por lo que al reducir el consumo de mercurio, se reduce el costo de los mineros y las tiendas de oro. La captura y recuperación de mercurio es un primer paso eficaz hacia un proceso sin mercurio. En el caso de un destilador, la amalgama se calienta en una parte, mientras que el vapor de mercurio se enfría y se condensa en la otra parte, lo que permite reutilizar el mercurio. Por su parte, el calentador está diseñado con un sistema de captura de mercurio para reducir las emisiones y los riesgos de exposición. Los extractores de aire asequibles y bien diseñados pueden capturar hasta el 80% de las emisiones. Los sistemas muy complejos pueden capturar más, aunque son más caros y más complicados de procesar. Por último, el mercurio recuperado debe manipularse con cuidado para evitar la contaminación y la exposición. Asimismo, debe recogerse y guardarse en un lugar seguro. El método de almacenamiento correcto es sellarlo en un recipiente de vidrio, acero o plástico y luego sumergirlo en agua para evitar la evaporación. (Telmer & Stapper, 2012).

Cuando se reutiliza, el mercurio se contaminará con otras sustancias u óxidos, por lo que el efecto de la amalgama es deficiente; consulte la figura a continuación. El Dr. Freddy Pantoja (Colombia) ha desarrollado un método para limpiar y activar el mercurio, que utiliza una solución que contiene sal y baterías para limpiar y “activar” el mercurio. El producto incorpora oro de manera efectiva, lo que reduce el consumo y evita que los mineros arrojen mercurio usado al medio ambiente (Telmer & Stapper, 2012).

**Manejo de colas contaminadas.** Los relaves contaminados se pueden limpiar para recuperar el mercurio, pero los métodos existentes son complicados, costosos y de eficacia limitada. Por ello, en la mayoría de los casos lo más adecuado y recomendado para la pequeña minería es la acumulación en depósitos minerales adecuados, es necesario evitar el contacto con las aguas subterráneas y utilizar materiales como arcilla, bentonita o caolín para construir

cimientos y muros impermeables. Si es posible, se recomienda utilizar un material con alto contenido de hidróxido ferroso (la limonita está presente en suelos de arcilla roja) por su alta capacidad de absorción de mercurio, o utilizar plásticos gruesos como el polietileno de alta densidad. Cuando se combinan los dos materiales, se puede obtener una mayor seguridad y el tanque de agua debe protegerse de la lluvia y el viento. Otra medida de protección podría ser cubrir los relaves contaminados con unos centímetros de pirita no contaminada bajo una capa de material impermeable (arcilla, etc.). El ambiente anaeróbico promueve la estabilización del mercurio en forma de cinabrio (HgS), que es insoluble y tiene poca toxicidad. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2007).

Por otra parte, el primer paso para evitar colas contaminadas con cianuro es prevenir la formación de compuestos de cianuro en el proceso de cianuración. Después de que el oro se extrae mediante un proceso hidrometalúrgico, puede haber tres tipos principales de cianuro en las aguas residuales o en la solución de proceso: cianuro libre, cianuro de complejo débil y cianuro de complejo fuerte. Estos tres cianuros juntos constituyen "cianuro total". Al comprender el comportamiento de estos tres cianuros, puede comprender la seguridad y la protección ambiental. La solución de cianuro para lixiviar metales preciosos generalmente se prepara con cianuro de calcio (CaCN) o cianuro de sodio disponibles comercialmente. La estabilidad de estas soluciones depende de su pH. Debido a la formación de HCN, un pH más bajo es beneficioso para la pérdida de cianuro. Al medir el valor del pH y controlarlo se puede saber qué forma de cianuro es dominante en la solución, evitando así la formación de compuestos no deseados, la pérdida de cianuro y la no formación de compuestos de oro. (CORANTIOQUIA, Centro Nacional de Producción Más Limpia , 2016).

**Tratamiento de residuos, vertimientos y emisiones cianuradas.** Aunque el cianuro se



considera como altamente tóxico, también es un compuesto biodegradable que puede tratarse por diferentes métodos para su eliminación o reducción a formas menos contaminantes (Solís & Alfredo, 2011). En este sentido, para el tratamiento de cianuro en efluentes sólidos se propone lavar las arenas y posteriormente tratar la solución de lavado de igual forma que los efluentes líquidos, esto con el fin de evitar consumos excesivos de reactivos (CORANTIOQUIA, Centro Nacional de Producción Más Limpia, 2016).

Existen actualmente, procesos para la recuperación de cianuro como el denominado AVR (Acidificación/Volatilización/Reutilización) y procesos de destrucción, dentro de los más usados y eficientes se encuentran los métodos de degradación natural como la biodegradación, volatilización y degradación solar biológica, procesos de oxidación como el SO<sub>2</sub>/Air y el tratamiento con peróxido de hidrógeno.

***Procesos de Recuperación de Cianuro.*** Este método puede recuperar cianuro, minimizando así la cantidad total de cianuro utilizado, así como la concentración de reactivos en la solución residual y reduciendo el costo operativo de la mina. El proceso básico consta de tres pasos: control del pH, volatilización en condiciones muy controladas y captura del cianuro liberado. En la actualidad, se adelantan estudios e investigaciones para la recuperación del cianuro y se han desarrollado métodos como el denominado Cyanisorb, para el tratamiento de lodos o el proceso Cyanosave, que utiliza perlas de poliestireno llamadas Vitrokele permite la separación de los complejos de cianuro de la solución y posterior absorción de los mismos. De igual forma, la mejora de este método se puede aplicar a la solución o lodo para recuperar cianuro y metales. Los reactivos recuperados se reciclan para su uso en plantas de recuperación de oro. Sin embargo, aunque se han documentado ensayos exitosos de este proceso en minas de Canadá,



Australia y Estados Unidos, todavía no existen plantas comerciales y las investigaciones continúan. (Fernandez, 2007).

