

Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales  
Contaminadas con Mercurio Producto de la Minería Aurífera (artesanal y pequeña escala)

Vanessa Katherine Castrillón Trujillo

Código: 1.053 .803.323

Leydi Johanna Navarro Aguirre

Código: 1.060.651.220

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Esc. de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente

Ingeniería Ambiental

Manizales, Agosto de 2016

Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales  
Contaminadas con Mercurio Producto de la Minería Aurífera (artesanal y pequeña escala)

Por

Vanessa Katherine Castrillón Trujillo

Leydi Johanna Navarro Aguirre

Monografía para optar al título de

Ingeniero Ambiental

Director

Myrian Sofia Guzmán Oliveros

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Esc. de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente

Ingeniería Ambiental

Manizales, Agosto de 2016

## Tabla de contenido

Introducción .....	9
Resumen.....	12
Abstract .....	13
Planteamiento del problema.....	14
Justificación.....	16
Objetivos .....	18
Objetivo general .....	18
Objetivos específicos.....	18
Marco Teórico .....	19
Marco conceptual .....	22
Minería en Colombia.....	23
Concepto de minería.....	23
Minería Aurífera en Colombia .....	23
Minería Artesanal .....	25
Minería de pequeña escala.....	27
Clases de explotación minera.....	30
Minería a Tajo Abierto – Cielo Abierto .....	30
Minería de Socavón oSubterránea.....	32

Beneficio del mineral (Amalgamación) .....	34
Minería en el Municipio de Marmato, Caldas .....	35
Conflicto social en Marmato por actividad minera .....	36
Tipos de minería en Marmato Caldas.....	38
Minería artesanal: .....	38
Minería a Pequeña Escala: .....	38
Métodos de explotación.....	38
Subterráneo. ....	38
Barequeo. ....	40
Uso de mercurio en el municipio de Marmato para recuperación de oro.....	41
Recurso Hídrico de Marmato influenciado por la minería aurífera.....	43
Quebrada Cascabel .....	44
Concentración de mercurio en la quebrada Cascabel.....	45
Problemática ambiental y de salud pública en Marmato.....	47
Principales impactos ambientales generados de la actividad minera .....	47
Mercurio como metal pesado .....	49
Fuentes.....	51
Efectos del mercurio en la salud.....	52
Enfermedad de Minamata. ....	54

Convenio Minamata.....	56
Implicaciones del mercurio por la actividad minera aurífera.....	57
Contaminación del agua por mercurio e impactos ambientales al recurso.....	59
Metilmercurio.....	61
Bioacumulación y biomagnificación.....	62
Impactos ambientales del metilmercurio.....	62
Tratamiento biológico.....	63
Biotecnología.....	63
Biorremediación.....	63
Fitorremediación.....	64
Técnicas de fitorremediación.....	66
Fitoextracción.....	67
Fitoestabilización.....	68
Rizofiltración.....	68
Fitovolatilización.....	69
Sistemas de fitorremediación acuática.....	70
Plantas acuáticas.....	71
Efectos de los metales en las plantas.....	71
Criterios para seleccionar las especies de plantas para la fitorremediación.....	72

Hidrofitos o macrófitos acuáticos.....	72
Macrófitos flotantes.....	73
Macrófitos enraizados-flotantes (Emergentes).....	73
Macrófitos sumergidos.....	74
Descripción de especies vegetales en estudio.....	75
Lenteja de agua ( <i>Lemna minor</i> ).....	75
Taxonomía y reproducción.....	76
Condiciones de crecimiento y productividad.....	77
Resultados uso de Lenteja de agua en fitorremediación de mercurio.....	78
Jacinto de agua ( <i>Eichornia crassipes</i> ).....	79
Taxonomía y reproducción.....	80
Condiciones de crecimiento y reproductividad.....	81
Resultados uso de Jacinto de agua en fitorremediación de mercurio.....	82
Elodea ( <i>Elodea Canadiensis</i> ).....	84
Taxonomía y reproducción.....	85
Condiciones de crecimiento y reproductividad.....	86
Resultados uso de Elodea en fitorremediación de mercurio.....	86
Disposición final de los residuos generados en el proceso de fitorremediación.....	88
Incineración.....	89

Rellenos de seguridad.....	90
Pretratamiento.....	91
Conclusiones .....	93
Recomendaciones.....	95
Referencias bibliográficas.....	97

### **Lista de tablas y figuras**

<i>Tabla 1.</i> Valores promedio de uso de mercurio (Hg) en distintos distritos mineros .....	41
<i>Tabla 2.</i> Uso de mercurio en los principales departamentos mineros en 2011.....	42
<i>Tabla 3.</i> Valores típicos para aguas superficiales establecidos por la UNESCO .....	45
<i>Tabla 4.</i> Resultados de cada uno de los parámetros determinantes de la calidad del agua de la quebrada Cascabel .....	46
<i>Tabla 5.</i> Índice de Calidad de Agua ICA para la Quebrada Cascabel .....	46
<i>Tabla 6.</i> Ventajas y desventajas de la fitorremediación .....	65
<i>Tabla 7.</i> Mecanismos de fitorremediación.....	66
<i>Tabla 9.</i> Porcentaje de remoción de mercurio de acuerdo a su concentración .....	87
<i>Tabla 10.</i> Porcentaje de mercurio retenido en la planta.....	87

<i>Figura 1. Evolución de la producción nacional de oro</i> .....	24
<i>Figura 2. Minería a cielo abierto</i> .....	30
<i>Figura 3. Minería subterránea</i> .....	32
<i>Figura 4. Transformación del mercurio en el medio acuático</i> .....	61
<i>Figura 5. Técnicas de fitorremediación</i> .....	67

### **Lista de fotografías**

<i>Fotografía 1. Lenteja de agua (Lemna minor)</i> .....	75
<i>Fotografía 2. Jacinto de agua (Eichornia crassipes)</i> .....	80
<i>Fotografía 3. Elodea (Elodea Canadensis)</i> .....	84

## Introducción

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012), Colombia es un país rico en recursos minerales, esto se hizo evidente desde tiempos precolombinos. Esta tradición minera arraigó la minería de oro en diferentes zonas geográficas de Colombia.

Parte del oro que se exporta al mundo, proviene del municipio de Marmato en el departamento de Caldas. La explotación, en su mayoría artesanal y de pequeña escala, genera beneficios económicos, los cuales van acompañados de impactos ecosistémicos y conflictos sociales (Ángel y Alvear, 2013).

En los procesos de beneficio de la minería aurífera de pequeña escala y artesanal, la técnica de la amalgamación está presente aproximadamente en el 80% de las plantas de beneficio, convirtiéndose en una de las mayores fuentes de descarga de mercurio al ambiente. (PNUMA y MADS, 2012, p.10)

Lo anterior hace que la comunidad deba enfrentar situaciones conflictivas que influyen la afectación de los recursos naturales disponibles, por falta de trabajo concertado y planificado entre los actores que intervienen en esta actividad económica. Por ende uno de los recursos que más se ve afectado y que amenaza directamente a los ecosistemas es el agua, elemento clave para el desarrollo económico y social de una comunidad, ya que los seres humanos la necesitan para su supervivencia, para los cultivos que producen parte de los alimentos que se consumen, para

generar energía y en general hacer posible la producción de los bienes que se utilizan a diario. (Ángel y Alvear, 2013).

La microcuenca de la quebrada Cascabel ubicada en Marmato Caldas ha sido objeto de varios estudios relacionados con las fuentes hídricas para desarrollar acciones de cumplimiento legal para la conservación de los recursos hídricos, sin embargo las metodologías que se han aplicado no han permitido generar una visión ecosistémica, en donde se articulen aspectos como: la conservación, el uso sostenible, y la distribución justa y equitativa de los bienes y servicios de la biodiversidad (Ángel y Alvear, 2013).

Una de las más grandes preocupaciones referente a la contaminación hídrica es la presencia de metales. La mayoría de los metales de fuentes naturales suelen provenir de la corteza terrestre, de manera natural, sin embargo hay otros procesos de origen antrópico, como la actividad minera con el mercurio (Hg). Debido al alto riesgo que representan los ambientes contaminados con mercurio (Hg), surge la necesidad de tratarlos de manera efectiva, lo cual se puede realizar utilizando estrategias de saneamiento ambiental tales como la remediación biológica, la cual comprende la fitorremediación (Paisio, González, Talano y Agostini, 2012).

Según Susarla (como se citó en Cubillos, 2011), la fitorremediación se basa entonces, en el uso de plantas y su interacción con los microorganismos que se ubican en la rizósfera, con el fin de remover, retener o degradar sustancias contaminantes presentes en aguas superficiales y subterráneas.

Según Breteler *et al*; Kamal *et al*; Skinner *et al*; Sundberg (como se citó en Paisio *et al*, 2012), en algunas investigaciones sobre plantas rizofiltradoras de mercurio (Hg) y aplicación en diversos ambientes de humedales, los resultados han indicado que la fitorremediación sustancial de aguas contaminadas con este metal puede ser posible.

El uso de macrófitas flotantes ha demostrado eficiencias de remoción significativamente altas en todos los constituyentes de las aguas residuales. Una cantidad importante de especies ha sido empleada en sistemas de tratamiento, y en ejercicios investigativos a escala real y a escala laboratorio (Martelo y Lara, 2012).

El presente trabajo pretende evaluar a partir de una revisión bibliográfica la técnica de fitorremediación para descontaminar aguas con presencia de mercurio (Hg), los métodos que se usan y cuan efectivos son para su aplicación. Las especies vegetales que se investigaron para el proceso de fitorremediación en aguas residuales con metales pesados fueron Lenteja de agua (*Lemna minor*), Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) y Elodea (*Elodea canadenses*), demostrando buenos porcentajes de remoción de mercurio.

## Resumen

**Palabras clave:** Biotecnología, metales pesados, amalgamación, metilmercurio, contaminación, macrófito.

Las actividades de minería aurífera involucra la separación y extracción del oro de las rocas en las que se encuentran, para ello se hace uso del mercurio, en un proceso denominado amalgamiento, considerándose una fuente importante de contaminación (Español, 2012). A lo largo de los años el incremento de esta actividad, se ha convertido en una problemática ambiental debido a la cantidad de vertimientos con contenidos de mercurio (Hg) que se generan (García, 2013). Estos vertimientos conducen a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, constituyendo una fuerte amenaza para el hombre y los ecosistemas (Oyarzun, Higuera y Lillo, 2011).

Ante este contexto, diferentes alternativas se han aplicado con la finalidad de reducir los efectos que este contaminante ocasiona y para ello se hará un enfoque en evaluar la fitorremediación como una posible solución, ya que esta técnica aprovecha la capacidad de ciertas especies de plantas para absorber y transformar un contaminante (Sepúlveda, 2013). La evaluación consiste en hacer una revisión bibliográfica y presentar un panorama de los tipos de fitorremediación empleados para restaurar aguas contaminadas, así como la exposición de las distintas especies con propiedades de fitorremediación y su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales con contenido de mercurio, para garantizar que estas aguas no contengan cargas tan altas y que puedan ser vertidas en un nivel en el que no causen efectos adversos. A partir de los resultados obtenidos en la investigación se pueda identificar cuáles son las plantas más

prometedoras para poner en marcha un proceso de fitorremediación en aguas contaminadas con mercurio (Hg).

### **Abstract**

**Keywords:** Biotechnology, heavy metals, amalgamation, methylmercury, pollution, macrophyte.

The Gold mining activities involves the separation and extraction of gold from the rocks, for this use mercury, in a process called amalgamation, it is considered a major source of pollution (Spanish, 2012). Throughout the years the increase in this activity, has become an environmental problem due to the number of discharges with mercury content generated (Garcia, 2013). These discharges lead to contamination of surface and groundwater, constituting a major threat to humans and ecosystems (Oyarzun, Higuera y Lillo, 2011).

Given this context, different alternatives have been implemented in order to reduce the effects of this contaminant causes and this will be a focus on evaluating phytoremediation as a possible solution, since this technique exploits the ability of certain plant species to absorb and transform a contaminant (Sepúlveda, 2013). The evaluation consists to present an overview of the types of phytoremediation used to restore polluted waters, as well as exposure of the different species with properties phytoremediation and efficiency in treating wastewater containing mercury, to ensure that these waters no contain as high loads and can be discharged into a level not causing adverse effects. From the results of the research can identify the most promising plants are to launch a process of phytoremediation in mercury-contaminated waters.

## Planteamiento del problema

¿Es factible la fitorremediación como técnica en descontaminación de aguas residuales con contenido de mercurio?

En la minería el agua es utilizada en los procesos de exploración y explotación, especialmente durante el proceso donde se separan los minerales, se puede decir que tiene múltiples usos, cada operación utiliza en mayor o menor medida ciertos volúmenes de agua para ser más eficiente el proceso (Chaparro, 2009). El agua para este uso la obtienen principalmente de arroyos, ríos, lagos e incluso agua subterránea, generando cantidades de agua contaminadas con metales pesados como el mercurio (Chaparro, 2009; Díaz, 2014).

El mercurio (Hg) esta denominado como metal pesado, y como todos ellos, es toxico aunque este se encuentre a muy bajas concentraciones, considerado por ende muy peligroso y este por tratarse de un elemento no puede descomponerse ni degradarse en sustancias inocuas (Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente, 2011). En la minería aurífera, el mercurio (Hg) es utilizado para recuperar el oro:

El mercurio se usa para separar y extraer el oro de las rocas o piedras en las que se encuentra. El mercurio (Hg) se adhiere al oro formando una amalgama que facilita su separación de la roca, arena u otro material. Luego se calienta la amalgama para que se evapore el mercurio (Hg) y quede el oro. La minería del oro artesanal y en pequeña escala es, por sí sola, la mayor fuente de liberación intencional de mercurio del mundo. (Español, 2012, p.02)

Durante el proceso de amalgamiento se pierde una porción del mercurio (Hg), tanto en este proceso como cuando es evaporado va a dar finalmente a las fuentes de agua y otros recursos generando una contaminación no solo del recurso hídrico, sino también los seres vivos del ecosistema acuático, este se deposita y acumula en el lodo del fondo, siendo transformado biológicamente en metilmercurio, los peces y otros organismos que se alimentan de este barro lo acumulan en sus tejidos, de allí el término de bioacumulación, perturbándolos biológicamente; finalmente siguiendo la cadena trófica llega a los seres humanos generalmente por el consumo de pescado y plantas. Se puede decir entonces que los metales pesados han deteriorado significativamente la subsistencia y la reproducción de los organismos vivos, incluyendo vegetación, animales y microorganismos presentes, y afectando a los humanos mismos en su salud (Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente, 2011).

Tradicionalmente el tratamiento de las aguas residuales se hace con la intención de reducir la contaminación, utilizando tecnologías convencionales de descontaminación, estas incluyen tratamientos de tipo químicos, físicos y biológicos, muchas de estas tecnologías son efectivas dependiendo claro esta del contaminante a tratar. Sin embargo surgen desventajas para su implementación, ya que algunos de ellos requieren de una inversión económica, resultando muy costosos, otros por ejemplo requiere mucho tiempo de reacción para lograr así una disminución considerable del contaminante (Piñeros, 2013).

## Justificación

En Colombia en la actualidad ha incrementado de manera significativa la explotación de minerales por la actividad minería y a su vez a nivel industrial en los procesos de transformación de los minerales, generando agua residual contaminada con metales pesados como el mercurio, por lo que en los últimos años se ha acentuado la contaminación en los cuerpos de agua (afluente receptor), por el manejo inadecuado o ineficiente de las aguas residuales procedentes de dichas actividades (PNUMA y MADS, 2012; Silva, 2014).

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (PNUMA y MADS, 2012) hay una alarmante preocupación por los metales presentes en el ambiente debido a su efecto toxico, tendencia de bioacumulación y su persistencia en el ambiente. Repetto y Kosnett (como se citó en Sepúlveda, 2013) mencionan que los metales pesados son quizás los agentes tóxicos más conocidos desde la antigüedad, no han perdido interés, y en los últimos años se ha incrementado el conocimiento concerniente a los potenciales efectos tóxicos y mecanismos de acción de los iones metálicos, los compuestos inorgánicos y organometálicos, que constituyen parte de los productos y subproductos tecnológicos.

Las tecnologías convencionales que han sido utilizadas para descontaminar aguas residuales, pueden ser eficientes pero generalmente generan altos costos en su instalación, operación y mantenimiento, en algunos casos los sistemas de tratamiento que poseen en la actualidad no son tan eficaces, el tratamiento es muy lento y necesitan ser optimizados lo que requiere de una mayor inversión y mejorar así los niveles de remoción de los contaminantes (Piñeros, 2013).

Debido a las desventajas de una tecnología convencional, se ha acrecentado la necesidad de investigar otras alternativas que aprovechen, beneficien y apliquen los procesos ocurridos naturalmente en el ecosistema para la depuración de aguas contaminadas, ofreciendo la posibilidad de recuperar los recursos, contribuyendo así a la sostenibilidad del sistema (Blanch, 2010; Piñeros, 2013).

En la actualidad hay diversas técnicas para remediar, la fitorremediación ocupa un lugar importante porque es una tecnología innovadora, basada en el uso de plantas, siendo amigable con el medio ambiente, ayudando a degradar compuestos orgánicos e inorgánicos y logrando restaurar aguas contaminadas (Delgadillo, González, Prieto, Villagómez y Acevedo, 2011).

De allí radica la importancia en apostarle a proyectos que beneficien este sector, donde se le muestre a la comunidad técnicas naturales como la fitorremediación, una biotecnología que logra descontaminar de manera natural y sin causar daños al ambiente, para proteger la salud pública de las comunidades y por supuesto la protección del medio ambiente (Blanch, 2010). Siendo fundamental para la recuperación de las fuentes hídricas contaminadas y mejorar su calidad (Paisio, González, Talano y Agostini, 2012).

Es por esto que durante el desarrollo de esta investigación, se procura contribuir de manera positiva a la evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con mercurio (Hg) (Delgadillo et al., 2011), empleando esta técnica, para aportar un referente a nivel nacional, y cubrir las carencias de información existente relacionadas con la temática.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Evaluar a partir de una revisión bibliográfica la fitorremediación como alternativa remediadora de aguas residuales con presencia de mercurio (Hg), proveniente de la actividad minera aurífera (artesanal y pequeña escala), tomando como referente la minería en el Municipio de Marmato, Caldas.