Uno de los métodos más empleados para la recuperación del cianuro es el proceso AVR (Acidificación/Volatilización/Reutilización) empleado para tratar los complejos cianurados en los efluentes (Fernandez, 2007). Según Aguirre (2013), Este método se utiliza no solo para eliminar el cianuro de los efluentes líquidos, sino también para recuperar y reciclar el cianuro. El proceso de regeneración de acidificación-volatilización (AVR) implica el uso de ácido sulfúrico para bajar el pH de la solución y promover la formación de ácido cianhídrico. Una vez que el ácido cianhídrico es gaseoso, será absorbido en la solución de hidróxido de sodio a contracorriente. Durante todo el proceso, tome precauciones extremas para asegurarse de que el pH de la solución esté siempre en el rango alcalino para evitar que el ácido cianhídrico se escape a la atmósfera. El cianuro de sodio formado de acuerdo con la reacción se puede reciclar al proceso de lixiviación, lo que tiene un impacto positivo en la economía del proceso de cianuración. (Fernandez, 2007). El proceso implica la acidificación mediante el uso de ácido sulfúrico hasta alcanzar un valor de pH de 1 a 2. Una vez acidificada la muestra, es posible convertir el CN<sup>-</sup> en ácido cianhídrico (HCN), que es el ácido cianhídrico obtenido en el paso anterior. La presión de vapor y la temperatura se volatilizan hacia el lecho de neutralización Finalmente, el ácido cianhídrico volatilizado se absorbe en la solución de NaOH para su neutralización y se convierte en cianuro de sodio, que es una sal inorgánica estable. El cianuro de sodio formado se puede reciclar en el proceso de cianuración, lo que se refleja en el uso de este recurso para reducir el costo de la industria de refinación de oro. (Almeida, 2015).

Las ventajas de este proceso incluyen una alta recuperación de cianuro, reactivos reciclables y costos operativos reducidos. Además, evita los problemas de toxicidad en la solución residual provocados por los productos de oxidación del cianuro (cianato, tiocianato y cloramina). (Villar,

2013), Sin embargo, su mayor limitación radica en su alta complejidad, ya que requiere equipos muy grandes, requiere un control continuo y además implica riesgos potenciales, como las fugas. Esto es particularmente sutil porque afectará a los trabajadores y al medio ambiente si no se maneja adecuadamente (Jimenez, 2015). Además, implica la operación de grandes cantidades de ácido cianhídrico, que es la más letal de todas las especies de cianuro. Por otro lado, es imposible probar que la calidad de las aguas residuales tratadas sea suficiente para la descarga directa. (Fernandez, 2007).

**Proceso de destrucción a eliminación de cianuro.** El proceso de destrucción de cianuro se ha convertido en el proceso más utilizado en la actualidad debido a su nivel de eficiencia. Existen varios tratamientos químicos para eliminar este cianuro, todos los cuales se basan en la oxidación del cianuro a cianato, que es 10.000 veces menos tóxico y luego puede descomponerse en dióxido de carbono y nitrógeno. (Fernandez, 2007).

**Degradación natural:** Los procesos de degradación natural reducen la toxicidad de los compuestos cianurados a lo largo del tiempo. Mark, et al., (2001), Se cree que los principales mecanismos naturales de degradación son la volatilización en fase vapor, la oxidación natural, la adsorción en superficies minerales, las reacciones de hidrólisis, la biodegradación (bacterias) y la precipitación de compuestos insolubles, sin embargo, aunque todos estos procesos son efectivos, son demasiado cinéticos. Una desventaja que es lenta y no puede considerarse útil a nivel industrial. También dependen de la ubicación geográfica de la instalación, porque este parámetro determina las condiciones climáticas en las que se produce la degradación. Las principales ventajas del proceso de degradación natural son los bajos costos de capital y de operación, no se forman productos tóxicos y se puede utilizar como pretratamiento. (Linares, 2008).

**Procesos de Oxidación.** Dentro de los procesos de oxidación química más conocidos para el tratamiento de cianuro se encuentran el método SO<sub>2</sub>/Air, el proceso de tratamiento con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el proceso con ácido Caro.

La empresa INCO, en Canadá desarrolló un método para el tratamiento de los relaves que contengan cianuro, este método es usado mundialmente y se denomina como SO<sub>2</sub>/Air, es una tecnología que no está patentada y no requiere permiso o licencia para su utilización. Para su aplicación se utiliza un tanque agitado en el que se agrega SO<sub>2</sub> (en líquido, como metabisulfito o en forma de gas) con aire para trabajar con el cianuro que queda en cualquier tipo de relaves totales y el agua reciclada de un área de embalse. También debe estar presente una cantidad muy pequeña de cobre soluble para que sirva como catalizador. El proceso ofrece una operación continua de una sola etapa. A pesar de ser un proceso simple, la optimización es diferente para cada relave de cianuro probado. El agente oxidante consiste en aire u oxígeno líquido para el O más SO en forma gaseosa o líquida. Otros reactivos normalmente incluyen CuSO y cal o NaOH para el control del pH. El oxígeno mediante burbujeo de aire y los reactivos se dispersan en el efluente usando un mezclador bien agitado. Los tiempos de retención son variables, dependiendo de la composición de la solución a tratar, pero generalmente oscilan entre 20 minutos y 2 horas (Michaud, 2016). Dentro de las ventajas de este método se incluyen; la reacción reduce el pH de las suspensiones de las minas de oro hacia el pH óptimo del proceso sin la adición de ácido, los niveles de cianuro son típicamente reducidos a menos de 1ppm (remoción del 99,99% con tiempos de retención entre 50 y 100 minutos) y los iones metálicos son normalmente removidos a menos de 1ppm y son también reportados bajos niveles de arsénico (CORANTIOQUIA, Centro Nacional de Producción Más Limpia , 2016).

Otro método que puede ser usado es tratamiento con peróxido de hidrogeno, el cual, es un



proceso similar al SO<sub>2</sub>/Air, solo que en vez de aire y dióxido de azufre se utiliza peróxido de hidrogeno y también se utiliza cobre como catalizador para obtener como producto final el cianato, El proceso de peróxido de hidrógeno es eficaz para el tratamiento de soluciones para la oxidación de cianuros libres y WAD, y los cianuros de hierro se eliminan mediante la precipitación de complejos insolubles de cobre-hierro-cianuro. El uso teórico de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en el proceso es 1,31 gramos de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por gramo de CN oxidado, pero en la práctica el uso real varía de aproximadamente 2,0 a 8,0 gramos de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por gramo de CN oxidado. El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> utilizado en el proceso se proporciona típicamente como un líquido al 50% de concentración. La reacción se lleva a cabo típicamente a un pH de aproximadamente 9,0 a 9,5 para una eliminación óptima de cianuro y metales tales como cobre, níquel y zinc. Sin embargo, si el cianuro de hierro también debe eliminarse a niveles bajos, entonces el pH se reduce un poco para aumentar la precipitación de cianuros de cobre-hierro a expensas de reducir las eficiencias de eliminación de cobre, níquel y zinc. Como se indica, se requiere cobre (Cu<sup>2+</sup>) como catalizador soluble. Este proceso es capaz de lograr niveles bajos tanto de cianuro como de metales. Las soluciones tratadas con este proceso pueden ser de calidad adecuada para permitir su descarga. El costo del peróxido de hidrógeno es alto (Michaud, 2016). Dentro de las ventajas d este método se incluyen; El costo de capital es igual o menor que el de otros procesos de tratamiento químico. El diseño y la operación del proceso son relativamente simples. Todas las formas de cianuro, incluidos los complejos que contienen hierro y metales pesados, pueden reducirse a un contenido ambientalmente aceptable y reducirse significativamente mediante la precipitación. Esta acción es adecuada para operaciones de procesamiento continuo y por lotes. Los procedimientos se han utilizado para el tratamiento de pulpa, solución de proceso de clarificación y solución de lavado de lixiviación en pilas. Además se ha demostrado ser efectivo en laboratorios, dispositivos experimentales y operaciones a escala industrial. El valor de pH se ajusta muy rigurosamente sin automatización, pero se recomienda

optimizarlo, estos procesos no producen una gran cantidad de lodos residuales, no introduce una gran cantidad de sólidos disueltos y no requiere fertilización. Además, este método también tiene las desventajas del alto costo de los reactivos de sulfato de cobre y peróxido de hidrógeno, y no elimina el amoníaco ni el tiocianato. Si la concentración de amoníaco, tiocianato y metal en las aguas residuales excede la concentración ambientalmente aceptable, puede ser necesario para realizar un tratamiento complementario. (Campos, 2013).

Por sí solo, debido a sus ventajas, el tratamiento con caroácido puede utilizarse como alternativa a otros métodos de oxidación. Actualmente se utiliza en algunas fábricas de Estados Unidos, reemplazando el método anterior. El ácido caro es una solución de  $H_2SO_5$  (ácido persulfúrico) que se prepara mezclando altas concentraciones de  $H_2SO_4$  (mínimo 95%) con  $H_2O_2$  (concentración de 50-60%). De acuerdo a lo establecido en la patente (Solvay / Peróxidos), los reactivos son generados de manera continua por un generador compacto adecuado según las necesidades del dispositivo, debido a que debe ser agregado al tanque de tratamiento inmediatamente para el proceso de oxidación. La reacción es casi instantánea y muy exotérmica, obteniendo una solución caliente (110-120 °C) a la salida. En comparación con otros oxidantes (incluido el  $H_2O_2$ ), el ácido de Caro tiene una alta tasa de oxidación y no requiere la adición de catalizadores. Es muy eficaz, ya sea en una solución clara o en un lodo, como el  $H_2O_2$ , el cianato formado se hidroliza Generación espontánea de carbonato y amonio y residuos de  $H_2SO_5$  que pueden permanecer en solución. El ácido caro, a diferencia del  $H_2O_2$ , puede oxidar el tiocianato. Esto constituye una ventaja particularmente importante para el reciclado del efluente tratado que será devuelto al lecho biológico para tratar el mineral a base de azufre. También mejora la precipitación de metales pesados al eliminar los complejos SCN (Fernandez, 2007).

Adicionalmente, se utilizan métodos de oxidación química como el tratamiento con UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, el tratamiento con ozono (O<sub>3</sub>) y el tratamiento por cloración.

### ***3.1.2 Técnicas Biológicas Para el Beneficio de Oro.***

**Oro Verde.** En el Departamento de Choco se desarrolló el concepto de “Oro Verde”, el cual se refiere a la separación del oro sin la utilización de sustancias tóxicas como el mercurio en los procesos de amalgamación, a su vez, se utilizan diferentes especies de hojas de árboles dentro de los que se encuentra la especie *Ochroma pyramidale* conocida como Balso y la especie *Hibiscus furcellatus* conocida como Malva (Brooks, Giraldo, & Palacios, 2015). Esta técnica es de origen africana y se implementa de forma tradicional en las comunidades afrocolombianas (Sánchez, 2018).