### **Objetivos específicos**

Determinar los impactos ambientales y efectos tóxicos a la salud humana por el inadecuado manejo del mercurio en la actividad minera aurífera (artesanal y pequeña escala) en Marmato, Caldas.

Analizar el potencial de algunas especies de plantas y elegir una con mayor capacidad de absorción de metales pesados como el mercurio.

Identificar el método más adecuado y viable de disposición final para especies utilizadas en un proceso de Fitorremediación.

## Marco Teórico

En Colombia se encuentran diversas regiones afectadas por la minería aurífera, la inhalación de vapores de mercurio (Hg) junto con la ingesta de peces contaminados, constituyen las principales fuentes de contaminación con este metal, el cual afecta la salud humana de múltiples maneras. No obstante, otra fuente adicional reconocida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es el consumo de agua contaminada, generalmente a causa de vertimientos industriales. Generalmente las aguas superficiales contienen bajos niveles de mercurio debido a que este es rápidamente consumido por microorganismos acuáticos, se ha encontrado que bajo ciertas circunstancias su concentración en el agua puede alcanzar valores alarmantes, superando incluso los 2,0 µg/L, valor estipulado en la legislación colombiana para aquellas fuentes hídricas destinadas para consumo humano y doméstico. En algunos municipios colombianos se han detectado concentraciones de mercurio en aguas superficiales por encima de los 3,0 µg/L y en otros lugares del mundo por encima de los 8,0 µg/L. por lo cual el consumo de agua contaminada con mercurio constituye un problema menor en comparación con otras fuentes de contaminación, estas bajas concentraciones también contribuyen gradualmente a la carga contaminante que afecta la salud humana. (Díaz, 2014).

Por tanto los metales pesados son un grupo de elementos, que se definen como tal según su densidad, peso atómico y masa atómica, pero lo que realmente hacen que resulten tóxicos y obtengan esa denominación no son generalmente sus características esenciales, sino la concentración en la que pueden encontrarse, cabe mencionar que no todos los metales con alta densidad son esencialmente tóxicos. Sin embargo, hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y es común referirse a ellos

con el término genérico de “metales pesados” (Pérez, 2011).

La extracción de oro con mercurio (Hg) consiste de cuatro etapas principales: amalgamación, separación de la parte mineral de la amalgama, quema de la amalgama mercurio-oro y purificación del oro. La amalgamación consiste en mezclar manualmente la roca triturada enriquecida de oro con mercurio metálico, posteriormente se libera el exceso de mercurio (Hg), generalmente en cercanías a corrientes de agua; la amalgama producida es de alta densidad y puede ser separada del resto de sedimentos por precipitación; luego esta amalgama es sometida a altas temperaturas con lo que se puede separar el oro sólido del mercurio (Hg), siendo este último liberado al ambiente (como Hg<sub>0</sub>) en forma de vapor. Hinton (Como se citó en Vidal, 2009, p.6).

Según Olivero (como se citó en Vidal, 2009) en consecuencia de los procesos anteriores, se genera el derramamiento directo de grandes cantidades de mercurio a suelos, ríos y en cuerpos de agua como ciénagas y lagunas. La volatilización del mercurio usualmente se realiza a campo abierto liberando este contaminante directamente a la atmósfera, además estos procesos son realizados muy cerca de las viviendas de los mineros, de tal forma que las familias respiran gran parte del vapor de mercurio e ingieren alimentos y agua con concentraciones perjudiciales para la salud.

Existen diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados como la adsorción, cementación, precipitación, intercambio iónico, extracción con solventes y electrodiálisis. Sin embargo, generalmente son costosas e ineficientes cuando se trata de soluciones diluidas. Por lo mismo, se han desarrollado tecnologías alternativas como la

biorremediación y la fitorremediación que involucra el uso de organismos vivos y sus derivados para la remoción de metales de aguas contaminadas (Sepúlveda, 2013).

Estas fitotecnologías se pueden aplicar tanto a contaminantes orgánicas como inorgánicas, presentes en sustratos sólidos, líquidos o en el aire. Según Carpena y Bernal (Como se citó en López, 2014) se distinguen:

**Fitoextracción:** uso de plantas acumuladoras de elementos tóxicos o compuestos orgánicos para retirarlos del suelo mediante su absorción y concentración en las partes cosechables.

**Fitoestabilización:** uso de plantas para reducir la biodisponibilidad de los contaminantes en el entorno, mejorando las propiedades físicas y químicas del medio.

**Fitoimmobilización:** uso de las raíces de las plantas para la fijación o inmovilización de los contaminantes en el suelo. Junto con la anterior son técnicas de contención.

**Fitovolatilización:** uso de plantas para eliminar los contaminantes del medio mediante su volatilización, y para eliminar contaminantes del aire.

**Fitodegradación:** uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes orgánicos.

**Rizofiltración:** uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua y de otros efluentes acuosos.

## Marco conceptual

**La Bioacumulación:** Proceso de incremento en la concentración de una sustancia química en un organismo vivo a través del tiempo (Instituto de la Amazonia Peruana y Ministerio de Ambiente, 2011).

**Biomagnificación:** Transferencia de un químico xenobiótico desde el alimento a un organismo, resultando en una alta concentración dentro del organismo comparada con la fuente de origen (Conell, 1990; Rand et al., 1995), con lo cual, se da un incremento en la concentración entre los niveles tróficos. Rand (Como se citó en Escobar, 2010).

**Enfermedad de Minamata:** Efectos provocados por la intoxicación a través del mercurio. Hinton (como se citó en Escobar, 2010).

**Mercurio:** El mercurio (Hg) es un contaminante mundial. Cuando el mercurio es liberado en el medio ambiente, se evapora, viaja con las corrientes de aire y luego cae nuevamente a la tierra, algunas veces cerca de la fuente original y otras veces muy lejos. Cuando el mercurio entra en el medio ambiente acuático, los microorganismos pueden transformarlo en metilmercurio, un compuesto de mercurio que es más tóxico a dosis bajas que el mercurio elemental. Weinberg (como se citó en López, 2014).

## **Minería en Colombia**

### **Concepto de minería**

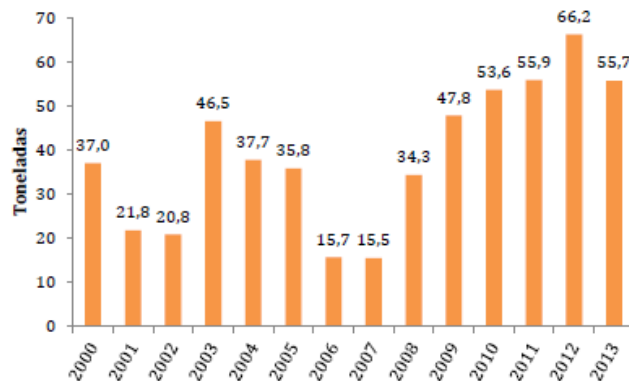
El Ministerio de Minas y Energía (2009) define la minería como la actividad económica mediante la cual se extraen selectivamente de la corteza terrestre, diferentes tipos de minerales que son básicos para la producción de materiales empleados por la sociedad moderna y que son básicos en el diario vivir. La minería reúne un conjunto de actividades que relacionan el descubrimiento, exploración y explotación de yacimientos. Se conocen más de 7.000 tipos de minerales.

### **Minería Aurífera en Colombia**

La minería aurífera en Colombia se caracteriza por ser la más importante fuente generadora de empleo en diferentes zonas geográficas del país (Delgado, Arango, Romero, 2014). Algunas de estas regiones son: Remedios y Segovia (Antioquia), Marmato (Caldas), Buenos Aires (Cauca), Santa Rosa del Sur (Bolívar) y Istmina y Tadó (Chocó), por nombrar solo algunos de los municipios auríferos más representativos (PNUMA y MADS, 2012).

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (PNUMA y MADS, 2012), la producción de oro en Colombia está concentrada en un 99,6% en trece departamentos. De acuerdo con las estadísticas históricas del Sistema de Información Minero Colombiano, los departamentos con mayor producción de

oro (...) han sido, en su orden, Antioquia, Chocó, Bolívar, Caldas, Cauca, Valle del Cauca, Tolima, Nariño, Córdoba, Santander, Risaralda, Putumayo y Huila.



**Figura 1.** Evolución de la producción nacional de oro

Fuente: Federarrollo. (2014). *Minería y Medio Ambiente en Colombia*.

Además de los departamentos anteriormente mencionados, en el país se encuentra minería de oro artesanal y de pequeña escala en Guainía, Quindío, Norte de Santander, Vaupés, Magdalena, Caquetá, Atlántico, Boyacá, Amazonas, Cundinamarca, Meta, y Cesar, aunque la producción de estos departamentos en conjunto es de apenas el 0,1% de la producción total nacional. (PNUMA y MADS, 2012, 12)

El Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero Energética (2007), afirma que: Colombia es un país con riquezas en oro cuya explotación se realiza en gran parte a pequeña escala y de manera artesanal.

La minería del oro artesanal y en pequeña escala es una fuente de ingresos importante para los mineros, especialmente en comunidades y regiones rurales donde las alternativas

económicas son sumamente limitadas. Hay por lo menos 100 millones de personas en más de 55 países que dependen de esta actividad para subsistir. Se cree que la minería del oro artesanal y en pequeña escala produce entre el 20% y el 30% del oro del mundo, es decir, entre 500 y 800 toneladas anuales. (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2008, p.04)

La explotación de los metales preciosos en Colombia por parte de mineros artesanales y de pequeños mineros se realiza de dos maneras: La informal (minería tradicional y/o minería de hecho y minería ilegal), que carece de títulos mineros o licencias ambientales, que incumple los requerimiento de seguridad social y de seguridad en los sitios de trabajo, y la minería formal, que cumple con la normativa minera, la ambiental y la de trabajo y que además es solidaria y responsable en el pago de impuestos y regalías. (PNUMA y MADS, 2012, p.12)

### **Minería Artesanal**

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012), entiende la “minería artesanal” como aquella minería que la ejercen personas naturales en la informalidad, que poseen muy baja capacidad de gestión y cuentan con tecnología precaria. Guisa (2011) afirma que: “ha sido definida como el conjunto de actividades mineras que se desarrollan de una manera rudimentaria, anti- técnica sin la

utilización de las técnicas convencionales de exploración geológica, perforación, reservas probadas, o de estudios de ingeniería” (p.111).

En Colombia este tipo de extracción la llevan a cabo grupos de individuos en áreas de explotación tradicional, hoy en día también en áreas inexploradas, siendo considerada una de las actividades extractivas de mayor informalidad en el país, ya que los mineros realizan su labor sin mediación de ningún tipo de título o permiso de explotación y en varios casos ni siquiera cuentan con aprobación de los dueños de los terrenos, lo que conlleva a conflictos de tierras y a alteraciones de orden social. Ya en el proceso de beneficio, el oro es recuperado generalmente de manera gravimétrica y/o con el uso del mercurio en muchos casos, sin llegar a etapas de recuperación un poco más avanzadas y complejas, como la separación por proceso metalúrgico, debido a que se realiza aún más rústicamente que la misma explotación, y predomina la mano de obra intensiva y no calificada; el uso de medios de concentración como bateas, canalones en tierra y madera, motobombas de muy baja potencia, trituración manual, molienda en pequeños molinos de bolas discontinuos (marranas, tarros, tambores o cocos), muchas veces incluyen mercurio en el beneficio, en especial para los minerales provenientes de yacimientos filonianos. Dentro de la minería artesanal aurífera en el país, algunos ejemplo son: el “barequeo”<sup>1</sup> en ríos y quebradas, el “machaqueo”<sup>2</sup> en sitios de explotación con depósitos

---

<sup>1</sup> Es la actividad que se contrae al lavado de arenas por medios manuales sin ninguna ayuda de maquinaria o medios

<sup>2</sup> Operación que consiste en explotar nuevamente las pilas de estériles o materiales residuales de explotaciones mayores.

residuales *in situ* o como sobrantes de las pilas de estériles de minería de mayor, el “descuñe”<sup>3</sup> de explotaciones abandonadas o en proceso de cerramiento y la explotación bajo tierra de yacimientos recién descubiertos. (PNUMA y MADS, 2012, p.07-08)

### **Minería de pequeña escala**

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012), denomina “minería de pequeña escala o pequeña minería”, al nivel inmediatamente superior a la minería artesanal; en este tipo de explotación y beneficio de minerales auríferos se observa un progreso, en cuanto a las técnicas y tecnologías aplicadas, en la inversión de capital, en la integración de explotaciones y en la necesidad de contar con licenciamiento minero y ambiental, sin embargo anteriormente este concepto se fundamentaba en el criterio de volumen de materiales útiles extraídos durante determinado periodo de tiempo, en la actualidad corresponde más a una apreciación de tamaño y organización de la explotación minera que a una clasificación válida en el ordenamiento minero nacional.

Así mismo, la pequeña minería también puede ser una forma de minería tradicional la cual ha sido definida como aquellas explotaciones de minas de propiedad estatal sin título minero y que acrediten los siguientes dos requisitos: a) que los trabajos mineros se hayan

---

<sup>3</sup> Operación minera orientada al aprovechamiento de yacimientos abandonados o de zonas parcialmente explotadas de yacimientos en operación; generalmente la explotación de estos reductos de mineral es ejecutada por pequeños mineros.

adelantado en forma continua durante cinco años y b) una existencia mínima de diez años anteriores a la vigencia de la Ley 1382 de 2010 (Decreto 2715 de 2010, art. 1). (Guisa, 2013, p.111)

En la minería de pequeña escala el uso de tecnología en su mayoría está dirigido a la operación de máquinas y motores (mecanización del oficio minero), sin embargo parte de los procesos aún se desarrolla manualmente. El uso de tecnología en explotación de aluviones y depósitos primarios auríferos se desarrolla de la siguiente manera:

En minería de pequeña escala, la explotación de aluviones auríferos está básicamente desarrollada con retroexcavadoras, buldóceres, volquetas, monitores y dragas de succión con diámetros de más de 3 pulgadas; por lo general, la concentración del oro en estas explotaciones se realiza por métodos gravimétricos; en algunas de éstas, los concentrados son amalgamados fuera de los canalones y en otras, la amalgamación se efectúa en circuito abierto al ambiente.

En la pequeña minería de depósitos primarios se observa el uso de perforación mecánica o eléctrica, ventiladores eléctricos, carretas, coches e incluso de skip; el beneficio de los metales preciosos obtenidos se realiza por medio de trituración, molienda en barriles, cocos, molinos californianos y molinos continuos; por su parte en el beneficio de los minerales se encuentran canalones, mesas de concentración, algunos jigs, concentradores en espiral y tanques de cianuración, entre otros dispositivos.

Dentro de lo expuesto en el proceso de beneficio del oro en aluviones y depósitos primario en minería de pequeña escala, la técnica de la amalgamación está presente aproximadamente en el 80% de las plantas de beneficio, convirtiendo este tipo de minería en una de las mayores fuentes de descarga de mercurio al ambiente. Teniendo en cuenta los conceptos expuestos como minería artesanal y minería de pequeña escala, se podría decir que:

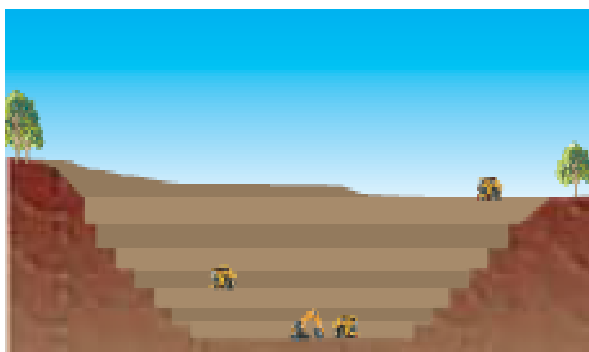
A diferencia de la minería artesanal, en la pequeña minería de oro se interiorizan ya conceptos de empresa e industria y adquieren importancia las actividades de mejoramiento en la recuperación de metales, introducción de la cianuración en el beneficio de oro, disminución de costos de operación y optimización de procesos, administración de recursos y personal y la integración o articulación entre mineros. (PNUMA y MADS, 2012, p.10)

## Clases de explotación minera

Según el Ministerio de Minas y Energía (2009), existen varios tipos de minería, dependiendo de la ubicación en la cual se encuentren los minerales y del modo de extracción del mismo que se emplee para obtenerlo.

### Minería a Tajo Abierto – Cielo Abierto

La explotación a cielo abierto se realiza cuando los yacimientos son de gran tamaño (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, 2011), en la cual el mineral metálico se extiende muy profundamente en el suelo, lo cual demanda la remoción de capas de excedente y mineral (Alianza mundial de derecho ambiental, 2010), esta mina presentan una forma regular, y están ubicados en la superficie o cerca de ésta, a simple vista se ve como un gran tazón, el cual se va construyendo en la medida en que la operación va avanzando, tanto lateralmente como en profundidad (SNMPE, 2011).



**Figura 2.** Minería a cielo abierto

Fuente: Ministerio de Minas y Energía (2009). *Así es la minería.*

A medida que se va trabajando, se genera una especie de anfiteatro (por su forma escalonada) cuya forma puede ir cambiando en la medida en que avanza la operación. La extracción del mineral empieza con:

La perforación y voladura de la roca, procesos que parten los bloques de roca concreta en pedazos más pequeños que se cargan en camiones con grandes palas eléctricas o hidráulicas, o con excavadoras, para ser retirados y clasificados en camiones de gran tonelaje. A medida que el tajo va creciendo se forman lo que se denominan bancos, que son como “escaleras” alrededor de las cuales se explota el mineral y que están conectadas a través de rampas entre ellas y hacia la superficie. El tajo abierto supone la extracción de todo el material de la zona donde se encuentra el mineral, y por lo tanto, de un gran volumen de rocas por lo que es necesario usar maquinaria y equipos de gran capacidad, lo que además es posible debido a que el espacio no está restringido como es el caso de las minas de socavón. (SNMPE, 2011, p.02)

Existen diversos métodos de explotación a cielo abierto. Entre ellos se puede destacar: cortas, transferencia, descubiertas, terrazas, contorno, canteras, graveras, minería hidráulica, lixiviación, especiales o mixtos (Universidad Politécnica de Madrid, 2006).