Según Brooks, Giraldo, & Palacios, (2015), el método consiste en formar una pasta espumosa producto de la trituración y la mezcla de las hojas con agua, este líquido posteriormente, se aplica al concentrado de oro generalmente en una batea como sustituto del mercurio, posteriormente, los granos finos de oro se precipitan gracias a que el extracto de las hojas rompe la tensión con el agua permitiendo una separación por el tipo de densidad de los minerales presentes, en cuyo caso, los más livianos flotan fuera del recipiente. Actualmente, este método solo se ha implementado en la separación a pequeña escala obteniendo resultados bastante favorables, sin embargo, los estudios sobre esta técnica son limitados y no se pudo establecer concretamente el grado de eficiencia, sin embargo, diferentes autores afirman que especies del género *Malachra* y *Matisa* poseen propiedades efectivas para la separación del oro, así como para la biorremediación de suelos contaminados con mercurio (Vidal, 2009).



Este método fue aprobado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el premio SEED fue otorgado con el apoyo de la Unión Internacional de la Naturaleza (UICN) y los gobiernos de los Países Bajos, Noruega, Alemania e India reconocen la importancia del proyecto "Oro Verde" para proteger los recursos naturales mediante la implementación de esta tecnología ancestral (Sánchez, 2018).

**Biolixivación.** La utilización de organismos cianogénicos en la industria minera busca sustituir la lixiviación con cianuro que se hace de forma tradicional, si bien, se conoce que estos organismos también generan cianuro, lo hacen de naturaleza volátil y que puede reducirse fácilmente en presencia de sales y otros compuestos presentes en el medio de crecimiento (Ilyas & Lee, 2018). Los aislados microbianos más comúnmente estudiados son *Chromobacterium violaceum* y *Pseudomonas fluorescens*; sin embargo, se han identificado diferentes microorganismos con esta capacidad. Se ha adoptado la biolixivación de oro utilizando *Chromobacterium violaceum* y *Pseudomonas fluorescens*. (Pham & Ting, 2009) En el estudio de recuperación de oro en residuos electrónicos con una eficiencia de hasta el 80% en condiciones de laboratorio, se concluyó que la eficiencia depende de variables como tipo de mineral, contenido de oro y tamaño de partícula en el yacimiento, etc. (Sánchez, 2018).

**Biooxidación.** Algunos organismos como los *Lysinibacillus sphaericus*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Ferroplasma acidiphilum* y *Acidithiobacillus ferrooxidans* poseen propiedades para oxidar los minerales de sulfuro que conforma el mineral aurífero como, por ejemplo, la pirita o arsenopirita, de manera que el hierro y azufre elemental formen sulfatos metálicos solubles y posteriormente produzcan ácido sulfúrico (Ilyas & Lee, 2018). De esta manera, el oro presente en esta forma queda libre y puede ser recuperado por métodos de concentración (Cortón & Saavedra, 2014).



La biooxidación como tecnología complementaria se ha aplicado comercialmente con éxito para reducir el alto consumo de lixiviados en diferentes minas alrededor del mundo: Harbour Lights Mine (Australia), Fairview Mine (Sudáfrica), Sao Bento (Brasil), The Newmont Gold Company (Estados Unidos). (Ilyas & Lee, 2018).

Un estudio reciente realizado por Bustos, Dussán e Ibarra (2018) confirmó la capacidad de absorción de oro de dos cepas de *Lysinna sphaericus* aisladas de una mina de oro aluvial en Bagre (Antioquia). En las pruebas que realizaron, mostraron que la tasa de recuperación de oro fue del 25% al 85% en las primeras 2 horas y del 75% al 95% después de 48 horas (Bustos et al., 2018). Las dos cepas estudiadas también pueden producir posibles nanopartículas de oro en un corto período de tiempo (Bustos et al., 2018). Dado que los metales trazan, los minerales y los factores ambientales en las minas de oro afectarán la selectividad de las cepas de recuperación de oro, se necesita más investigación; sin embargo, como cepas naturales, tienen un amplio potencial de aplicación en este campo. (Sánchez, 2018).

## Conclusiones

La minería aurífera se realiza por medio de la explotación de filones de forma subterránea o de aluviones desarrollada a cielo abierto, considerando este último como el tipo de yacimiento más explotado en Colombia. Actualmente, predomina en la mayor parte del país la minería a pequeña escala (MAPE) y la minería artesanal desarrollada en múltiples sectores y la que más utiliza sustancias tóxicas para el ambiente y el ser humano como el mercurio o cianuro, este tipo de minería es más rudimentaria por lo que las cantidades de reactivos para lograr una separación óptima deben ser más altas. Desafortunadamente más de la mitad de la minería de oro se realiza de forma ilegal en las dos modalidades, es decir, este tipo de minería no cuenta con títulos mineros, por tanto, no se cumplen con las medidas necesarias para la protección y restauración de las zonas afectadas, ni con las medidas de protección a los mineros. Adicionalmente, en los últimos años la minería ilegal de oro se ha empezado a desarrollar en zonas protegidas y áreas restringidas por la ley, las autoridades tienen poco control sobre esta actividad y debido a los altos precios del oro en los mercados se estima que esta actividad siga incrementando.

Los impactos ambientales ocasionados por esta actividad son incalculables y aunque, en los últimos años se adelantan estudios bastante efectivos para conocer la magnitud de dichos impactos, no se sabe con certeza cuantas áreas están siendo intervenidas para la extracción de este mineral. Por su parte, el recurso hídrico se puede considerar como el más afectado y el que más repercusiones traerá a la salud y el bienestar de los seres humanos, ya que, además de ser contaminado con sustancias altamente tóxicas se está extinguiendo, este hecho generará una



reacción en cadena, la escasez del recurso hídrico está más cerca de que lo que se puede estimar y aunque Colombia es un país rico en agua, el acelerado gasto y su contaminación provocará un colapso a nivel mundial. Así mismo, el suelo se ve fuertemente intervenido, existen evidencias del alto grado de desertificación en la que este recurso queda una vez culminado el proceso de extracción de oro, grandes áreas quedan compactadas y contaminadas, incapaces de producir algún tipo de vida vegetal. Por otro lado, la biodiversidad terrestre y acuática se destruye o se desplaza, el mercurio se acumula en los peces, en los suelos y en las formas de vida vegetal que posteriormente son consumidas por animales y por humanos acumulándose también en pequeñas cantidades dentro de sus organismos generando un grave deterioro de su salud. De igual manera, los gases tóxicos generados en los procesos de beneficio del oro pueden afectar gravemente la salud de los mineros que se exponen a estas sustancias, y a su vez, dichos gases contaminan la atmosfera y pueden ser transportados por el viento y acumulados durante mucho tiempo. Finalmente, la explotación ilegal del oro acarrea problemas socioculturales bastante graves, como la presencia de grupos al margen de la ley que controlan las minas, la falta de seguridad de los mineros, los problemas de salud y los conflictos por el territorio, así mismo, esta actividad se ha convertido en un método efectivo para lavar dinero proveniente del narcotráfico. El hecho de que las minas en su gran mayoría sean controladas por estos grupos, evidencia la falta de importancia que se le da al medio ambiente, pasando éste a un segundo plano.

Como respuesta a las problemáticas ambientales y a los efectos adversos a la salud humana que genera la actividad minera, se han desarrollado diferentes métodos y tecnologías enfocados a una producción más limpia, optimizando los procesos que se llevan a cabo en la explotación y beneficio del oro. Estos métodos disminuyen evidentemente los impactos negativos al ambiente y a la salud de los mineros, en la medida en que se mejora la eficiencia de extracción del mineral y



se disminuyen costos, sin embargo, algunos de los inconvenientes que presentan estos métodos son los altos costos de reactivos o equipos, así como la complejidad para implementarlos y optimizarlos. Sumado a ello, las técnicas que representan un beneficio en la extracción de oro son poco conocidas por los mineros como, por ejemplo, las técnicas biológicas como la biolixiviación, que representan un avance bastante importante para la mitigación de impactos negativos hacia el medio ambiente.

## Referencias Bibliográficas

- Ministerio de justicia y del derecho; UNODC. (2016). *Explotación de oro de aluvión, evidencias a partir de la percepción remota.*
- Ministerio del ambiente. (2014). *Manual de buenas prácticas en minería aurífera aluvial para facilitar una adecuada recuperación de áreas.*
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje acido de mina generación y tratamiento.*
- Agencia Nacional de Minería. (2018). *Términos de referencia trabajo de exploración, programa mínimo exploratorio y programa de trabajos y obras (PTO) para materiales y minerales distintos del espacio y fondo marino.*
- Aguirre, F. A. (2013). *Procesos de destruccion de complejos cianurados.*
- Alianza por la Minería Responsable. (2017). *Guía para el manejo responsable y alternativas de eliminación del mercurio en ambientes de trabajo del sector minero.*
- Almeida, A. P. (2015). *Recuperación de compuestos de cianuro de aguas residuales proveniente de la extracción del oro utilizadas como aguas de riego en la zona minera Zaruma - Portovelo.* Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/6424/1/T-UCE-0008-094.pdf>
- Alpers, C., Marvin-DiPasquale, M., Fleck, J., Ackerman, J., Eagles-Smith, C., Stewart, A., & Windham-Myers, L. (2016). Methods for Investigating Mercury Speciation, Transport, Methylation, and Bioaccumulation in Watersheds Affected . *Historical Mining, in: AGU Fall Meeting Abstracts.*
- ANM. (2019). *ANM asume nuevo declarar áreas de reservas especiales.*
- Aranda, D. (2012). Minería de agua: cómo la megaminería afecta el caudal y la salud de las cuencas. *Movimiento Mesoamericano contra el Modelo extractivo Minero.*
- ArrMaz. (2020). *ESPUMANTES Y FLOTACIÓN POR ESPUMA.* Obtenido de <https://arrmaz.com/es/productos/mineria/espumantes/>
- ATSDR. (2021). *Resúmenes de Salud Pública - Cianuro.*
- Ayala Mosquera, H. J., Diaz Muegue, L. C., & Gómez -Fernández, S. (2019). *Identificación y análisis de impacto de la actividad minera y la explotación ilícita en los ecosistemas del territorio nacional.*