El material recolectado y clasificado con contenido metálico es transportado a la planta de beneficio para que posteriormente se le realicen los tratamientos físicos y químicos para obtener el mineral resultante (oro) (SNMPE, 2011).

Debido a que la minería a cielo abierto frecuentemente comprende la remoción de áreas con vegetación nativa, este es uno de los tipos de minería más destructivos ambientalmente, especialmente al interior de bosques tropicales. (Alianza mundial de derecho ambiental, 2010, p.04)

### **Minería de Socavón o Subterránea**

El Ministerio de Minas y Energía (2009) denomina la minería subterránea como: actividad que desarrolla su explotación en el interior de la tierra y puede profundizar en ella a través de túneles, ya sean verticales u horizontales.



**Figura 3.** *Minería subterránea*

**Fuente:** Oyarzun, Higuera, y Lillo. (2011). *Minería Ambiental: Una introducción a los Impactos y su Remediación.*

Este tipo de minería se hace cuando la cubierta de rocas es de un espesor tal que el costo de removerlo a cielo abierto no es viable económicamente. Se usa cuando las zonas mineralizadas son angostas, por lo que se hace preferible hacer perforaciones en la roca para acceder a las mismas (SNMPE. 2011).

Según la Alianza Mundial de Derecho Ambiental (2010), en la minería subterránea se retira una cantidad mínima de material sobre capa o excedente para tener acceso al yacimiento de mineral. El acceso al depósito de mineral se logra mediante un túnel. “Seguido por el túnel entran las personas que trabajarán en la mina y entran la maquinaria, para que al excavar, se pueda sacar encoches a la superficie” (Ministerio de Minas y Energía, 2009, p.06).

Los conductos, o socavones verticales conducen a una red horizontal de túneles que tienen acceso directo al mineral. Por el método minero de excavación de galerías, secciones o bloques de roca son retirados en pilas verticales que crean una cavidad subterránea la que por lo general se llena con un agregado de cemento y roca de desecho. (Alianza mundial de derecho ambiental, 2010, p.05)

Existen diversos métodos de explotación subterránea (...). Entre ellos se puede destacar: Cámaras y Pilares, Tajeo por sub-niveles, Cráteres Invertidos, Corte y Relleno, Almacenamiento Provisional, etc. Éstos básicamente permiten extraer el mineral de los socavones (...) para luego, al igual que en el caso de una mina a cielo abierto, llevar el mineral a la planta de beneficio para su tratamiento (SNMPE, 2011).

Si bien la minería subterránea es un medio menos destructivo de acceder al yacimiento de mineral, conlleva riesgos a la seguridad mucho más grandes que la minería superficial (Alianza mundial de derecho ambiental, 2010).

## **Beneficio del mineral (Amalgamación)**

En la minería artesanal y de pequeña escala en su mayoría utiliza el mercurio en los procesos de beneficio del oro (PNUMA y MADS, 2012). “En Latinoamérica, la amalgamación es la técnica para extraer el oro que emplean más de un millón de pequeños mineros -250.000 en Colombia-; su uso tan generalizado se debe a que requiere poca tecnología y poca inversión de capital” (Muñoz, García, y Rodríguez, 2012, p.54).

La minería artesanal, de pequeña y mediana escala en Colombia usa la amalgamación como proceso para extraer el oro de las rocas arena u otro material que lo contenga, lo utilizan por facilidad, rapidez y economía en la recuperación del oro libre, por lo cual prefiere en muchos casos este proceso sobre otras técnicas (PNUMA y MADS, 2012).

La amalgamación puede llevarse en flujo abierto en la trituración, la molienda y la concentración en canaletas y planchas amalgamadoras, o en circuito cerrado en el lavado del material procesado y concentrados, en barriles o tambores amalgamadores.

(Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero Energética, 2007, p.11)

Esta técnica consiste en agregar mercurio (azogue) sobre el mineral explotado o procesado, posteriormente a través de movimientos de la masa permite que se unan, formando la amalgama (aleación oro – mercurio) de color blanco brillante y viscosa, luego esta masa se coloca sobre mallas y mediante presión se retira el exceso de mercurio. Esta pasta de metal precioso y mercurio (amalgama), se recupera en la fundición y refinación mediante el calentamiento de la amalgama y el mercurio elemental es evaporado y queda el oro. En la

separación de oro (Au) y mercurio (Hg) generalmente se pierde algo del mercurio (Hg) que hace parte de la amalgama (MME y UPME, 2007; PNUMA y MADS, 2012).

### **Minería en el Municipio de Marmato, Caldas**

El municipio de Marmato ubicado dentro del departamento de Caldas, más conocido como "Pesebre de oro de Colombia", fue elegido como referente en la presente investigación bibliográfica para la aplicación de la fitorremediación, porque es uno de los municipio más emblemáticos del país por su tradición minera aurífera; esta actividad se desarrolla cerca a la fuente hídrica Quebrada Cascabel contaminada por mercurio proveniente de los procesos de minería de oro.

El municipio de Marmato se localiza al noroccidente del departamento de Caldas, en el flanco oriental de la cordillera occidental y en la vertiente occidental del río Cauca, topográficamente se encuentra en el occidente del relieve conocido como el macizo de los mellizos. Sus coordenadas son 5° grados 29 minutos de latitud norte y 75° grados 36 minutos de longitud oeste. Está ubicado a una altura de 1.310 metros sobre el nivel del mar (Alcaldía de Marmato-Caldas, 2016).

Es el municipio más pequeño del departamento de Caldas y tiene una extensión de 41 kilómetros cuadrados; 17.9 has de terreno urbano y 4.063 has de terreno rural.

Reconocido por su potencial aurífero, Marmato es un municipio que hace parte de la subregión del Alto Occidente del Departamento de Caldas. (Gómez y Rojas, 2014, p.25)

Ha sido reconocido históricamente por su potencial aurífero debido a que el municipio de Marmato ha sustentado su economía en la explotación minera, constituyéndose esta actividad en la principal fuente de ingresos y empleo para sus habitantes. Los ingresos varían de acuerdo a la cantidad y calidad del oro extraído. Marmato es el primer productor de oro en el departamento de Caldas y el más antiguo del país (Alcaldía de Marmato-Caldas, 2016).

Según la Alcaldía de Marmato (2016), los sistemas de explotación siguen siendo tan rudimentarios como en el siglo XVI. Las perforaciones se hacen con taladros manuales, el transporte del material hasta la bocamina, se sigue haciendo en coches empujados por hombres; en los entables de propiedad del estado, la trituración del material aún se hace en los viejos molinos californianos.

### **Conflicto social en Marmato por actividad minera**

Los primeros españoles en cruzar el territorio Marmateño se dieron cuenta de la riqueza aurífera, cuya población paradójicamente tiene los indicadores de pobreza más altos del departamento y con un preocupante deterioro de la calidad de vida de sus habitantes ( Lizcano, 2010).

El municipio se extiende únicamente alrededor de un cerro que guarda en sus entrañas la leyenda del Dorado y que hoy se cree que es una de las reservas más grandes del metal precioso que queda en el mundo. Hace más de cincuenta años, para controlar la fiebre del oro, la montaña se dividió en dos: la parte alta era para los pequeños mineros y la baja para las grandes empresas. Los problemas comenzaron cuando esa frontera invisible se perdió (Castro, 2014).

En Marmato, los títulos solían repartirse con generosidad y descuido: cualquiera que cavara un túnel recibía uno con solo mostrar la cédula. Quien tiene una licencia puede venderla, pero si es desalojada vuelve a manos del Estado y este debe cederla nuevamente sin cobrar un peso. En ese ir y venir de títulos mineros llegó a Caldas Gran Colombia Gold, que a medida que se expande por la montaña da a conocer su interés por explotarla a cielo abierto; es decir, cercenándola de arriba abajo. (Roldán, 2014)

Tratar de entender la situación de Marmato es como intentar armar un rompecabezas de dos mil piezas que no encajan. Antes de que Gran Colombia Gold se proclamara dueña de decenas de títulos mineros, muchos de ellos estuvieron en manos de Mineros de Caldas, luego de Colombia Goldfields y posteriormente de Medoro Resources –que se fusionaría con Gran Colombia Gold con el objetivo de tener el músculo suficiente para realizar proyectos mineros a gran escala–. En ese juego de relevos, los más de nueve mil habitantes de Marmato, que desde hace 400 años sacan oro de su tierra, han perdido el derecho sobre ella, ya que fueron vendiendo sus licencias de explotación. Por eso ahora viven con miedo de que las grandes empresas, en su urgencia económica, los obliguen a trasladarse lejos de la montaña que les permite subsistir (Roldán, 2014).

La relación entre los pobladores y las empresas es tortuosa, cada cual tiene una versión de los hechos. Se contradicen entre sí, se enredan y se desenredan, se defienden y se atacan. Gran Colombia Gold alega tener libertad de acción sobre las minas porque es dueña de los títulos y asegura –con excesiva reiteración– que opera «en cumplimiento de la ley y bajo los más altos estándares de ética, integridad y seguridad para los empleados, las comunidades y el ambiente», lo contrario a la comunidad, donde dicen que esta y las demás empresas que pasaron por sus

tierras llegaron, ultrajaron su cultura, no tuvieron en consideración sus necesidades y manipularon la ley a su gusto para vulnerar sus derechos (Roldán , 2014).

### **Tipos de minería en Marmato Caldas**

Según (Ángel y Alvear, 2013) en el municipio de Marmato se pueden evidenciar dos tipos de minería:

**Minería artesanal:** Consiste en el trabajo individual o familiar, el proceso de explotación es físico y se realiza grupalmente. Esta actividad se utiliza como un medio de sustento; por lo general, se ubican en las quebradas, en donde las actividades y sistemas de explotación se realizan de manera rudimentaria generando altos niveles de contaminación en los recursos naturales, principalmente al recurso hídrico.

**Minería a Pequeña Escala:** Es un sistema más tecnificado, que para realizarlo se necesita de una inversión más fuerte en equipos tecnológicos y maquinaria pesada.

### **Métodos de explotación**

#### **Subterráneo.**

El sistema de explotación del mineral, en el municipio de Marmato es subterráneo, por ser minería de filón, operación realizada de forma manual, empleando taladros, martillos

y barras; las voladuras, para las aperturas de los sitios de explotación se realizan utilizando explosivos. (Gómez y Rojas, 2014, p.134)

El material dentro de las minas, es transportado en vagones o carretas hasta la boca mina, empujados por hombres, luego para ser llevado a los molinos, se transporta en cable aéreo, el cual funciona por gravedad, volquetas o a lomo de mula. (Gómez y Rojas, 2014, p.134)

Según Hetner (como se citó en Ángel y Alvear, 2013), la topografía del terreno facilita la explotación, por la marcada pendiente, esto permite atacar los yacimientos sencillamente por medio de socavones abiertos desde la pendiente con varios pisos, uno encima del otro, de tal manera que a su paso van cruzando los diferentes filones, simplificando así considerablemente los trabajos tanto de extracción como de desagüe. Otra ventaja que tiene Marmato es la composición de su mineral ya que este permite refinarlo por medio de amalgamación, no requiere su fundición.

En general la actividad minera en Marmato, se realiza de manera indiscriminada con sistemas artesanales y obsoletos, conformado por 230 minas en actividad y 20 molinos de beneficio, de los cuales tres son propiedad del estado, que trabajan a menos de la mitad de su capacidad, por causa de la mala administración y mantenimiento; situación que obliga a los pequeños mineros, a utilizar las plantas de los particulares para beneficiar el oro, incrementando costos de producción, pero que a la larga se obtienen otros beneficios, por el uso de equipos más tecnificados y eficientes (Alcaldía de Marmato-Caldas, 2016).

**Barequeo.**

Según el Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres (2013), el barequeo en Marmato es la actividad que se contrae por el lavado de arenas de forma artesanal por medios manuales sin ninguna ayuda de maquinaria o medios mecánicos y con el objeto de separar y recoger el oro contenido en dichas arenas.” Extrayendo los materiales concentrados en la quebrada, que se pierden en el proceso de beneficio de la minería de filón de la parte alta” (Grajales, 2014, p.95).

En el municipio también tiene lugar el barequeo, mazamorreo, o minería de subsistencia, que consiste en la extracción de oro en aluviones sin ayuda de maquinaria, pues es fundamentalmente un trabajo manual que sólo requiere de algunos elementos básicos: un cajón de madera, un saco o talego, una malla metálica, una pica y una batea para separar el oro. Esta práctica se lleva a cabo en los cañones por donde descenden los residuos del proceso de beneficio del oro de veta y también aquellos resultantes de la erosión en las tierras con contenido de metales preciosos. (Ramírez, 2012, p.100)

Los impactos antrópicos generados productos de la actividad minera, han generado condiciones de amenaza y riesgo por flujo de escombros (estériles) en las quebradas foco de la actividad. Sumado a esto, se presentan la actividad en áreas que forman parte de los sistemas de aprovisionamiento de los servicios públicos, en la cabecera municipal y en zonas no aluviales - no incluidas dentro de la legalidad de la actividad- barequeros

lugares en los cuales está prohibida la actividad. (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2013, p.22)

“Los menores se ocupan tanto en la minería de socavón como en el barequeo –siendo ésta última modalidad de extracción la más común entre ellos, asumida socialmente como una forma útil de “uso del tiempo libre” (Ramírez, 2012, p.101).

### Uso de mercurio en el municipio de Marmato para recuperación de oro

DISTRITOS MINEROS	Uso promedio de mercurio g Hg / g de oro recuperado	
	FILÓN	ALUVIÓN
El Tambo - Buenos Aires, Costa Pacífica Sur, La Llanada, Mercaderes, Tesalia - Aipe, Cali- El Dovio, Ataco - Payandé, Vetas, Putumayo	14,6	13,5
Frontino	27,7	-
Itsmína	-	7,0
Lobas, Magdalena Medio Bolivarense, Mojana Bolivarense	97,5	11,1
Montelíbano	5,7	6,4
Nordeste Antioqueño	25,0	9,7
Vetas - California	3,3	-
Marmato	17,2	-

**Tabla 1.** Valores promedio de uso de mercurio (Hg) en distintos distritos mineros

Fuente: PNUMA y MADS (2012)

De acuerdo con lo anterior, para la estimación de uso de mercurio en la minería aurífera artesanal y de pequeña escala y teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas, se aplican la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
 \text{Uso anual de mercurio (kg)} &= \text{Producción de oro anual (kg)} * \frac{100 \text{ kg oro Ley 750}}{75 \text{ kg oro Ley 999,99}} * \frac{75}{100} * \\
 & \left[ \frac{A \text{ kg Hg}}{\text{kg oro}} (\% \text{Filón}) + \frac{B \text{ kg Hg}}{\text{kg oro}} (\% \text{Aluvión}) \right]
 \end{aligned}$$

Fuente: PNUMA y MADS (2012)

DEPARTAMENTO	PRODUCCIÓN DE ORO POR DEPARTAMENTO (kg)	USO DE MERCURIO (kg)
	2011	
Antioquia (*)	12.935,2	170.835
Bolívar	5.423,0	304.404
Caldas(**)	1.273,1	Sin cuantificar
Cauca	1.127,6	15.806
Chocó	27.915,1	195.406
Córdoba	69,2	443
Huila	30,1	436
Nariño	235,8	3.238
Putumayo	73,7	1.012
Risaralda	36,0	526
Santander	60,4	199
Tolima	268,9	3.843
Valle del Cauca	200,6	2.847

**Tabla 2.** Uso de mercurio en los principales departamentos mineros en 2011.

Fuente: PNUMA y MADS (2012)

(\*) Valor de producción de oro incluye la gran minería, Gran Colombia Gold y Mineros S.A (Que no utilizan mercurio).

(\*\*) En Marmato y Riosucio; únicamente hay usos de mercurio en pequeñas minas de aluvión (Retros y cúbcicos o explotaciones subterráneas en aluviones). Pero no se han cuantificado.

Un cálculo más riguroso de los usos de mercurio en la minería aurífera artesanal y de pequeña escala que utiliza este metal se podría hacer si se contara con inventarios reales y actualizados del número de minas, entables y plantas de beneficio de oro y se tuviera información cuantitativa sobre los procesos y técnicas que aplican para la recuperación del oro. El país no cuenta con la compilación de dicha información y su recolección es compleja dada las particularidades del sector tales como la informalidad y la ubicación en zonas geográficas donde se presenta conflicto armado, por mencionar algunas y esto

aunado a la baja capacidad del Estado para realizar este tipo de tareas. (MADS y PNUMA, 2012, p.26)

Una investigación de la Contraloría General de la República concluye que la contaminación con mercurio avanza de forma descontrolada, sobre todo en escenarios con complejos problemas de orden público y desórdenes ambientales en el país, entre los municipios registrados se encuentra Marmato caldas (Silva, 2014).

Según la Contraloría General del Nación (2014), se encontraron algunas situaciones de debilidad institucional en varios puntos relacionados con el control de mercurio, la calidad de las aguas para consumo y para servicios ambientales, donde la CGR establece según una resolución del IDEAM que ninguna Corporación Autónoma Regional se encuentra a esta fecha acreditada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales, para el análisis de mercurio en aguas , sedimentos y lodos, ni se están realizando monitoreos de las concentraciones de mercurio y cianuro de las cuencas hidrográficas.

### **Recurso Hídrico de Marmato influenciado por la minería aurífera**

“El municipio de Marmato se encuentra ubicado en la cuenca del Río Cauca, haciendo parte de esta la Subcuenca de La Quebrada Marmato, que a su vez se encuentra conformada por las Microcuencas: Quebrada Cascabel, Aguas Claras, Pantanos y Seca” (Ángel y Alvear, 2013,p.24).

## Quebrada Cascabel

La microcuenca de la quebrada Cascabel ha sido una de las principales fuentes hídricas de Marmato, utilizada en su nacimiento para el abastecimiento de consumo humano y actividades agropecuarias para una parte de su población y en su trayectoria hasta la desembocadura en el Río Cauca como suministro y vertedero de la actividad aurífera realizada en la zona. (Ángel y Alvear, 2013, p.88)

La Microcuenca de la quebrada Cascabel, posee un área total de 5.3 Ha, con laderas de pendientes mayores al 35%, está ubicada en las coordenadas 830777E y 1097228N que corresponde a su nacimiento y 833394E y 1095900N en la desembocadura al río Cauca donde llega como Quebrada Marmato. Corpocaldas y Fundación Sanear (como se citó en Ángel y Alvear, 2013)

La minería para el municipio de Marmato, está representada por una minería artesanal a pequeña escala. Predominando pequeñas empresas administradas directamente por los titulares de los derechos mineros, arrendamientos de las minas y dentro de la misma mina a terceros. Según los resultados del estudio denominado caracterización, evaluación y modelación de la calidad del agua quebrada cascabel y aguas claras del municipio de Marmato, realizado por la Fundación Sanear y Corpocaldas; las descargas de los subproductos de la extracción y el beneficio del oro contaminan el agua de la quebrada cascabel con la descarga de sustancias tóxicas, lodos cianurados, sólidos inertes, aguas residuales entre otros, deteriorando la calidad del agua y usos potenciales de la quebrada.

Otro de los problemas identificados según el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio, consiste en el fuerte grado de contaminación en el río Cauca, esto se debe a que:

A lo largo del río, desembocan corrientes hídricas tales como la quebrada Cascabel en las que se realizan descargas de algunos desechos tóxicos producto de la minería y aguas residuales domésticas sin ningún tipo de tratamiento, ocasionando que sus aguas no sean aptas para el consumo humano. (Gómez y Rojas, 2014, p.22-23)

### Concentración de mercurio en la quebrada Cascabel

ESTACIONES		COORDENADAS		Mercurio (ug/L)	pH (UNID)	T °C Agua	SST (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	Dureza (mg/L)
		ESTE	NORTE						
Q. Cascabel antes de la desembocadura a la Q. Pantanos	E-2	8E+05	1096886	Menor a 0,5	6-8	0-30	Menor o igual a 500	Rango entre 100 y 250	Rango entre 0 y 150
Q. Cascabel antes de la desembocadura a la Q. Aguas Claras	T-3	8E+05	1096151						
TRIBUTARIO		ESTE	NORTE						
Quebrada Pantanos	T-2	8E+05	1096900						

**Tabla 3.** Valores típicos para aguas superficiales establecidos por la UNESCO

**Fuente:** Corpocaldas, Fundación Sanear, 2011 (como se citó en Gómez y Rojas, 2014)

ESTACIONES		COORDENADAS		Mercurio (ug/L)	pH (UNID)	T °C Agua	SST (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	Dureza (mg/L)
		ESTE	NORTE						
Q. Cascabel antes de la desembocadura a la Q. Pantanos	E-2	8E+05	1096886	3,96	6,51	25,6	10546	250,0	900
Q. Cascabel antes de la desembocadura a la Q. Aguas Claras	T-3	8E+05	1096151	2,54	7,15	25,7	13954	165	700
TRIBUTARIO		ESTE	NORTE						
Quebrada Pantanos	T-2	8E+05	1096900	3,26	6,51	25,0	34.660	190	1.700

**Tabla 4.** Resultados de cada uno de los parámetros determinantes de la calidad del agua de la quebrada Cascabel

**Fuente:** Corpocaldas, Fundación Sanear, 2011 (como se citó en Gómez y Rojas, 2014)

De acuerdo a los estudios realizados por SANEAR y CORPOCALDAS, 2011 (como se citó en Gómez y Rojas, 2014) el Índice de calidad de agua de la quebrada es mala.

ESTACIONES	VALOR ICA	CLASIFICACIÓN ICA
<b>Q. Cascabel antes de la Descarga de la Q. Pantanos (E2)</b>	<b>24,7</b>	<b>Mala</b>
<b>Cascabel antes de la Descarga de la Q. Aguas Claras (E3)</b>	<b>24,4</b>	<b>Mala</b>

**Tabla 5.** Índice de Calidad de Agua ICA para la Quebrada Cascabel

**Fuente:** Corpocaldas, Fundación Sanear, 2011 (como se citó en Gómez y Rojas, 2014)

## **Problemática ambiental y de salud pública en Marmato**

En una investigación que realizó la Contraloría de la Republica concluye que la contaminación por mercurio, producto de la extracción del oro, está afectando diferentes fuentes hídricas del país, además advierte una alerta de salud pública por la acumulación del mercurio en los peces que son ingeridos por los lugareños provocando, en algunos de ellos, temblores en las manos, pérdida de memoria y disminución de su coeficiente intelectual, los municipios afectados en Caldas son: Villamaria, Marmato y Supía (Silva, 2014).

## **Principales impactos ambientales generados de la actividad minera**

El sector minero aurífero ha traído cuantiosos beneficios económicos a Colombia, sin embargo también ha dejado daños definitivos al medio ambiente, afectaciones a la salud de la población de los lugares donde se realiza la actividad y ha perturbado el equilibrio social e incluso la seguridad nacional; ha provocado la proliferación de explotaciones ilegales (PNUMA y MADS, 2012).

En la extracción o explotación de la minería aurífera, alguno daños de la minería a cielo abierto se originan cuando después de definir los sitios interés, mediante una prospección somera, se talan los bosques y la maquinaria empieza a retirar la capa vegetal y el estéril que recubren las capas de importancia económica; estos materiales se depositan sin ningún orden aportando sedimentos en los ríos y en efluentes cercanos e interviniendo sin control grandes áreas, por otro lado las explotaciones con motobombas o monitores desprenden y lavan el material del flanco de una montaña o de terrazas cerca de las orillas de los ríos o quebradas. El

mineral se beneficia en un canalón donde se deposita mercurio, con pérdidas de oro fino y produciendo contaminación y sedimentación en suelos y aguas (MME y UPME, 2007).

Debido a la ya mencionada tala de bosques y retiro de la capa vegetal los efectos más complejos en la vida silvestre son la destrucción o desplazamiento de diversas especies, pues mucha de esta vida silvestre depende altamente de la vegetación, las necesidades de hábitat de muchas especies no le permite acondicionarse a los cambios como resultado de las perturbaciones causadas por esta actividad, reduciendo drásticamente su espacio vital (Alianza mundial de derecho ambiental, 2010).

En el beneficio de la minería aurífera se da principalmente porque: “En Colombia, las plantas, beneficiaderos o entables están construidos, en la mayoría de los casos, cerca de ríos y quebradas, en el mismo sitio se localizan los campamentos y casetas para guardar explosivos, equipos, herramientas e insumos” (MME y UPME, 2007, p.11).

Los montajes en algunas minas lo constituyen también tolvas, trituradoras, molinos y clasificadores que separan el material grueso del fino, este material pasa a los canalones, construidos en madera o metal con fondos de mallas (costales de fique) y trampas donde se agrega sin control, cantidades de mercurio para amalgamar principalmente el oro fino. Los residuos o colas de estos canalones que en muchos casos contienen importantes cantidades de oro y mercurio, van directamente a quebradas y ríos cercanos. (MME y UPME, 2007, p.11)

En las fases de amalgamación, fundición y refinación se producen emisiones de mercurio en forma elemental y de vapor durante la separación oro - mercurio especialmente en el

momento de la quema abierta, fuente de mayores emisiones. También existen emanaciones debido a derrames por la mala manipulación de este elemento en el almacenamiento y el transporte. (MME y UPME, 2007, p.11)

Las fuentes de emisiones de ruido asociadas con la minería de oro pueden incluir motores de vehículos, carga y descarga de rocas, voladuras, generación de energía, entre otras fuentes relacionadas con la construcción y actividades de la mina. (Alianza mundial de derecho ambiental, 2010, p.13)

### **Mercurio como metal pesado**

Los “metales pesados” son aquellos elementos químicos con una densidad igual o superior a  $5 \text{ g cm}^{-3}$ , cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos) (Navarro, Alonso y López, 2007). “Prácticamente todos los metales en transición pueden considerarse metales pesados” (Domènech y Peral, 2006, p.120). Excepciones a esta definición son el titanio (Ti), con una densidad muy inferior, pero también se le considera metal pesado y el arsénico (As) que a pesar de ser considerado no metal, pero por su elevada densidad y otras características, se suele clasificar también como metal pesado (Domènech y Peral, 2006).

“Los metales pesados agrupan sustancias como cadmio y mercurio, principales contaminantes dentro de este grupo de sustancias, además de otras como cromo, cobalto, cobre, molibdeno, níquel, plomo, estaño, titanio, vanadio, zinc o plata” (Mancera y Álvarez, 2006, p.04). Sin embargo son considerados dentro de los mayores agentes tóxicos asociados a

contaminación ambiental e industrial los metales pesados: cadmio, plomo y zinc, junto al mercurio (Mancera y Álvarez, 2006).

El Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero Energética (2007) define el mercurio como un metal noble pesado del grupo IIB, su símbolo Hg y su peso atómico es de 200,59. Es de color blanco plateado y su punto de fusión es de 38,4°C. Ebulle a 357 °C a presión atmosférica. “En diferentes contextos, al mercurio se le llama con frecuencia azogue, mercurio metálico o mercurio líquido. Comúnmente, sin embargo, el mercurio puro se denomina mercurio elemental” (Weinberg, 2010, p 09).

El mercurio (Hg) existe en diferentes formas Trascendencia del metilmercurio en el ambiente, la alimentación y la salud humana 110 físicas y químicas con una gran variedad de propiedades que determinan su compleja distribución, su enriquecimiento biológico y su toxicidad. Las formas químicas más importantes son el mercurio elemental (Hg<sub>0</sub>), el mercurio inorgánico (Hg<sup>2+</sup>), sus formas orgánicas como el catión metilmercurio (MeHg, CH<sub>3</sub> Hg<sup>+</sup>) y el dimetilmercurio (DMHg, CH<sub>3</sub>HgCH<sub>3</sub>). (León y Peñuela, 2011, p110-111)

El mercurio es un metal que se caracteriza por ser líquido inodoro a temperatura ambiente. Forma aleaciones con casi todos los metales, llamadas amalgamas, entre las que se destacan las de oro y plata. Al ser un metal líquido, siempre está en equilibrio con su presión de vapor, por lo que se volatiliza fácilmente. En la naturaleza el mercurio se encuentra asociado a otros elementos como el azufre, por ejemplo el cinabrio, mineral rojizo de la clase de los sulfuros, está compuesto por 85% de mercurio y 15% de azufre en

masa.(Centro Coordinador Convenio Basilea & Centro Regional Convenio de Estocolmo para América Latina y el Caribe, 2014, p.06).

La toxicidad de los metales como el mercurio depende de la concentración, forma química y de la persistencia en que se encuentren en el medio (Domènech. y Peral, 2006; Navarro, et al., 2007).

Los metales pesados son considerados como muy peligrosos para todos los seres vivos, pues poseen una gran toxicidad, debido principalmente a su tendencia de bioacumularse, esta toxicidad es causada generalmente por la imposibilidad del organismo afectado para mantener los niveles necesarios de excreción, ya que son sustancias con una gran estabilidad química ante los procesos de biodegradación, por lo que los seres vivos son incapaces de metabolizarlo, esto se ve agravado durante el paso por las diferentes cadenas tróficas, pues este se va incrementando, siendo en los organismo superiores donde se hallan mayores niveles de los contaminantes, por lo que se biomagnifica (Mancera y Álvarez, 2006; Navarro, et al., 2007).

## **Fuentes**

El mercurio (Hg) puede ser encontrado en el medioambiente a partir de diversas fuentes de procedencia, incluyendo fuentes naturales y antropogénicas (Paisio et al., 2012).

El mercurio es liberado a la atmósfera por fuentes naturales como incendios forestales, vapores del suelo, rocas, aguas superficiales, emisiones volcánicas (Ministerio de minas y energía &UPME, 2007) y existe de manera natural en la corteza terrestre (Weinberg, 2010).

Varios tipos de actividades humanas liberan mercurio en el medio ambiente (Weinberg, 2010), como procesos de amalgamación en el beneficio y recuperación del oro en la minería, ruptura de equipos de medición con mercurio, equipos de medicina, odontología, industria farmacéutica, química, agroquímica, de pinturas, quema de fuentes locales como incineración de basuras y residuos industriales, entre otros (Ministerio de minas y energía &UPME, 2007).

Sin embargo en la actualidad, el mayor uso intencional del mercurio corresponde a la actividad de los mineros de oro artesanales y de pequeña escala (Weinberg, 2010).

Respecto de las fuentes de procedencia antropogénicas, las actividades mineras son una de las principales vías de ingreso directo de Hg dentro del ambiente, particularmente las de explotación de oro y plata (Paisio et al., 2012).

### **Efectos del mercurio en la salud**

Según el Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente, 2011, El mercurio es un metal pesado, y como todos ellos, es tóxico o venenoso a muy bajas concentraciones, y no puede ser degradado o destruido.

El mercurio tiene variados efectos adversos sobre la salud; sus compuestos son altamente tóxicos, especialmente para el sistema nervioso en desarrollo (Raimann, Rodríguez, Chávez, y Torrejon, 2014), también malformaciones congénitas e incluso la muerte (Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente, 2011).

El ingreso del mercurio se da por vías: respiratorias (inhalación), digestiva (ingestión) y cutánea (contacto) (Raimann et al., 2014). Según el Ministerio de Agricultura, Alimentación y

Medio Ambiente de España (2012), la principal vía de exposición es por inhalación de vapores que son absorbidos por los tejidos pulmonares, inhalar esta sustancia continuamente puede causar trastornos neurológicos y de comportamiento, los síntomas asociados son temblores, desequilibrio del sueño, pérdida de memoria, cambios en sistema neuromuscular, dolores de cabeza y puede afectar también los riñones y la tiroides.

La vía de exposición que más debe preocupar a los mineros es la inhalación del vapor de mercurio que se libera durante la quema de las amalgamas que a menudo se realiza en presencia de otras personas o incluso en el hogar. (Español, 2012, p 02)

Cuando se da por vía digestiva “Los signos de toxicidad en la exposición aguda vía digestiva progresan desde parestesias a ataxia y debilidad generalizada, luego disminución de visión y audición, espasticidad muscular, coma y muerte”. (Raimann et al., 2014, p. 1175)

El ingreso del mercurio vía digestiva generalmente se da por el consumo de agua y pescado, el mercurio se encuentra en forma predominante como metilmercurio en algunos peces, las especies predatoras acumulan elevadas cantidades de mercurio mediante ingesta a lo largo de toda su vida, a través de la cadena alimenticia finalmente es consumido por el ser humano (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, 2012).

Por la digestión: Si se trata de mercurio elemental, el sistema digestivo absorbe entre el 2% al 7% del mercurio ingerido. Pero si se trata de mercurio bajo sus formas oxidadas

(...) se absorbe el 95% del mercurio ingerido. Si el mercurio ingerido está bajo la forma de metilmercurio, éste se absorbe en un 100% a nivel del intestino delgado principalmente. (Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente, 2011, p 30)

La vía cutánea es por contacto. Bajo cualquiera de sus formas o estados, el mercurio atraviesa la piel y se acumula en los tejidos (Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente, 2011).

El nivel de toxicidad del mercurio en seres humanos y otros organismos varía según la forma química, cantidad, vía de exposición y vulnerabilidad de la persona expuesta (Raimann et al., 2014), “siendo el metilmercurio (MeHg) más tóxico que el mercurio elemental y sus sales inorgánicas, ya que es absorbido eficientemente en el tracto gastrointestinal, pasa de la sangre al cerebro (...), afectando el sistema nervioso central causando daños irreversibles” (León y Peñuela, 2011, p.110).

La eliminación del metilmercurio del organismo es muy lenta, debido a la bioacumulación, esta se elimina por medio de la orina (Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente, 2011).

### **Enfermedad de Minamata.**

La enfermedad de Minamata es un padecimiento grave y a menudo mortal, producida por la exposición a altos niveles de metilmercurio, causada por la ingesta diaria de pescados y mariscos contaminados con metilmercurio. (Weinberg, 2010; Blesa y Castro, 2015). “Se asocia

con puntos álgidos de contaminación aguda por mercurio causada por ciertos procesos industriales y por residuos contaminados con mercurio” (Weinberg, 2010, p.22).

El brote de la enfermedad de Minamata ocurrió en Japón en el área costera del mar de Yatsushiro, especialmente en la bahía de Minamata, en unas aldeas pesqueras, en la Prefectura de Kumamondo, esto ocurrió en la década de los años cincuenta, donde cientos de pescadores y sus familias residentes de la Bahía, fueron gravemente intoxicados por metilmercurio el cual se había bioacumulado y biomagnificado en los peces como resultado de la liberación en la bahía de desechos de mercurio por una planta química llamada Chisso (Calderón, 2007; Weinberg, 2010; Blesa y Castro, 2015).

Durante años la compañía Chisso usó sulfato de mercurio y cloruro de mercurio como catalizadores en la producción de acetaldehído y de cloruro de vinilo (Weinberg, 2010), “El proceso usaba óxido de mercurio como catalizador” (Blesa y Castro, 2015, p.92). “Parte de ese mercurio era convertido en las condiciones de proceso en metilmercurio” (Blesa y Castro, 2015, p.92).

Esta compañía descargó al mar las aguas residuales, las cuales contenían mercurio mercurio inorgánico y metilmercurio (Weinberg, 2010; Blesa y Castro, 2015).

Los pacientes afectados por la enfermedad de Minamata sufrían parestesia, temblores, alteraciones sensoriales y de la audición (Calderón, 2007). “No podían correr ni caminar sin trastabillar y tenían dificultades para ver, oír y tragar, una alta proporción de ellos murió” (Weinberg, 2010, p.22).

Sin embargo, la manifestación más dramática de esta enfermedad, se presentó en niños que nacieron de madres con altas concentraciones de mercurio, nacían con parálisis cerebral, ceguera y retardo mental (Calderón, 2007).