- Balanta, L. L., & Vidal, A. P. (2020). Minería de oro de aluvión: efectos en el recurso hídrico y la salud de los mineros.
- Bonilla, L. (2020). Mining and human capital accumulation: Evidence from the Colombian gold rush. *Journal of Development Economics*.
- Brooks, W. E., Giraldo, J. A., & Palacios, F. M. (2015). *Green Gold — Dirty Gold, Tadó, Dpto. Chocó, Colombia*. Obtenido de <https://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=61147>
- Brooks, W. E., Öztürk, H., & Cansu, Z. (2017). Amalgamation and Small-Scale Gold Mining at Ancient Sardis, Turkey. *Archaeological Discovery*.
- Bustamante, O., Javiria, A., & Restrepo, O. (2005). *Notas de clase de concentración de minerales. Medellín. Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de [https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/PRODUCCION%20MAS%20LIMPIA/GA\\_00058.pdf](https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/PRODUCCION%20MAS%20LIMPIA/GA_00058.pdf)
- Caiza, G. F. (2018). *Mercurio en el suelo. Contaminación y remediación*.
- Campos, D. I. (2013). *recuperarse Diagnóstico Ambiental de las descargas mineras líquidas y sólidas, en los recursos hídricos superficiales y subterráneos del canton Portovelo. Quito, Pichincha, Ecuador.*
- Cantero, M. C., Rhenals, V. I., & Moreno, A. J. (2015). *Determination of the degradation of soils by alluvial gold mining on the riverside of the san pedro river, puerto libertador, Córdoba, Colombia*. Obtenido de [file:///C:/Users/HP/Downloads/790-Texto%20del%20art%C3%ADculo-1441-1-10-20160930%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/HP/Downloads/790-Texto%20del%20art%C3%ADculo-1441-1-10-20160930%20(2).pdf)
- Carrillo, F., Zenteno, R., & Celís, L. R. (2010). *Tecnologías limpias aplicadas a la explotación de oro*. Obtenido de [http://www.pieb.com.bo/2016/BPIEB/BPIEB\\_39\\_146\\_Tecnologias.pdf](http://www.pieb.com.bo/2016/BPIEB/BPIEB_39_146_Tecnologias.pdf)
- Casallas, & Martínez, M. J. (2014). *Contaminación de suelos con metales pesados e hidrocarburos en Colombia. Bogotá: Universidad EAN*.
- Casallas, M. (2015). *Panorama de la minería del oro en Colombia*.
- Castillo, A. C. (2013). *Análisis y evaluación de la problemática socioambiental ocasionada por el uso del mercurio en la minería aurífera artesanal en Colombia*. Universidad Libre.
- Castillo, A. C. (2013). *Análisis y evaluación de la problemática socioambiental ocasionada por el uso del mercurio en la minería aurífera artesanal en Colombia*.
- Castillo, A. C. (2013). *Análisis y evaluación de la problemática socioambiental ocasionada por el uso del mercurio en la minería aurífera artesanal en Colombia*.
- Castillo, F. (2005). *Biotecnología ambiental*.

Castillo, N. (2015). *El barequeo en Colombia, un patrimonio cultural incómodo*. Obtenido de Alianza por la minería responsable .

CDE. (2020). *Minería de oro aluvial*.

Cifuentes, J. A. (2012). *Plan de salud ocupacional y seguridad industrial como instrumento de producción más limpia en la explotación de oro de aluvión*. Universidad de San Buenaventura Seccional Medellín.

Contraloría de Cundinamarca. (2017). *Tipos de explotaciones mineras*.

CORANTIOQUIA, Centro Nacional de Producción Más Limpia . (2016). *Manual de producción y consumo sostenible, gestión del recurso hídrico y minería de oro*. Obtenido de [https://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gesti%C3%B3n%20ambiental/Producci%C3%B3n%20y%20Consumo%20Sostenible/Manuales\\_GIRH/Mineria\\_Oro.pdf](https://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). *Biotecnología microbiana aplicada a la minería*. *Revista Química Viva* 3, 13. Obtenido de <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v13n3/saavedra.pdf>

Díaz, L. d. (2011). *Minería de oro artesanal y a pequeña escala en Timbiquí-Cauca: una aproximación histórica a sus efectos socioambientales desde la perspectiva de los actores locales*. Pontificia Universidad Javeriana .

Díaz, M. (2004). *La Mojana, riqueza natural y potencial económico*. Obtenido de <https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-48.pdf>

Eagles-Smith, C., Wiener, J., Eckley, C., Willacker, J., Evers, D., Marvin-DiPasquale, M., . . . Ackerman, J. (2016). *Mercury in western North America: A synthesis of environmental contamination, fluxes, bioaccumulation, and risk to fish and wildlife*. *Science of The Total Environment*.

Echandía, I. E. (2020). *LA MINERÍA LEGAL TAMBIÉN CONTRIBUYE A LA DEFORESTACIÓN*.

El Tiempo. (2016). *Estrategias que valen oro para reemplazar el mercurio en la minería*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16754531>

Esisler, R. (2003). *Health Risks of Gold Miners: A Synoptic Review*. *Environmental Geochemistry and Health*.

eSustentable. (2008). *Ingeniero Peruano revoluciona minería de oro*. Obtenido de <https://www.esustentable.com/2008/11/15/peruano-revoluciona-mineria-de-oro/>

Fernandez, B. P. (2007). *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina*. Obtenido de [https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/31849/UOV0080TBFP\\_1.pdf?sequence=1](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/31849/UOV0080TBFP_1.pdf?sequence=1)

Función pública. (2016). *DECRETO 1666*.

- Galvéz, J. V. (2008). *El mercurio en minería artesanal. La amalgamación* .
- Gbogbo, F., Otoo, S., Huago, R., & Asomaning, O. (2017). High levels of mercury in wetland resources from three river basins in Ghana: a concern for public health. *Environ Sci Pollut Res*.
- GEMMA . (2018). *Georrecursos, Minería y Medio Ambiente* .
- González, A., Bonilla, J., Quintero, M., Reyes, C., & Chavarro, A. (2016). Análisis de las causas y consecuencias de los accidentes laborales ocurridos en dos proyectos de construcción.
- González, L. C. (2017). *Approach of a technology of clean production for gold beneficiation process without mercury* .
- Gyamfi, E., Appiah-Adjei, E., & Adjei, K. (2019). Potential heavy metal pollution of soil and water resources from artisanal mining in Kokoteasua, Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*.
- Hilson, G. (2002 ). The environmental impact of small-scale gold mining in Ghana: identifying problems and possible solutions. *Geographical Journal*.
- Hinton, J., Veiga, M., & Beinhoff, C. (2003). "Women and artisanal mining: gender roles and the road ahead". *En: Hilson, G., ed. The socio-economic impacts of artisanal and small-scale mining in developing countries. Lisse: A. A. Balkema: 161-203*.
- Hinton, J.; Veiga, M. M. y Beinhoff, C. (2003). "Women, mercury and artisanal gold mining: risk communication and mitigation". *Journal de Physique IV. 107: 617-620*.
- Hoyos, E. J., & Arcila, M. L. (2016). *Consideraciones ambientales por el uso de mercurio en minería aurífera en el municipio de El Bagre, Antioquia: estrategias de producción limpia*.
- IIAP. (2005). *Diagnóstico Situacional de la Minería Artesanal y en Pequeña Escala desarrollada por Afrocolombianos en Territorios Colectivos de Comunidades Negras en el Chocó Biogeográfico. Quibdó-Chocó*.
- IIAP MinMinas. (2013). *Diagnóstico para la identificación de áreas susceptibles de formalización minera en el departamento del CHOCÓ. Quibdó: Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacifico, Ministerio de Minas y Energía, Convenio 072 de 2013*.
- Ilyas, S., & Lee, J. (2018). *Gold metallurgy and environment. Boca Ratón, Estados Unidos: Taylor and & Francis group* .
- INGEOMINAS. (2010). *Glosario Geológico - Minero. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería*.
- Ingles, J., & Scott, J. (2002). *Processes for the Treatment of Gold Mill effluents: Industrial Programs Branch, Environment Canada, Ottawa, Canada*.