La descarga comenzó en la década de 1930, pero los efectos clínicos fueron observados mucho más tarde, a partir de 1956 y recién en 1959 pudo establecerse una relación causal con los niveles de mercurio en el agua de la bahía. (Blesa y Castro, 2015, p.22)

### **Convenio Minamata.**

Ante la necesidad urgente de adoptar medidas, a nivel internacional, para el uso restringido del mercurio, en febrero del 2009 el entonces Consejo de Administración del PNUMA decidió iniciar el proceso de negociación hacia un instrumento vinculante sobre el mercurio. Así fue como el Comité Intergubernamental de Negociación (CIN) con el apoyo de la Subdivisión de Productos Químicos, División de Tecnología, Industria y Economía (DTIE) del PNUMA asumió esta labor. Todos los gobiernos fueron invitados a participar en el CIN; mientras que las organizaciones intergubernamentales y organizaciones no gubernamentales participaron como observadores. El resultado de las reuniones del CIN fue el texto del instrumento jurídicamente vinculante sobre mercurio llamado Convenio de Minamata sobre el Mercurio, en alusión al episodio de contaminación por mercurio que tuvo lugar en esta localidad de Japón. (Ministerio de Ambiente Perú, 2015, p.26)

Si de los problemas se pasa a las propuestas, poner el ojo en el mercurio también puede dar pistas sobre acciones políticas urgentes. Ya se dieron los primeros pasos con la ley nacional que ordena que en 10 años todas las industrias dejen de usar mercurio, la ratificación

Colombiana del Convenio de Minamata que prohíbe el comercio de mercurio desde 2020 y el reciente plan gubernamental contra la minería ilegal (Rodríguez, 2015). “Estos temas plantean importantes desafíos para muchos de los países de la región, por ejemplo para reducir el uso del mercurio en la minería de oro artesanal y en pequeña escala” (CCCB y CRCE, 2014, p.04).

### **Implicaciones del mercurio por la actividad minera aurífera**

Los métodos de recuperación del oro fino más difundidos son precisamente los más contaminantes. Esto se debe a varios factores: el uso de agentes químicos tiene gran efectividad en la recuperación del oro, sus costos no son muy altos, no es necesaria la creación de una gran infraestructura para realizar el montaje del proceso, se adapta fácilmente a la infraestructura montada para el beneficio del metal y no es necesario un conocimiento científico ni tecnológico de alta complejidad para realizar el proceso. Los efectos contaminantes no son perceptibles de manera inmediata por el hombre, lo cual hace que la conciencia sobre su peligrosidad para las comunidades sea difícil de alcanzar. (Defensoría del Pueblo, 2011, p.219)

En la minería del oro artesanal y en pequeña escala se utilizan normalmente grandes cantidades de mercurio para procesar el mineral, siendo por sí sola, la mayor fuente de liberación intencional de mercurio del mundo, en las operaciones de minería del oro en gran escala se ha ido eliminando gradualmente el uso del mercurio, sustituyéndolo por otras tecnologías (PNUMA, 2008).

El Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente (2011) dice en su informe que: En Colombia hay unos 200 000 pequeños mineros, especialmente en la región de Antioquia que producen más del 50% del oro del país. Por ende Colombia es el mayor emisor per cápita de mercurio del mundo, y solo en esta zona son vertidas al ambiente más de 100 toneladas de mercurio al año.

En la extracción de oro es utilizado el mercurio, una práctica usual en pequeñas instalaciones de minería en países en desarrollo, entre ellos Colombia, la falta de buenas prácticas en este tipo de actividad posibilita que se contaminen los ríos, los suelos y se vea afectada la salud de los trabajadores (Muñoz et al, 2012). “El almacenamiento, el transporte y el manejo del mercurio crean oportunidades para que se produzcan derrames y para que las personas queden expuestas al vapor de mercurio” (PNUMA, 2008, p.02).

En el beneficio el mercurio llega al agua ya sea por: trituración o molienda defectuosa, uso indiscriminado de mercurio en canalones, lavado de barriles (cocos amalgamadores) y precipitación de la lluvia con vapores de mercurio, lodos residuales contaminados, relavado de arenas amalgamadas y cianuración de arenas residuales de amalgamación; llega a los suelos por mala disposición de arenas amalgamadas, y relavado de arenas amalgamadas; al aire llega por quema de amalgamas sin ninguna técnica o de manera defectuosa, almacenamiento y manipulación incorrecta del mercurio y fugas de vapor en barriles. (MME y UPME, 2007, p.12)

Cuando el mercurio es liberado al ambiente en cualquier forma, es altamente móvil y circula entre la atmósfera y la superficie terrestre, donde se deposita en suelo, agua y sedimentos,

transformando el mercurio elemental en su forma más tóxica (metilmercurio o dimetilmercurio) por su contaminación. (Calderón, 2007; MME y UPME, 2007). “Tiene como resultado una extensa degradación del medio ambiente y la contaminación del ecosistema, efectos que pueden perdurar durante varias décadas después del cese de las actividades mineras” (PNUMA, 2008, p.02).

### **Contaminación del agua por mercurio e impactos ambientales al recurso.**

La contaminación hídrica por mercurio, generada principalmente por los residuos de actividades productivas como la minería y la industria o por procesos naturales (fenómenos geológicos) como la meteorización, la erosión de las rocas y la lixiviación, constituye uno de los problemas ambientales más complejos actualmente, debido a su alto grado de toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación y bioconcentración (también conocida como biomagnificación) (Posada y Arroyave, 2006).

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2008), los lugares con altas concentraciones comprobadas de metal de mercurio, normalmente ubicados en cursos de agua o cerca de éstos, se denominan “zonas mineras críticas”, estas zonas pueden ser de unos pocos metros cuadrados hasta de cientos de metros cuadrados.

“Son fuentes importantes de dispersión del mercurio en los sistemas acuáticos, que contribuyen a la contaminación por metilmercurio de los peces y la fauna y flora silvestres” (PNUMA, 2008, p.06). Habitualmente, los relaves que contienen mercurio son vertidos en masas de agua o cercanamente y, en resultado, el suelo, los ríos, arroyos, estanques y lagos quedan contaminados por largos períodos de tiempo (PNUMA, 2008).

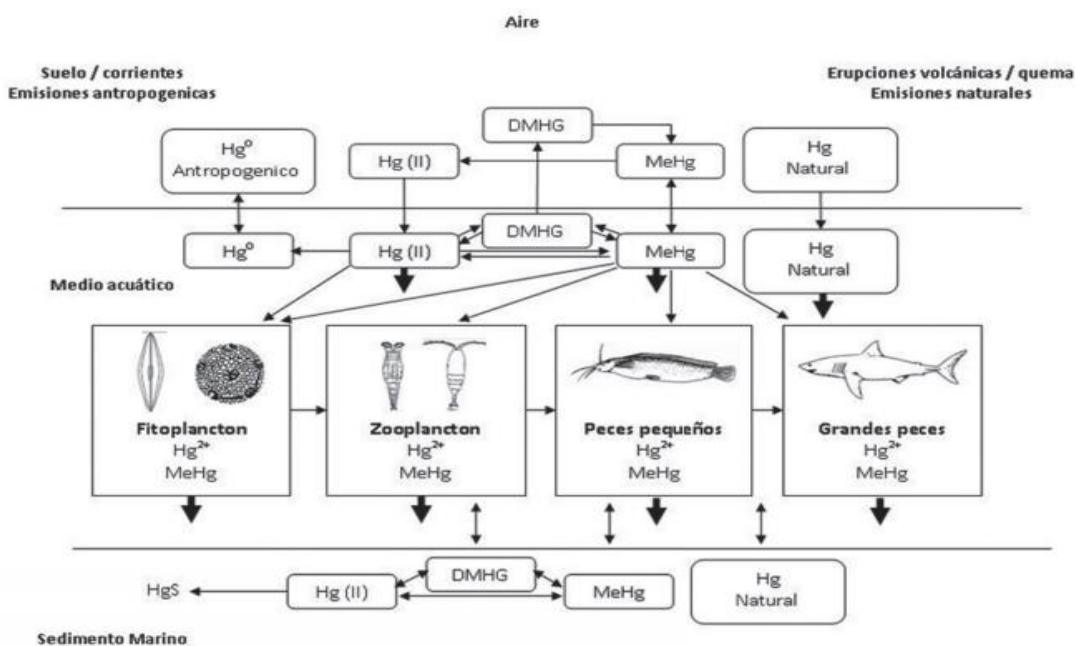
El mercurio en el agua causa un impacto enorme porque se acumula en los tejidos de los peces –especialmente de los niveles tróficos más altos- e interfiere particularmente en su reproducción disminuyendo la producción de huevos, la viabilidad del esperma, la tasa de eclosión y la supervivencia de las larvas, y afectando negativamente su éxito reproductivo y la demografía de sus poblaciones. Cantidades de 10-20  $\mu\text{gHg/g}$  o más son letales para los peces, y cantidades 1-5  $\mu\text{gHg/g}$  son subletales; cuando los peces están expuestos por largos periodos a contaminación con Hg se hacen más vulnerables a residuos de Hg más bajos. (Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente, 2011).

En los ambientes contaminados por metales pesados se altera la capacidad de supervivencia de los organismos, lo que afecta la dinámica poblacional de las especies y, por tanto, la estructura y función ecosistémica, con los efectos consiguientes en la vida de miles de personas. La interacción de este metal con el ecosistema depende de la forma y especie química en la que se encuentre, además de otros factores como el pH, las condiciones de óxido-reducción del agua, la presencia de sustancias orgánicas con capacidad de formar complejos químicos y diversos factores climáticos que potencian el estrés químico. (Posada y Arroyave, 2006, p.58)

Hay miles de lugares contaminados que seguirán estando afectados durante décadas, y sus efectos van más allá del ámbito local, creando graves peligros de salud ambiental a largo plazo para las poblaciones que viven aguas abajo de las regiones mineras. (PNUMA, 2008, p.07)

## Metilmercurio

El Mercurio orgánico o metilmercurio (MeHg): El mercurio utilizado para la amalgamación del oro por los mineros es evaporado y arrastrado al suelo y a los cuerpos de agua por las lluvias, donde por reacción de bacterias y otros micro-organismos se transforma el mercurio metálico en metilmercurio en el fondo de los cuerpos de agua y en zonas pantanosas, siendo una forma de mercurio mucho más tóxica (Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente, 2011). “La velocidad a la que se produce metilmercurio depende del potencial redox del medio, de la concentración de microorganismos y de la disponibilidad de mercurio” (Domènech., y Peral, 2006, p.135).



**Figura 4.** Transformación del mercurio en el medio acuático

Fuente: León, y Peñuela (2011). Trascendencia del metilmercurio en el ambiente, la alimentación y la salud humana.

## **Bioacumulación y biomagnificación**

El Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente (2011) indican que los peces detritívoros y otros pequeños organismos que se alimentan de barro del fondo, ingieren el metilmercurio y lo van acumulando en sus tejidos a lo largo de su vida (bioacumulación), el metilmercurio es absorbido más rápidamente de lo que el organismo lo puede eliminar. A través de la cadena trófica animales, incluso el hombre consumen peces, plantas y otros organismos, lo van acumulando en sus músculos y tejidos durante su vida y al ser comidos por otros depredadores finales acumulan más mercurio (biomagnificación). El grado de biomagnificación depende de la ubicación de las especies en la cadena alimentaria (León y Peñuela, 2011).

## **Impactos ambientales del metilmercurio**

El metilmercurio que se acumula en los peces en niveles que los pueden dañar tanto a ellos como a los demás animales que se los comen, de manera similar los depredadores que comen animales que se alimentan de peces consecuentemente se encuentran también en riesgo, los efectos al metilmercurio en la fauna silvestre pueden incluir la muerte, reducir su fertilidad, causar un crecimiento más lento, además del desarrollo de conductas anormales que pueden perturbar su sobrevivencia; en los peces puede alterar el sistema endocrino, lo que a su vez puede causar un impacto negativo en su correcto desarrollo y reproducción (Weinberg, 2010).

## **Tratamiento biológico**

### **Biotechnología**

El desarrollo científico y tecnológico, especialmente en el contexto de las ciencias de la vida, que se ha dado desde años atrás, ha permitido la aplicación de principios científicos y de ingeniería en procesos que hacen uso de organismos vivos (microorganismos, enzimas, células de animales o de plantas) o sus componentes para producir o modificar productos de uso específico con la finalidad de proveer a la sociedad de bienes y servicios. Actualmente se refiere al conjunto de estos tipos de actividades humanas con el término de biotecnología. Por lo tanto, la biotecnología es una ciencia interdisciplinaria que integra las ciencias biológicas y la tecnología (Blanch, 2010). “Y ante la demanda creciente de tecnologías para la descontaminación, las técnicas biotecnológicas se utilizan cada vez más como las tecnologías ecológicas más idóneas, teniendo gran potencial para solucionar muchos otros problemas ambientales” (Gutiérrez, 2006, p.451).

### **Biorremediación**

Glazer (como se citó en Torres y Zuluaga, 2009) define la biorremediación como una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (fundamentalmente bacterias, pero también hongos y levaduras) para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes, y, por tanto, se puede utilizar para limpiar terrenos o aguas contaminadas.

Sólido. Con aplicaciones sobre medios contaminados como suelos o sedimentos, o bien directamente en lodos, residuos, etc.

Líquido. Aguas superficiales y subterráneas, aguas residuales.

Gases. Emisiones industriales, así como productos derivados del tratamiento de aguas o suelos.

Metales pesados. Estos no se metabolizan por los microorganismos de manera apreciable, pero pueden ser inmovilizados o precipitados.

También se puede realizar una clasificación en función de los contaminantes con los que se puede trabajar. Alexander, Eweis et al. (como se citó en Torres y Zuluaga, 2009)

### **Fitorremediación**

Los avances para el saneamiento ambiental de áreas contaminadas han conducido a desarrollar alternativas que se basan en el empleo de organismos vivos para prevenir o restaurar daños provocados por acciones antropogénicas que alteran la estabilidad de los diferentes ecosistemas (Marrero, Amores y Coto, 2012). La fitorremediación aprovecha la capacidad de algunas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes (in situ o ex situ) presentes en agua, suelo o aire como: compuestos derivados del petróleo, plaguicidas, metales pesados, así como COVs (Delgadillo et al., 2011).

En este sentido Epelde, Becerril, Alkorta, Garbisu (como se citó en Marrero, Amores, y Coto, 2012), resalta la biorremediación, procedimiento natural que consiste en el empleo de sistemas biológicos capaces de eliminar los contaminantes orgánicos e inorgánicos de un determinado medio, dada su capacidad de utilizar compuestos presentes en su entorno y

transformarlos en precursores de sus constituyentes celulares, convirtiéndolos en compuestos menos peligrosos y más estables.

La fitorremediación es una de las vertientes de la biorremediación que puede considerarse una tecnología alternativa rentable y sostenible. En ella se emplea gran diversidad de plantas que tienen la capacidad de acumular y eliminar sustancias tóxicas mediante sus procesos metabólicos, principalmente metales pesados, por lo que reciben el nombre de hiperacumuladoras (Delgadillo et al., 2011; Marrero et al., 2012).

**Tabla 6.** Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se puede realizar <i>in situ</i> y <i>ex situ</i>.</li> <li>2. Se realiza sin necesidad de transportar el sustrato contaminado, con lo que se disminuye la diseminación de contaminantes a través del aire o del agua.</li> <li>3. Es una tecnología sustentable.</li> <li>4. Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos.</li> <li>5. Es de bajo costo.</li> <li>6. No requiere personal especializado para su manejo.</li> <li>7. No requiere consumo de energía.</li> <li>8. Sólo requiere de prácticas agronómicas convencionales.</li> <li>9. Es poco perjudicial para el ambiente.</li> <li>10. Actúa positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, debido a la formación de una cubierta vegetal.</li> <li>11. Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable.</li> <li>12. Evita la excavación y el tráfico pesado.</li> <li>13. Se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos.</li> <li>14. Permite el reciclado de recursos (agua, biomasa, metales).</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. En especies como los árboles o arbustos, la fitorremediación es un proceso relativamente lento.</li> <li>2. Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta.</li> <li>3. El crecimiento de las plantas está limitado por concentraciones tóxicas de contaminantes, por lo tanto, es aplicable a ambientes con concentraciones bajas de contaminantes.</li> <li>4. En el caso de la fitovolatilización, los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente.</li> <li>5. Los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión.</li> <li>6. No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras.</li> <li>7. La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes.</li> <li>8. Se requieren áreas relativamente grandes.</li> <li>9. En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos.</li> </ol>

**Fuente:** Delgadillo et al. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación.

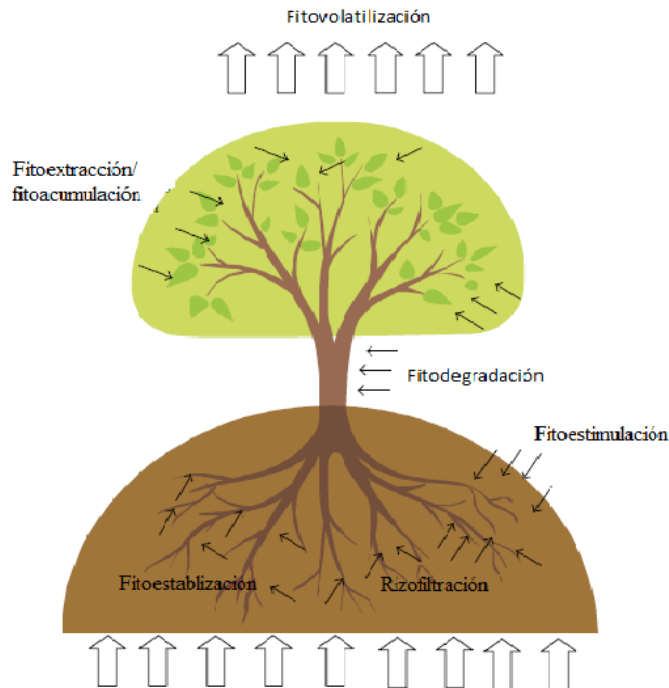
## Técnicas de fitorremediación

Existen diferentes técnicas de fitorremediación disponibles que varían según las partes de las plantas que participan, como se muestra en la siguiente Tabla 7.

*Tabla 7. Mecanismos de fitorremediación*

<b>Tipo de fitorremediación</b>	<b>Mecanismo involucrado</b>	<b>Contaminantes</b>
<b>Fitoextracción</b>	Hiperacumulación. Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces)	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc
<b>Rizofiltración</b>	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc isótopos radioactivos, compuestos fenólicos
<b>Fitoestabilización</b>	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire.	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados
<b>Fitoestimulación</b>	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.
<b>Fitovolatilización</b>	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
<b>Fitodegradación</b>	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

**Fuente:** Frers. (2008). El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales.



**Figura 5.** *Técnicas de fitorremediación*

Fuente: Tangahu, Sheikh, Basri, Idris, Anuarv y Mukhlisin (2011). A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg)

Uptake by Plants through Phytoremediation.

Henry (Como se citó en Jaramillo y Flores, 2012) dice que de los diferentes tipos de fitorremediación mencionados solo cuatro son relevantes para la asimilación de metales pesados; fitoextracción, fitoestabilización, rizofiltración, fitovolatilización.

### **Fitoextracción.**

Fitoextracción o fitoacumulación consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en los tejidos aéreos de las plantas tallos y hojas. El primer paso para la aplicación de esta técnica es la selección de las especies de planta

más adecuada para los metales presentes y las características del emplazamiento. Una vez completado el desarrollo vegetativo de la planta el siguiente paso es cortarlas y proceder a su incineración y traslado de las cenizas a un vertedero de seguridad o desechos peligrosos. La fitoacumulación se puede repetir ilimitadamente hasta que la concentración remanente de metales en el suelo esté dentro de los límites considerados como aceptables (Delgadillo et al., 2011).

### **Fitoestabilización.**

La fitoestabilización comprende el uso de plantas para prevenir el movimiento de metales en el suelo y/o aguas a través de la adsorción y acumulación sobre las raíces o precipitación en la zona de la rizosfera (Delgadillo et al., 2011; Tangahu, Sheikh, Basri, Idris, Anuar y Mukhlisin, 2011). Las plantas adecuadas para fitoestabilización no deben realizar una elevada translocación de los contaminantes a los tejidos aéreos de la planta, evitando así el riesgo de ser consumidos por herbívoros e ingresar en la cadena trófica. Esto además, elimina la necesidad de cosechar y tratar como residuos peligrosos a los tejidos contaminados (Paisio et al., 2012).

Esta tecnología tiene como ventajas, sobre los demás métodos de remediación, que es de menor costo, fácil de aplicar y estéticamente agradable (Paisio et al., 2012).

### **Rizofiltración.**

La rizofiltración representa una alternativa prometedora para la eliminación de metales en ambientes acuáticos (Paisio et al., 2012). La rizofiltración utiliza las plantas para eliminar del

medio hídrico contaminantes a través de la raíz, se considera una técnica parecida a la fitoextracción. En la rizofiltración estas plantas se cultivan de manera hidropónica. Cuando el sistema radicular está bien desarrollado, las plantas se introducen en el agua contaminada con metales, en donde las raíces los absorben y acumulan. A medida que las raíces se van saturando, las plantas se cortan y se disponen para su uso final. Un caso de aplicación de rizo filtración está en las macrófitas. (Delgadillo et al., 2011).

### **Fitovolatilización.**

La fitovolatilización se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos. Algunos de estos pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera (Delgadillo et al., 2011). La fitovolatilización es posible sólo para un reducido tipo de metales y metaloides, incluyendo el mercurio (Hg), debido a su alta volatilidad. Este método de remediación tiene algunos beneficios tales como una mínima perturbación del ambiente, menos erosión, y además elimina la necesidad de disponer del material vegetal contaminado (Paisio et al., 2012).

## Sistemas de fitorremediación acuática

Delgadillo (2012) menciona que los sistemas de fitorremediación acuática pueden ser de cuatro tipos:

***Humedales contruidos o artificiales:*** se definen como un complejo de sustratos saturados, vegetación emergente y sub emergente, animales y agua que simula los humedales naturales, diseñado y hecho por el hombre para su beneficio.

***Sistema de tratamiento con plantas acuáticas flotantes:*** pueden ser estanques semiconstruidos o naturales, donde se mantienen plantas flotantes para tratar aguas residuales.

***Sistema de tratamiento integral:*** es una combinación de los dos sistemas anteriores.

***Sistema de rizofiltración,*** ya mencionado anteriormente.

Se ha demostrado que estos sistemas pueden remover eficientemente fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos radiactivos, fluoruros, bacterias y virus, de aguas residuales municipales, agrícolas e industriales, incluyendo las industrias: lechera, de pulpa y papel, textil, azucarera, de curtiduría, de destilería, aceitera, de galvanizado y metalurgia (Delgadillo, 2012, p.17)

El uso de macrófitas flotantes, históricamente ha sido desarrollado bajo diversos esquemas de sistemas de tratamiento. En ese sentido, hay varios diseños en función de ciertas características (como las ya mencionados), sin embargo el más comúnmente empleado es el sistema de humedales artificiales (Marteloy Lara, 2012).

La importancia y trascendencia de los humedales artificiales, radica fundamentalmente en que son una alternativa viable y sustentable para la depuración de aguas residuales de tipo industrial, agropecuaria y doméstica. Su implementación tiene un menor costo en comparación con los sistemas de tratamiento convencional, son amigables con el entorno paisajístico, adicionalmente la existe la posibilidad de combinarse con otros procesos depuradores ya existentes, a fin de optimizar su rendimiento (Luna y Castañeda, 2014).

### **Plantas acuáticas**

El término “planta acuática” es un poco ambiguo. Según el texto que consultemos, podremos leer que hace referencia a plantas que desarrollan su ciclo biológico en el medio acuático, pero también se refiere, con frecuencia, a plantas que ocasionalmente pasan su vida en el agua. Igualmente, podremos comprobar que un número importante de autores restringe esta categoría a plantas vasculares, mientras que otros la hacen extensiva a varios géneros de algas y briófitos. (García, Fernández y Cirujano, 2009, p.35)

### **Efectos de los metales en las plantas**

En las plantas, los efectos de los metales empiezan en la raíz, ya que este es el órgano responsable de asimilar los nutrientes del medio, y afectan sucesivamente el resto de la planta. En las hojas se producen graves daños en los cloroplastos y las mitocondrias, lo que altera los procesos de fotosíntesis y de respiración. En una fase más avanzada de alteración se producen intensos cambios metabólicos y de regulación celular, y ocurre finalmente el estímulo de la

senescencia por acumulación crónica del metal pesado, lo que puede resultar en la muerte (Posada y Arroyave, 2006).

### **Criterios para seleccionar las especies de plantas para la fitorremediación**

Núñez, Mea, Ortega y Olgúin (Como se citó en Jaramillo y Flóres, 2012) mencionan que la eficiencia de remoción de contaminantes durante el proceso de fitorremediación dependerá principalmente de la especie de planta utilizada, el estado de crecimiento de las plantas, su estacionalidad y el tipo de metal a remover. Por lo mismo, para lograr buenos resultados, las plantas a utilizar deben tener las siguientes características:

- Ser tolerantes a altas concentraciones de metales.
- Ser acumuladoras de metales.
- Tener una rápida tasa de crecimiento y alta productividad.
- Ser especies locales, representativas de la comunidad natural.
- Ser fácilmente cosechables

### **Hidrofitos o macrófitos acuáticos**

Son aquellas plantas que tienen todas sus estructuras vegetativas (hojas, tallos y raíz) sumergidas o flotantes. Se incluyen en este grupo las plantas vasculares, algunos géneros de briófitos y las algas carófitas. Son las plantas acuáticas en sentido estricto. Ejemplos de macrófitos acuáticos son: la manzanilla de agua (*Ranunculo speltatus*), el miriofilo

(*Myriophyllum spicatum*) o la lenteja de agua (*Lemna minor*). (García, Fernández y Cirujano, 2009, p.36)

Debido a la habilidad que tienen los macrófitos acuáticos para asimilar hasta cierto punto, la mayoría de los constituyentes del agua que se consideran contaminantes, estas han sido utilizadas en la detección y remoción de sustancias en efluentes de aguas residuales domésticas y no domésticas, lo que ha demostrado que son eficientes en la remoción de una amplia gama de sustancias orgánicas, nutrientes y metales pesados (Martelo y Lara, 2012).

García, Fernández y Cirujano (2009) mencionan que “los macrófitos acuáticos necesitan estar en el agua para poder vivir, donde permanecen enraizados al sustrato o flotando libremente. Se distinguen tres tipos biológicos” (p.40):

#### **Macrófitos flotantes.**

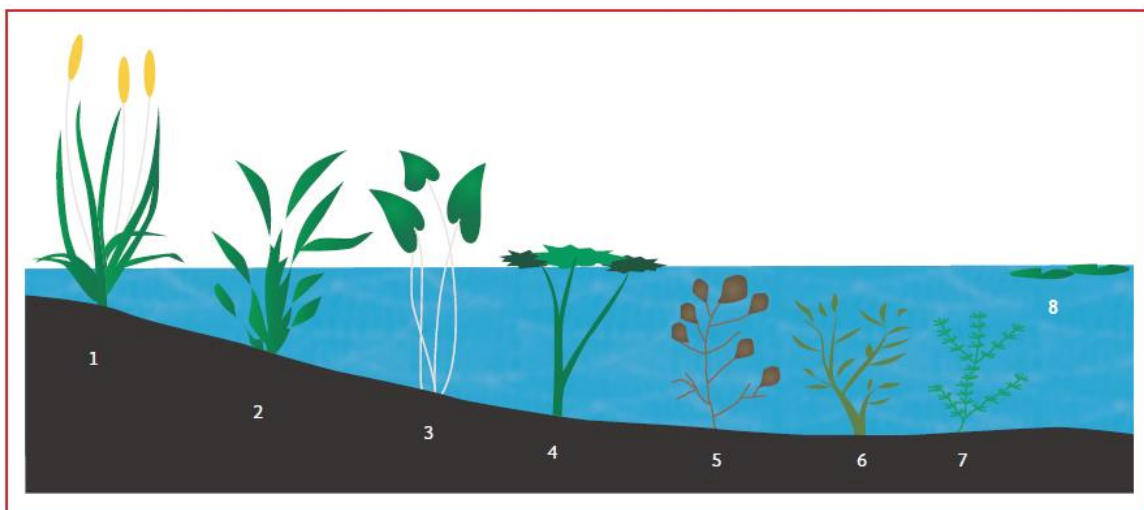
Aquellos que no se encuentran adheridos al sustrato y mantienen sus órganos asimiladores flotando sobre la superficie del agua, como el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), o la Lenteja de agua (*Lemna minor*).

#### **Macrófitos enraizados-flotantes (Emergentes).**

Aquellos que se mantienen enraizados al sustrato y tienen hojas, que pueden ser de gran tamaño, que flotan en la superficie, como los nenúfares (*Nuphar luteum* y *Nymphaea alba*).

### Macrófitos sumergidos.

Aquellas especies enraizadas que tienen todas sus estructuras sumergidas dentro del agua, como las especies del género *Zannichellia*, o a lo sumo con flores o inflorescencias emergentes, como las espigas de agua (*Potamogeton lucens*), la Elodea (*elodea canadensis*).



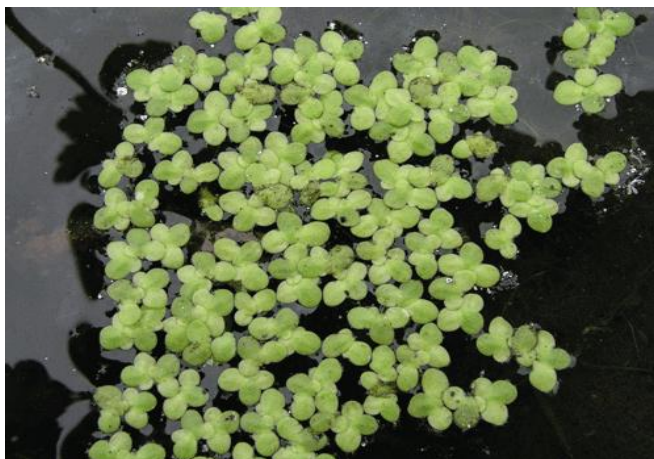
**Figura.** Clasificación de macrófitas: Emergentes (1- 4), sumergidas (5 - 7), flotantes (8)

Fuente: Comisión Nacional del Agua de México. (2016). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

### Descripción de especies vegetales en estudio

Las especies vegetales que se investigaron para el proceso de fitorremediación en aguas residuales con metales pesados fueron Lenteja de agua (*Lemna minor*), Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) y Elodea (*Elodea canadensis*)

#### Lenteja de agua (*Lemna minor*)



*Fotografía 1.* Lenteja de agua (*Lemna minor*)

Fuente: Fernández (2006). *Lemna minor*

La familia Lemnaceae, comprende un grupo de pequeñas plantas acuáticas de rápido crecimiento, que se caracterizan por formar extensos mantos sobre cuerpos de agua con movimiento léntico; su reproducción generalmente es vegetativa. El contenido de proteína que se reporta oscila entre 13-41%, y depende del contenido de nitrógeno en el medio en el cual se desarrolla. Tiene preferencia por el consumo de amonio sobre el nitrato, con una capacidad de absorción de metales pesados entre ellos el mercurio, razón por la cual se ha utilizado para el

tratamiento de aguas residuales con excelentes resultados (Zetina, Reta, Ortega, Sánchez, Herrera y Becerril, 2010; Arenas, Merú y Torres, 2011).

### **Taxonomía y reproducción.**

La familia Lemnaceae comprende un grupo de pequeñas plantas acuáticas vasculares monocotiledóneas que flotan libremente sobre la superficie del agua, crecen en colonias y frecuentemente desarrollan densos y uniformes mantos, de unos milímetros a algunos centímetros de grosor, en charcas, lagos, lagunas y cuerpos de agua con movimiento léntico. Se han identificado 5 géneros *Landoltia*, *Lemna*, *Spirodela*, *Wolffia*, *Wolffiella* y 38 especies (Zetina et al., 2010).

Son las más reducidas y simples de todas las plantas con flores, tienen una morfología relativamente sencilla, no tienen tallo ni hoja verdadera, consisten de una o algunas frondas planas de forma ovoide que rara vez, dependiendo de la especie, exceden 12 mm de longitud; la fronda es una fusión de hojas y tallos, esto representa la máxima reducción de una planta vascular entera; cada fronda puede o no presentar raíces, que en condiciones de bajas disponibilidad de nutrientes, pueden variar de unos milímetros a algunos centímetros; estas plantas raramente florecen. El género *Lemna* produce una raíz y las frondas alcanzan de 2 - 5mm (Zetina et al., 2010).

La familia Lemnaceae tiene la capacidad de reproducción sexual y asexual, sin embargo, la primera es rara debido a la baja frecuencia de la floración. En consecuencia, la reproducción normalmente es vegetativa (asexual), en los bordes basales se desarrolla una yema pequeña que origina una fronda, lo que favorece un rápido crecimiento de la población. En condiciones

óptimas de crecimiento, como disponibilidad de nutrientes, luz y temperatura óptima del agua, pueden duplicar su peso cada 2 o 3 días. Esta tasa de reproducción es más rápida que cualquier otra planta superior, formando densos mantos sobre toda la superficie del cuerpo de agua, especialmente cuando las concentraciones de nitrógeno y fósforo en la columna de agua son altas (Zetina et al., 2010).

### **Condiciones de crecimiento y productividad.**

Parámetros como la temperatura y pH, composición del medio de crecimiento, intensidad de luz y densidad del manto, ejercen significativa influencia sobre el crecimiento de esta macrófita. Los rangos de temperaturas reportados por diferentes autores son muy variables, sin embargo, la ideal en el agua es de 17°C, inhibiendo el crecimiento cuando se acerca a los 35°C (Zetina et al., 2010).

El rango típico de pH para estas plantas es de 4,5 - 7,5; se reporta que para Lenteja de agua (*Lemna minor*) el pH mínimo es de 4,0 respectivamente y máximo de 10, el crecimiento es completamente inhibido con un pH mayor a este (Zetina et al., 2010).

La intensidad de luz reportada para Lenteja de agua (*Lemna minor*) fluctúa entre los 300 - 600 E m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> y 600 - 1200 E m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente (Zetina et al., 2010).

A bajas densidades de población la tasa relativa de crecimiento (TRC) se incrementa significativamente, sin embargo, conforme la densidad aumenta la TRC disminuye (Zetina et al., 2010).

Estas plantas son de rápido crecimiento y remueven nutrientes a una tasa mayor comparado con otras macrófitas acuáticas. Cuando empieza a disminuir los niveles de estos

nutrientes, las raíces se alargarán y empezarán a absorber otras sustancias presentes en el medio, posiblemente hasta un punto donde contendrán altos niveles de toxinas y metales pesados (Zetina et al., 2010).

### **Resultados uso de Lenteja de agua en fitorremediación de mercurio.**

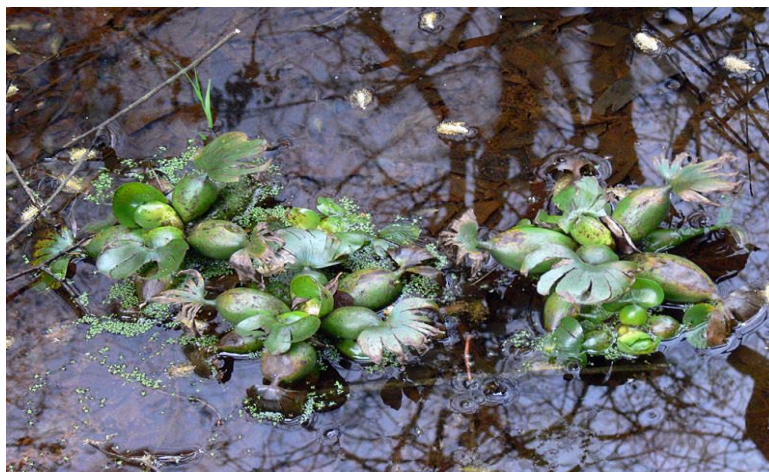
Posada y Arroyave (2006) hicieron preensayos con diferentes concentraciones de mercurio en condiciones de laboratorio. Como resultado para la planta *Lemna minor* las concentraciones de mercurio entre 0,01 mg/L y 0,1 mg/L no afectan significativamente su crecimiento poblacional. Sin embargo, a concentraciones entre 1,0 mg/L y 10,0 mg/L de mercurio la población sufre una alta mortalidad y su crecimiento disminuye significativamente con el tiempo.