- Instituto Nacional de Salud . (2012). «Contaminación con mercurio por la actividad minera.» Biomédica,.
- Ley 685. (2001). *Código de minas*.
- Linares, N. M. (2008). *Manejo Ambiental de Residuos de cianuración de oro en el laboratorio metalúrgico de la facultad de ingeniería metalúrgica de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna- Perú.* Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/6424/1/T-UCE-0008-094.pdf>
- López-Tejedor, I., Sierra, M., Rodríguez, J., & Millán, R. (2010). *Estudio de la Absorción y Distribución del Mercurio en Nerium Oleander L. en la Ribera del Río Valdeazogues (Estación de Chillón - Almadén). Informes técnicos Ciemat.*
- Lozada, J. (2017). Opciones para una minería de oro que cumpla con las normas ambientales, en la Guayana venezolana. *Revista geográfica venezolana* .
- Macdonald, E. H. (1983). *Springer Netherlands, The Geology of Placers and Their Formation.*
- Machado, L. G., Ospina, J. H., Henao, N. A., & Marín, F. D. (2010). *Problemática ambiental ocasionada por el mercurio proveniente de la minería aurífera tradicional, en el corregimiento de providencia, Antioquia.*
- MADS, PNUMA. (2012). *Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala.*
- Mahbub, Bahar, Labbate, Krishnan, Andrews, Naidu, & Megharaj. (2017). *Bioremediation of mercury: not properly exploited in contaminated soils. Appl Microbiol Biotechnol.*
- Mark, L., Hagelstein, K., & Mudder, T. (2001). *El Manejo del Cianuro en la extracción del Oro. Ottawa, Ontario.*
- Martínez, A., & Aguilar, T. (2012). *Impacto socioeconómico de la minería en Colombia. Informe para el Sector de Minería a Gran Escala. . Bogotá, Fedesarrollo.*
- Matsuyama, A., Yano, S., Taninaka, T., Kindaichi, M., Sonoda, I., Tada, A., & H., A. (2017). *Chemical characteristics of dissolved mercury in the pore water of Minamata Bay sediments. Marine Pollution Bulletin.*
- Medina, G., Hruschka, F., & Canales, M. (2008). *Proyecto GAMA. Gestión Ambiental en la Minería Artesanal.* Obtenido de <http://www.gama-peru.org/gama/tiki-index.php>
- Melo Ascencio, D. (2016). *La Minería en Chocó, Investigación y propuestas para convertir la crisis socio-ambiental en paz y justicia territorial. Bogotá, Colombia: Centro de Estudios para la Justicia Social (CEJS) Tierra Digna.*
- Metallurgist . (2017). *Metalurgistas E Ingenieros De Procesamiento De Minerales.* Obtenido de Introducción a la Lixiviación de Oro y Plata.

Michaud, L. (2016). *Métodos y procesos de destrucción de cianuro*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/blog/cyanide-destruction-methods#inco-so2air>

Ministerio de minas y energía . (2016). *Código de minas*.

Ministerio de minas y energía. (2017). *Normatividad general para el control a la explotación ilícita de minerales*.

Ministerio de minas y energía, U. (2019 ). *Explotación de oro de aluvión, evidencias a partir de percepción remota 2018*.

Ministerio de Minas y Energía; Servicio Geológico Colombiano. (2018). *Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio*.

Ministerio de Minas y Energía; Servicio Geológico Colombiano. (2019). *Recursos minerales de Colombia*.

Ministerio del medio ambiente. (2002). *Diagnóstico y proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas de Colombia*.

Ministerio del Medio Ambiente; Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Agencia de Cooperación Técnica Alemana; Corporación Autónoma Regional de Nariño; Corporación Autónoma Regional del Cauca; Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur d. (2006). *Hacia una producción más limpia. Programa para minimizar la contaminación generada por la minería en el sur y occidente colombiano*. . Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018607/ProduccionLimpia.pdf>

MinMinas, M. d. (2015). *Glosario técnico minero*.

MME. (2011). *Censo Minero Departamental Colombiano* .

Moran, R. (2004). *El cianuro en la minería: algunas observaciones sobre la química, toxicidad y análisis de las aguas asociadas con la minería*.

Morway, E., Thodal, C., & Marvin-DiPasquale, M. (2017). Long-term trends of surface-water mercury and methylmercury concentrations downstream of historic mining within the Carson River watershed. *Environmental Pollution* .

Obiri, S., Doodoo, D., Okai-Sam, F., & Essumang, D. (2006). Non-Cancer Health Risk Assessment from Exposure to Cyanide by Resident Adults from the Mining Operations of Bogoso Gold Limited in Ghana.

OMS. (2013). Repercusiones de la exposición al mercurio y a los compuestos mercuriales en la salud pública: la función de la OMS y de los ministerios de salud pública en la aplicación del Convenio de Minamata (No. 134.a reunión EB134/23), Punto 8.6 del orden del día p.