Arenas et al. (2011) evaluaron la capacidad biorremediadora de Lenteja de agua (*Lemna minor*) en función del tiempo en aguas contaminadas con mercurio, se basaron en una investigación de naturaleza experimental en la cual las variables dependientes (concentración de nitrógeno, fósforo, potasio y mercurio foliar; y mercurio en el agua en función del tiempo) estuvieron sujetas a la acción de las variables independientes (concentración inicial de mercurio en el agua, concentración y cantidad de la solución nutritiva agregada diariamente y tiempo de exposición). Los resultados demuestran que la concentración de mercurio en el agua no ejerció un efecto tóxico severo en la planta, evidenciando que estas concentraciones (0,133 mgL<sup>-1</sup>) son tolerables para el desarrollo biológico de la Lenteja de agua (*Lemna minor*). Esto quiere decir que la planta es capaz de continuar su proceso natural de crecimiento ya que se adapta a las condiciones químicas de contaminación con mercurio. Como resultado final se obtiene una

eficiencia de 30 % de remoción; por lo que puede afirmarse que la planta es eficiente para remover dicho elemento del agua. Según este mismo autor el periodo de máxima eficiencia de remoción de la Lenteja de agua (*Lemna minor*) ocurre durante los primeros 6 días y representa una alternativa para la remoción de mercurio en aguas contaminadas hasta un nivel de 0,13 mg/L.

Jaramillo y Flores (2012) analizaron la fitorremediación mediante el uso de dos especies Lenteja de agua (*Lemna minor*) y Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) en aguas residuales producto de la actividad minera contaminadas con mercurio. Al inicio del experimento se tenía una concentración de 1,2 ppm mercurio (Hg) y al final del experimento de obtuvo una concentración de 0,366 ppm de mercurio (Hg). El tratamiento con Lenteja de agua (*Lemna minor*) tuvo una variación de 24 a 26%. Como resultado se observó que al 5 día Lenteja de agua (*Lemna minor*) presentó un proceso de clorosis. Los autores concluyen también que la rápida reproducción de esta especie es una ventaja, debido a que puede absorber grandes cantidades de mercurio si se dan las condiciones adecuadas para su desarrollo.

#### **Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*)**



**Fotografía 2.** Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*)

**Fuente:** Menéndez (2015). *Eichornia crassipes*

La macrófita Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) es una planta acuática perteneciente a la familia Pontederiaceae, de uso ornamental y conocida por su capacidad de producción y la eliminación de contaminantes del agua, ya que absorbe directamente los nutrientes del agua, convirtiendo esta especie en un excelente purificador de aguas residuales. Adaptable a una amplia gama de condiciones ambientales y climáticas. Esta planta es de rápido crecimiento, crece en una amplia variedad de tipos de humedales y prefiere aguas con nutrientes enriquecidos. Sin embargo, se puede tolerar una variación considerable en los niveles de nutrientes, temperatura y pH (Poma y Valderrama, 2014).

**Taxonomía y reproducción.**

Esta especie acuática flotante de raíces sumergidas, es una planta perenne, herbácea y libre flotante, llegando a formar densos tapetes, muchas veces se encuentra arraigada al sustrato. Se encuentra bien adaptada a diferentes hábitats (ríos, lagos, estanques, pantanos, canales y drenaje con movimiento léntico), exhibiendo una alta plasticidad morfológica en respuesta a diferentes condiciones de crecimiento (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, 2006; ADEL y FIAES, 2014).

En estado maduro la planta de lirio se constituye de raíces, rizomas, estolones, peciolos, hojas, inflorescencias y frutos. La raíz constituye un sistema radical adventicio fibroso sin ramificaciones y cápsula conspicua; esto es que la raíz se origina de tejido maduro no

meristemático, con una raíz primaria que se ramifica en muchas raíces delgadas de aproximadamente el mismo tamaño (ADEL y FIAES, 2014). Puede alcanzar una altura de 50 cm e incluso 1 m en condiciones tropicales muy favorables. Esta planta origina un rizoma ramificado que puede llegar a 30 cm de longitud (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, 2006).

La reproducción puede ser sexual y asexual (vegetativa), siendo esta última la más prolífica (ADEL y FIAES, 2014). Aunque la generación puede ser importante en la recolonización de un área, la producción de nuevas plantas por reproducción vegetativa es mucho más significativa. En esta última, las plantas producen estolones horizontales que desarrollarán hojas arosetadas de una yema terminal. El proceso se repite en las plantas hijas y cuando la maleza crece rápidamente en condiciones ideales, un número inmenso de plantas se pueden producir en corto tiempo, llegándose a duplicar una población de 5 a 15 días. En climas tropicales la producción de estolones y renuevos es constante. Cuando la tensión de oxígeno es baja, el tiempo de duplicación puede ser hasta de 50 días. La regeneración de fragmentos de plantas también puede ser prolífica (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, 2006). La reproducción por semilla se ve raramente (ADEL y FIAES, 2014).

### **Condiciones de crecimiento y reproductividad.**

El crecimiento del Jacinto de agua se ve significativamente influido por los niveles de nutrientes presentes en el agua, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio, además de los principales nutrientes también absorben algunos metales pesados. Puede soportar fluctuaciones del nivel de agua, acidez y niveles bajos de nutrientes. No tolera agua salobre y la salinidad

puede modificar su distribución. Requiere iluminación intensa, temperaturas entre 20-30°C y resiste mal los fríos del invierno (por debajo de 15°C). A medida que las temperaturas bajan, el crecimiento disminuye en intensidad (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, 2006). “El pH óptimo para el crecimiento de Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) es de 6-8” (Poma y Valderrama, 2014, p.165).

### **Resultados uso de Jacinto de agua en fitorremediación de mercurio.**

Riddle et al. (como se citó en Posada y Arroyave, 2006) encontraron que al hacer crecer el buchón de agua (Jacinto de agua) en solución de Hoagland diluida con 1 ppm de mercurio acumula un máximo de 0,20 ppm de mercurio en los brotes y 16,0 ppm de mercurio en las raíces, y alcanza las concentraciones máximas después de unos 16 días.

Los trabajos de Panda *et al.* Y Lenkaet *al.* (como se citó en Posada y Arroyave, 2006) muestran la capacidad de Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) como bioindicador de la contaminación por mercurio en ambientes acuáticos y proporcionan evidencias de que el buchón de agua es un buen absorbente del mercurio acuático.

Poma y Valderrama (2014). Realizaron estudios para medir la capacidad de sorción de los iones metálicos Cadmio Cd (II) y Mercurio Hg (II) de la especie Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) iniciaron la remoción de 5 mg/L de los iones metálicos contenidos en 1 litro de solución. El porcentaje de sorción fue de 15,6 % para el Mercurio Hg (II) en un periodo de 7 días, demostrando así la efectividad de la técnica de fitorremediación. Concluyendo que dicha especie es una planta potencialmente aprovechable para remover mercurio en aguas contaminadas.

Tangahu et al. (2011) realizaron una revisión de información acerca de los metales pesados arsénico, plomo y mercurio (As, Pb, Hg) y las fuentes, efectos y su tratamiento, la fitorremediación y las plantas recomendadas para este fin. Teniendo en cuenta la concentración de mercurio como  $\text{HgSO}_4$  (0, 0,5 y 2 mg / L) concluyeron lo siguiente: Cuanto mayor sea la concentración de mercurio, mayor es la cantidad de mercurio eliminado por las plantas. La absorción y la acumulación más grande es la capacidad de la lechuga de agua, seguido por el Jacinto de agua y otras especies.

Jaramillo y Flores (2012) analizaron la fitorremediación mediante el uso de dos especies Lenteja de agua (*Lemna minor*) y Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) en aguas residuales producto de la actividad minera contaminadas con mercurio. Al inicio del experimento se tenía una concentración de 1,2 ppm mercurio (Hg) y al final del experimento de obtuvo una concentración de 0,366 ppm de mercurio (Hg). El tratamiento con Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) presenta un porcentaje de absorción de 28%. En el día quinto del experimento la especie mencionada presentó necrosis en sus hojas y luego en los peciolos. Los autores concluyen también que en comparación con Lenteja de agua (*Lemna minor*), la especie Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) presenta una mayor resistencia a la concentración de mercurio.

### **Elodea (*Elodea Canadiensis*)**



*Fotografía 3. Elodea (Elodea Canadiensis)*

Fuente: Alaska Center for Conservation Science. (2011). *Canadian waterweed Elodea Canadensis Michx.*

La planta macrófita Elodea (*Elodea canadensis*) es una planta acuática con tallos ramificados, que puede reproducirse con facilidad en algunas partes del mundo, tanto así que puede considerarse una plaga al obstruir los sistemas de drenaje (Jaramillo, Zapata y Marulanda, 2015).

Celis (como se citó en Comisión Nacional del Agua de México, 2010) dice que la especie Elodea (*Elodea canadensis*) acumulan grandes cantidades de mercurio (Hg) en las hojas y tallos cuando este metal está en forma orgánica.

### **Taxonomía y reproducción.**

La Elodea (*Elodea canadensis*) es una planta, acuática de agua dulce, con hojas sumergidas, flores flotantes y raíces fibrosas, se aferra al fondo con sus raíces, pero también puede vivir como planta flotante. Los tallos son ramificados en los nudos, delgados, sin hojas cerca de la base, y por lo general de 20 a 100 cm de largo. Las hojas se colocan generalmente en verticilos de tres, pero son en ocasiones opuesta en la parte inferior del tallo. Verticilos son de hasta 2 cm de distancia en la parte inferior del tallo, pero se pueblan hacia la parte superior del tallo. Las hojas son recurvadas, delgadas, ampliamente lanceoladas a oblongas, de 5 a 17 mm de largo, y 1,75 a 5 mm de ancho, con márgenes minuciosamente dentadas. Las plantas con flores son raras. Surgen flores solitarias de las axilas foliares de largo (3 a 20 cm), tallos filiformes. Las flores masculinas y femeninas son producidas en plantas distintas. Las flores masculinas son más largos y separados de los tallos antes o durante la floración. Las flores se componen de tres sépalos y tres pétalos. Sépalos son de color verde, elíptica y los pétalos son de color blanco.(Alaska Center for Conservation Science, 2011).

La reproducción vegetativa es el principal modo de establecimiento y diseminación de esta especie. Esta especie se reproduce vegetativamente a partir de fragmentos madre y yemas de brotes condensados que se aparten de las plantas madre y raíz en los nudos. Las plantas producen brotes vegetativos en el comienzo del invierno o en condiciones desfavorables de crecimiento poblaciones de un mismo sexo pueden invadir las vías fluviales y difundir de manera agresiva. Aunque la Elodea (*Elodea canadensis*) puede reproducirse sexualmente por semillas, se producen pocas semillas viables (las semillas no son fértiles). La reproducción sexual es por consiguiente relativamente poco importante (Alaska Center for Conservation Science, 2011).

### **Condiciones de crecimiento y reproductividad.**

Puede formar densas alfombras, crece agresivamente en aguas y lagos móviles o estáticos lentos y es capaz de sobrevivir a climas fríos, tolera temperaturas entre 1 a 25°, sin embargo el rango óptimo de temperatura del agua para el crecimiento es de 10 ° C a 25 ° C, también necesita de buena iluminación, pero en general es considerada relativamente muy tolerantes a condiciones de poca luz, requiere aguas ricas en nutrientes. Puede sobrevivir en un amplio rango de condiciones pero crece mejor en los sedimentos en aguas mesotróficas con pH entre 6.5 y 10. Por lo general crece en agua de 1 a 8 m de profundidad, pero se ha documentado a partir de agua de 12 m de profundidad (Alaska Center for Conservation Science, 2011).

### **Resultados uso de Elodea en fitorremediación de mercurio.**

Jaramillo et al. (2015) evaluaron la capacidad de biorremediación del ion mercurio por la planta macrofita Elodea (*Elodea canadensis*) Donde la planta fue sometida a diferentes concentraciones de solución de Cloruro de Mercurio (HgCl<sub>2</sub>). Las concentraciones evaluadas fueron de 0,39mg/ml, 1,55mg/ml y de 6,25mg/ml, la planta mostró un gran desempeño en las tres soluciones, con las concentraciones de 0,39 mg/ml, 1,55mg/ml y 6,25 mg/ml obtuvieron porcentajes de remoción 76,5% del 100% y 62,1% respectivamente, siendo la segunda concentración la que obtuvo un mayor porcentaje de remoción lo cual lo convierte en las condiciones a las que debe ser removido el mercurio.

Concentración (mg/ml)	Porcentajes de mercurio de acuerdo a su concentración
0.39	76.5
1.55	100.0
6.25	62.1

**Tabla 8.** Porcentaje de remoción de mercurio de acuerdo a su concentración

Fuente: Jaramillo et al. (2015). Fitorremediación de mercurio a partir de *elodea sp.*

Es importante conocer la cantidad de mercurio que absorbió la planta dentro de su estructura respecto a la cantidad que fue removida de la solución, debido a que de esa manera se conoce cuál fue el proceso de remoción de mercurio que tuvo la planta, es decir, de acuerdo al porcentaje que fue removido de la solución puede determinarse la cantidad de mercurio que fue adsorbido y/o absorbido por la planta. (Jaramillo et al., 2015, p.44)

Concentración (mg/ml)	Porcentaje absorbido por la planta (%)	Porcentaje adsorbido por la planta (%)
0.39	8.4	68.2
1.55	77.4	22.6
6.25	9.2	72.9

**Tabla 9.** Porcentaje de mercurio retenido en la planta

Fuente: Jaramillo et al. (2015). Fitorremediación de mercurio a partir de *Elodea (Elodea canadensis)*.

Los autores concluyen (Jaramillo et al., 2015) que gracias a esta investigación se pudo comprobar que la planta *Elodea (Elodea canadensis)* puede remediar cuerpos de agua de la contaminación producida por el mercurio. Según los resultados mostrados, el mecanismo usado por la planta para remediar el mercurio es a través de la absorción y adsorción del metal. Inicialmente la planta adsorbe el metal, y dependiendo de la concentración, la planta absorbe el metal. A concentraciones muy altas se presenta toxicidad, pero el mecanismo de adsorción se

muestra en estas condiciones, aunque el porcentaje de remediación es menor, por lo tanto el factor limitante de la remediación es la concentración a la que es tóxica el metal.

### **Disposición final de los residuos generados en el proceso de fitorremediación**

Una vez culminado el tratamiento de fitorremediación en agua, se debe tener previsto sistemas de disposición final de los residuos de las plantas tratadas. Teniendo en cuenta que la planta *Elodea (Elodea canadensis)* es la mejor opción según los resultados de su uso en fitorremediación, ya que según Celis (como se citó en Comisión Nacional del Agua de México, 2010) acumulan grandes cantidades de mercurio (Hg) en las hojas y tallos cuando este metal está en forma orgánica, se puede decir que aplica a la técnica de fitorremediación “fitoextracción” que consisten la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en los tejidos aéreos de las plantas tallos y hojas. A medida que las raíces se van saturando y una vez completado el desarrollo vegetativo de la planta el siguiente paso es cortarlas y proceder a su incineración y traslado de las cenizas a un relleno de seguridad (Delgadillo et al., 2011).

Teniendo en cuenta los métodos que menciona la bibliografía sobre la disposición final que aplica a la técnica de fitorremediación “fitoextracción”, se hará a continuación una descripción de cada método:

## **Incineración**

La incineración controlada es el método más común para disponer las plantas que han absorbido grandes de cantidades de contaminantes. Este proceso produce cenizas, que se deben desechar en los sitios destinados para tal fin, por tratarse de residuos peligrosos, ya que estas plantas que han absorbido los metales, durante el proceso de incineración estos metales se ven reflejados en las cenizas. M.P. Bernal (como se citó en López, 2014).

El objetivo de la incineración de residuos, común a la mayoría de tratamientos de residuos, es tratar los residuos con el fin de reducir su volumen y peligrosidad, capturando (y por lo tanto concentrando) o destruyendo las sustancias potencialmente nocivas. (Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, 2011, p.11)

Sin embargo la incineración como una alternativa de disposición final, no es viable, ya que al incinerar un residuo este no se destruye en el proceso solo se transforma y origina nuevos problemas ambientales y sanitarios. Los metales pesados pueden quedar en las cenizas de fondo o evaporarse, en cuyo caso se pueden condensar cuando los gases se enfrían, formando aerosoles o adsorbiéndose sobre las cenizas volantes. Los elementos que con mayor probabilidad se pueden encontrar y que se eliminan con mayor dificultad son el mercurio (Hg) y Cadmio (Cd). (Rodríguez, 2016). Por la bioacumulación de mercurio después del proceso de fitorremediación, la incineración de este residuo generaría inevitablemente emisiones de mercurio, dioxinas y furanos, estos últimos son “extremadamente estables, persistentes y bio-acumulables en el medio ambiente e incluso se pueden llegar a encontrar en sitios alejados del lugar de formación bien sea

en el aire, suelo, agua, cadena de alimentos: animales, seres humanos y algunos residuos”  
(García, García y Bohórquez, 2012, p.195).

### **Rellenos de seguridad**

Las celdas o rellenos de seguridad constituyen una alternativa basada en criterios ambientales de ingeniería y normas operacionales específicas que procura el confinamiento de residuos peligrosos en el suelo, consiste básicamente en una o varias celdas - bajo capas cubiertas con materia inerte, generalmente tierra, el cual posee diversos subsistemas que comprenden desde un conjunto de elementos de infraestructura para la recepción, manejo de los residuos y los lixiviados hasta el tratamiento de los gases, garantizando así condiciones sanitarias adecuadas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007; Gutiérrez y Londoño; 2012).