OMS. (2017). Riesgos para la salud relacionados con el trabajo y el medioambiente asociados a la extracción de oro artesanal o a pequeña escala. Roma.

ONU. (2018). *Introducción a la MAPE* .

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo industrial. (2006). *Global mercury project: environmental and health assessment report*. Viena: Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial.

Organización Mundial de la Salud . (2017). *RIESGOS PARA LA SALUD RELACIONADOS CON EL TRABAJO Y EL MEDIOAMBIENTE ASOCIADOS A LA EXTRACCIÓN DE ORO ARTESANAL O A PEQUEÑA ESCALA*. Obtenido de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259452/9789243510279-spa.pdf?sequence=1>

Pérez, V. M. (2011). *Riesgos de salud en la explotación de oro*.

Persaud, A., Telmer, K., Costa, M., & Moore, M.-L. (2017). Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Senegal: Livelihoods, Customary Authority, and Formalization. *Society & Natural Resources*.

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

PNUMA. (2010). El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala.

PNUMA, & MADS. (2012). *Sinopsis Nacional de la Minería Aurífera Artesanal y de Pequeña Escala*.

Prado, J. D. (2017). *Parámetros de operación del separador JIG para material tomado de un placer aurífero*. Obtenido de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/7450/1/13358.pdf>

Praeli, Y. S. (2019). *Minería ilegal: la peor devastación en la historia de la Amazonía*. Obtenido de <https://es.mongabay.com/2019/01/mapa-mineria-ilegal-amazonia/>

Proyecto Multinacional Andino. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas*. *Publicación Geológica Multinacional No. 4*. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA).

Ramirez, A. (2011). Improvement of workers' biological indicators exposed to mercury at a gold refinery.

Ramos-Betancur, J. D.-D.-Z. (2007). *Oro: Un recorrido por la tecnología minera de Antioquia*. Medellín. Universidad Eafit.

Revista portafolio . (2019). Producción ilegal de oro es más del 70% del mercado.

Revista Portafolio. (2021). La Nación logró en 2020 la producción de oro más alta en cuatro años.

- Sánchez, I. D. (2018). *técnicas alternativas para la extracción de oro sin el uso de mercurio y su potencial aplicación a pequeña escala y minería artesanal en Colombia* .
- SERNAGEOMIN, SONAMI, BGR. (2008). *Guía de Buenas Prácticas Ambientales para la Pequeña Minería* .
- Servicio de Información y Noticias Científicas (SINC). (2008). *Desarrollan un método para extraer oro menos tóxico que el cianuro*. Obtenido de <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Desarrollan-un-metodo-para-extraer-oro-menos-toxico-que-el-cianuro>
- Solís, T., & Alfredo, J. (2011). *Estrategia de control en un proceso de destrucción de cianuro (Inco/so<sub>2</sub> aire) en una Planta de lixiviación de oro por cianuración*. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/6372>
- Stapper, K. T. (2012). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*.
- Suárez, A. L. (2020). La minería ilegal de oro en Colombia. *Revista Portafolio*.
- Telmer, K., & Stapper, D. (2012). *Reducción del uso de mercurio en la minería de oro artesanal y de pequeña escala*. Obtenido de [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11524/GMNG\\_SP.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11524/GMNG_SP.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Timarán, F. P. (2016). *PROBLEMÁTICA SOCIAL Y AMBIENTAL DE LA MINERÍA DEL ORO EN PEQUEÑA ESCALA EN LATINOAMÉRICA ANDINA*. Obtenido de [http://artisanalmining.org/Repository/01/The\\_CASM\\_Files/CASM\\_Database\\_documents/orolatinoamerica2actual.pdf](http://artisanalmining.org/Repository/01/The_CASM_Files/CASM_Database_documents/orolatinoamerica2actual.pdf)
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2007). *Producción más limpia en la minería del oro en Colombia mercurio, cianuro y otras sustancias*. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2923/2015lauragonzalez34.pdf?sequence=73&isAllowed=y>
- Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco – Facultad de Ciencias Naturales. (2005). *IMPACTO AMBIENTAL DEL CIANURO EN LA MINERÍA A CIELO ABIERTO*.
- UPME-UIS. (2014). *Estimación de áreas intervenidas, consumo de agua, energía y costos de producción en la actividad minera*.
- Valdés, L. V. (2020). *Análisis bibliográfico sobre los efectos ambientales generados en el recurso hídrico por la minería aurífera en Antioquia y los métodos de medición y remediación utilizados*. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/33475>
- Vélez-Torres, I., Venegas, D., & Eric, M. (2018). Mercury Pollution and Artisanal Gold Mining in Alto Cauca, Colombia: Woman's Perception of Health and Environmental Impacts. *The Journal of Environment & Development*.



- VERBEL, J. O., CASTRO, F. Y., & GALLARDO, K. C. (2013). *Mercury air pollution in the gold mining district of the municipality of San Martín de Loba, Bolívar Department, Colombia.*
- Villar, M. R. (2013). *Estudio sobre la cinética de reacción del gas ozono (O<sub>3</sub>) con iones de cianato (CNO<sup>-</sup>) en aguas residuales del proceso Macarthur-Forrest. Guatemala. .*
- Walle, M. (2007). *Safety & health in small-scale underground mines: didactic material for the ASM sector. Bad Vilbel: Projekt Consult GmbH. .*
- Zapata, G. Y. (2020). *Problemas medioambientales de la minería aurífera ilegal en Madre de Dios (Perú).* Obtenido de <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/73177>
- Zhang, Feng, Larssen, Qiu, & Vogt. (2010). *In inland China, rice, rather than fish, is the major pathway for methylmercury exposure. Environ. Health Perspect.*