El MAVDT y Universidad de Antioquia (2009) mencionan que los rellenos de seguridad son ambientalmente diseñados y deben incorporar en términos generales las siguientes medidas de seguridad:

- Instalar sistemas de impermeabilización de alto rendimiento que garanticen el control de fugas y protejan las aguas subterráneas de la migración de líquidos lixiviados
- Cubrir con una capa o revestimiento de material impermeable el relleno y las pendientes, con el fin de minimizar la infiltración, permitir un adecuado drenaje y evitar el estancamiento del agua lluvia.
- Instalar sistemas de recolección de lixiviados y sistemas de tratamiento, junto con pozos de verificación

Los residuos que pueden ser dispuestos en un relleno de seguridad son de riesgo biológico como: Biosanitarios, anatomopatológicos, cortupunzantes y de animales, por otro lado residuos farmacéuticos y mercuriales lo cuales deben ser estabilizados antes de su disposición.

### **Pretratamiento.**

Para garantizar la minimización de los riesgos de manipulación y disposición final debe hacerse una eficiente gestión en cuanto a los pretratamientos de los residuos a confinar en el relleno de seguridad.

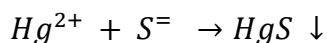
Caceres (2007) menciona que para los residuos con mercurio los posibles pretratamientos serían solidificación o encapsulamiento:

**-Fijación química o solidificación.** Es un proceso a través del cual se detoxifica, inmoviliza, insolubiliza o reduce la peligrosidad de un residuo. Se logra a través de una reacción química entre uno o más componentes del residuo y una matriz sólida. Se utiliza este proceso para tratar residuos en forma líquida o en lodos reduciendo su humedad con el fin de producir un sólido apto para disponer en el suelo.

Para el caso de los residuos semi-sólidos, se puede realizar un proceso de estabilización química, modificando algunas de las propiedades fisicoquímicas de dichos contaminantes y/o sus matrices

**-Estabilización química del mercurio con Sulfuro.** El agente estabilizante es el ion sulfuro, el que se aplica en forma de solución acuosa de sulfhidrato de sodio, NaSH.

Esta la reacción de estabilización que tiene lugar entre el ión mercurio y el ión sulfuro



El producto de la reacción es el sulfuro mercuríco. No es disuelto por los ácidos, ni siquiera por el ácido nítrico caliente, que disuelve a la mayoría de los sulfuros, por ende una vez formado el sulfuro, el mercurio no vuelve a liberarse.

El pH del medio debe ajustarse a una alcalinidad entre 8 y 10, por ende es importante utilizar cal por su efectividad. Este factor es muy importante ya que radica en que la lixiviación del mercurio (Hg) se potencia con la acidez, por consiguiente mantener el pH alcalino minimiza este proceso.

**-Encapsulamiento.** Es un proceso en el cual los residuos son incorporados dentro de un material que lo aísla del ambiente, sin que los componentes del residuo se fijen químicamente al material utilizado. Entre los materiales de encapsulamiento esta el vidrio, el metal, el concreto y plástico.

## Conclusiones

La minería aurífera artesanal y de pequeña escala al utilizar métodos tan obsoletos, deficientes recursos tecnológicos, además la ausencia de organización y planificación de los recursos naturales utilizados en este proceso para su explotación y beneficio trae consigo grandes impactos ambientales al recurso suelo, agua y aire.

El mercurio (Hg) es uno de los metales pesados más tóxicos y peligrosos para los seres vivos, alterando de manera significativa su supervivencia, por su capacidad de bioacumularse y biomagnificarse a través de la cadena trófica. Siendo la minería aurífera, principalmente artesanal y de pequeña escala, de las mayores fuentes de descarga de mercurio al medio ambiente a nivel mundial.

Las especies estudiadas Lenteja de agua (*Lemna minor*), Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) y Elodea (*Elodea canadensis*) son plantas potencialmente aprovechables para la depuración de aguas contaminadas con mercurio, esto se ve reflejado en los porcentajes de remoción de este metal del agua en las investigaciones y ensayos aquí mencionados. Sin embargo teniendo en cuenta los resultados se podría decir que la planta con mayor capacidad de absorción es la elodea canadiensis, logrando un porcentaje de remoción de 100% a una concentración de 1.55mg/ml de mercurio (Hg).

Se puede concluir según la información bibliográfica consultada que la fitorremediación es una alternativa eficaz y viable económicamente para realizar procesos de descontaminación de diversos metales pesados, entre ellos el mercurio, tanto en agua, como suelo y aire. Sin embargo para lograr un alto rendimiento en su aplicación deben tenerse en cuenta todos los factores mencionados, como por ejemplo elegir adecuadamente la especie de planta a utilizar de acuerdo

al contaminante y las condiciones apropiadas para su adecuado desarrollo y función, ya que la concentración del mercurio (Hg) debe estar dentro de los niveles tolerados por las plantas, ya que su crecimiento se puede ver limitado.

Los sistemas para aplicación de fitorremediación en aguas residuales pueden ser de cuatro tipos, sin embargo el más empleado para reducir concentración de contaminante es el sistema de humedales artificiales.

En el presente estudio se pudo identificar el deficiente control que se tiene sobre el vertimiento de aguas residuales con el metal pesado mercurio proveniente de la actividad minera de oro, artesanal y a pequeña escala en el Municipio de Marmato, afectando de manera significativa la quebrada cascabel, una fuente hídrica importante para la población cercana, que se ha visto afectada por la acumulación del mercurio en los peces que son ingeridos e inhalación de vapores, este posteriormente es acumulado el organismo humano trayendo como consecuencias especialmente para el sistema nervioso, provocando en algunas personas temblores en las manos, pérdida de memoria, disminución de su coeficiente intelectual y desequilibrio del sueño.

En el transcurso de la investigación se identificó la parte social, donde han tenido muchos conflictos con las multinacionales que han entrado al Municipio queriendo comprar la mayoría de títulos mineros y teniendo en mente un mega proyecto a cielo abierto lo que en simples palabras sería desaparecer el pueblo y desplazar la población, a lo que la comunidad se ha opuesto defendiendo su territorio y tradicional forma de explotación de oro para subsistir.

Para el tratamiento de fitorremediación se eligió como mejor opción la Elodea por su eficiente nivel de absorción, teniendo en cuenta que su técnica de remediación es la fitoextracción, ya esta planta acumula el metal en las raíces y tejidos aéreos, según los referentes

bibliográficos la disposición final de los residuos de las plantas utilizadas debe hacerse por incineración, posteriormente las cenizas deberán ser trasladadas a un vertedero de seguridad, sin embargo una vez analizado cada uno de los métodos, se podría decir que la incineración de residuos contaminados con mercurio no es viable por la contaminación atmosférica que derivaría de hacerlo, por consiguiente la mejor opción es el relleno o celda de seguridad siempre y cuando se realice uno de los pretratamiento mencionados antes de disponerlos.

### **Recomendaciones**

Las tres especies investigadas son macrófitas acuáticas de rápido crecimiento y reproducción, incluso consideradas por muchos como plaga o maleza, ya que invaden en poco tiempo la fuente de agua donde se encuentre. Por lo que si se considera aplicar alguna de estas especies para descontaminar aguas con contenido de mercurio, otro metal o sustancia, es necesario darle un manejo adecuado, se recomienda entonces evaluar métodos de control para evitar su crecimiento a niveles dañinos, como por ejemplo control mecánico (extracción física: vía manual o dragado), control químico (uso de herbicidas), control biológico (peces, insectos, hongos). Sin embargo teniendo en cuenta que el control químico puede ser peligroso por la contaminación con herbicidas en el agua, no es viable, sobre el uso del control biológico se considera no aplica en este caso por el tipo de aguas a tratar, siendo más viable tanto ambientalmente el control mecánico.

Se recomienda realizar actividades de concientización con los mineros y habitantes de esta población sobre el uso del mercurio y nivel de daño que puede provocar en el ambiente y la

salud, proponiendo además otros métodos de explotación y beneficio del oro más tecnificados con ayuda del gobierno y entidades ambientales.

Teniendo en cuenta que Marmato es un municipio minero por tradición y es objetivo de grandes multinacionales para su explotación, debería hacerse un mayor control a los procesos y residuos generados del agua residual que es vertida a las fuentes hídricas cercanas con un mínimo de tratamiento y en muchos casos sin tratamiento alguno, por tanto las entidades territoriales están en el deber de realizar monitoreos periódicos a dichas fuentes con el fin de conocer las concentraciones de mercurio (Hg) presentes en el agua y de acuerdo a la normatividad ambiental exigir se cumpla con los niveles permisibles.

## Referencias bibliográficas

- ADEL y FIAES. (2014). *Investigación de la caracterización del Jacinto de Agua Eichornia crassipes del humedal Cerrón Grande, para determinar su aprovechamiento como materia prima para la elaboración de productos agroindustriales, industriales o artesanales*. Recuperado de [http://www.fiaes.org.sv/library/1920905875\\_20150216014513.pdf](http://www.fiaes.org.sv/library/1920905875_20150216014513.pdf)
- Alaska Center for Conservation Science. (2011). *Canadian wáter weed Elodea canadensis Michx*. Recuperado de [http://aknhp.uaa.alaska.edu/wp-content/uploads/2013/01/Elodea\\_canadensis\\_BIO\\_ELCA7.pdf](http://aknhp.uaa.alaska.edu/wp-content/uploads/2013/01/Elodea_canadensis_BIO_ELCA7.pdf)
- Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW). (2010). *Guidebook for evaluating Mining Project EIAs*. Recuperado de <https://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Full-Guidebook.pdf>
- Alcaldía de Marmato-Caldas. (2016). *Actividad económica de Marmato*. Recuperado de <http://marmato-caldas.gov.co/index.shtml#4>
- Ángel, G., y Alvear, D. (2013). *Análisis del impacto ecosistémico en la zona de influencia de la microcuenca de la quebrada cascabel por afectación al recurso hídrico generado en el proceso de explotación aurífera en Marmato, caldas, Colombia* (Tesis de maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Arenas, A., Meru, L., y Torres, G. (2011). Evaluación de la planta lemna minor como biorremediadora de aguas contaminadas con mercurio. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 2(3), 1-11. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/3236/323627683001/>
- Blanch, A. (2010). Biotecnología ambiental. Aplicaciones biotecnológicas en la mejora del medio ambiente. *Nota d'economia*, 3, 97-98. Recuperado de [http://economia.gencat.cat/web/.content/70\\_economia\\_catalana/arxius/ne-97-98\\_e\\_blanch.pdf](http://economia.gencat.cat/web/.content/70_economia_catalana/arxius/ne-97-98_e_blanch.pdf)
- Blesa, M., y Castro, G. (2015). *Historia Natural y Cultural del Mercurio*. Recuperado de <http://aargentinpnciencias.org/2/images/LibrosDigitales/HistoriaNaturalYCulturalDelMercurio.pdf>
- Cáceres, A. (2007). *Pretratamiento de residuos peligrosos para el relleno sanitario de seguridad*

- de relenos de Rellenos de Colombia* (Tesis de especialización). Universidad Nacional de Santander, Bogotá, Colombia.
- Calderón, J. (2007). El mercurio en la práctica médica y sus efectos en la salud y el ambiente. *Boletín Médico del Hospital Infantil de México*, 64(5), 270-272. Recuperado de <http://new.medigraphic.com/cgi-bin/resumen.cgi?IDREVISTA=100&IDARTICULO=13639&IDPUBLICACION=1410&NOMBRE=Bolet%EDn%20M%E9dico%20del%20Hospital%20Infantil%20de%20M%E9xico>
- Castro, C (2010, 9 de octubre). Parados en oro. *Revista Semana-Sostenible*. Recuperado de <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/marmato-parados-oro/31946>
- Centro Coordinador Convenio Basilea & Centro Regional Convenio de Estocolmo para América Latina y el Caribe (CCCB/CRCE). (2014). *El Convenio de Minamata sobre el Mercurio y su implementación en la región de América Latina y el Caribe*. Recuperado de [http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/informe\\_Minamata\\_LAC\\_ES\\_FINAL.pdf](http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/informe_Minamata_LAC_ES_FINAL.pdf)
- Chaparro, A. (2009). *Los procesos mineros y su vinculación con el uso del agua*. Recuperado de [http://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/1/35691/Eduardo\\_Chaparro\\_agua\\_y\\_mineria.pdf](http://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/1/35691/Eduardo_Chaparro_agua_y_mineria.pdf)
- Comisión Nacional del Agua de México. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales*. Recuperado de <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
- Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD) - Marmato Caldas. (2013). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres*. Recuperado de <http://cedir.gestiondelriesgo.gov.co/dvd/DVD%2004/Caldas/2013%20Marmato/PMGRD%20Marmato.docx>.
- Contraloría General de la República (2014). *Función de advertencia, Contaminación de fuentes hídricas por utilización de mercurio (en mayor proporción y en otros casos cianuro) en minería ilegal de oro*. Recuperado de [http://www.contraloriagen.gov.co/documents/10136/182814564/FA\\_2014EE0131029\\_ContaminacionCianuro.pdf/16f5e05c-cfdb-44f9-a155-e21b26993df3](http://www.contraloriagen.gov.co/documents/10136/182814564/FA_2014EE0131029_ContaminacionCianuro.pdf/16f5e05c-cfdb-44f9-a155-e21b26993df3)

- Cruz, H. (2006). *Estudio de factibilidad de la explotación de la cantera caimital en el municipio de Turbaco (bolívar)*. (Tesis de especialización). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.
- Cubillos, J. (2011). Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos (tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Darrin, H. (2009). *Invasive Species of the Pacific Northwest: Brazilian Elodea, Egeria densa, Anacharis, Philotriadensa, Giant Elodea, Brazilian waterweed*. Recuperado de [http://depts.washington.edu/oldenlab/wordpress/wp-content/uploads/2013/03/Egeria-densa\\_Darrin.pdf](http://depts.washington.edu/oldenlab/wordpress/wp-content/uploads/2013/03/Egeria-densa_Darrin.pdf)
- Defensoría del Pueblo. (2011). *Decimoctavo Informe del defensor del Pueblo al Congreso de la República*. Recuperado de [http://www.defensoria.gov.co/public/pdf/02/18\\_informe\\_congreso\\_I.pdf](http://www.defensoria.gov.co/public/pdf/02/18_informe_congreso_I.pdf)
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, I., y Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597- 612. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-04622011000200002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002)
- Delgadillo, A. (2012). *Determinación de parámetros físicoquímicos, estado eutrófico y metales pesados de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo; identificación de compuestos quelantes de Hydrocotyle ranunculoides L.f.* (Tesis de Doctorado). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Delgado, C.A., Arango, S., y Romero, A. (2014). Una propuesta sistémica para el análisis de la productividad de un proceso minero aurífero Colombiano. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (72), 173-185. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43031750015>
- Díaz, F. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de Salud Pública*, 16 (6), 947-957. Recuperado de <http://www.scielosp.org/pdf/rsap/v16n6/v16n6a12.pdf>
- Domènech, X., y Peral, J. (2006). *Química Ambiental de sistemas terrestres*. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=S4bjFOEXRzMC&pg=PA120&lpg=PA120&dq=>

- metales+pesados+tabla+periodica&source=bl&ots=rfViACAuQ6&sig=QVMREGEnj6jVUhvZkfNBigLkOok&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjf8N\_SwrzMAhUJmR4KHcyhCKg4HhDoAQhDMAc#v=onepage&q=metales%20pesados%20tabla%20periodica&f=false
- Escobar, O. (2010). *Bioacumulación y biomagnificación de mercurio y selenio en peces pelágicos mayores de la costa occidental de baja california sur, México*. (tesis de doctorado). Instituto Politécnico Nacional, México. Recuperado de: <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/16358/escobars2.pdf?sequence=1>
- Español, S. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Revista Biomédica*, 32 (3), 1-3. Recuperado de <http://www.revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/1437>
- Fedesarrollo. (2014). *Minería y Medio Ambiente en Colombia*. Recuperado de [http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/335/1/Repor\\_Junio\\_2014\\_Martinez.pdf](http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/335/1/Repor_Junio_2014_Martinez.pdf)
- Fedesarrollo y Banco Interamericano de Desarrollo. (2014). *Minería informal aurífera en Colombia*. Recuperado de [http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/368/3/Mineria%20informal%20aurifera%20en%20Colombia%20-%20Informe\\_linea\\_base\\_mineria\\_informal%20-%20pagina%20Fedesarrollo.pdf](http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/368/3/Mineria%20informal%20aurifera%20en%20Colombia%20-%20Informe_linea_base_mineria_informal%20-%20pagina%20Fedesarrollo.pdf)
- Frers, C. (2008). El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. *Observatorio Medioambiental*, 11, 301-305. Recuperado de <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/download/OBMD0808110301A/21323>.
- García, A. (2013). Evaluación de la contaminación por vertimiento de mercurio en la zona minera, Pacarní - San Luis departamento del Huila. *Revista de tecnología*, 12(1), 91-98. Recuperado de [http://www.uelbosque.edu.co/sites/default/files/publicaciones/revistas/revista\\_tecnologia/volumen12\\_numero1/010\\_articulo\\_tecnologia\\_UB.pdf](http://www.uelbosque.edu.co/sites/default/files/publicaciones/revistas/revista_tecnologia/volumen12_numero1/010_articulo_tecnologia_UB.pdf)
- García, P., Fernández, R., y Cirujano, S. (2009). *Habitantes del agua: macrófitos*. Recuperado de [http://www.jolube.es/pdf/libro\\_macrofitos\\_andalucia\\_2010.pdf](http://www.jolube.es/pdf/libro_macrofitos_andalucia_2010.pdf)
- García, C., García, J., Bohórquez, M. (2012). Emisión de dioxinas y furanos (PCDD/PCDF) en

- Colombia: evaluación y diagnóstico. *Tecnura*, 16(). 194-206. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2570/257025147023.pdf>
- Gómez, S y Rojas, S. (2014). *Afectación ambiental de la calidad del agua de la quebrada cascabel generada por la explotación minera artesanal del municipio de Marmato departamento de Caldas*. (Tesis maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Guisa, L. (2013). La pequeña minería en Colombia: una actividad no tan pequeña. *Revista Dyna*, 80(181), 109-117. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n181/v80n181a12.pdf>
- Gutiérrez, L. (2006). Perspectivas de la biotecnología en las ecotecnologías. *Revista Scientia Et Technica*, 12(32), 451-456. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/849/84911652079/>
- Gutiérrez, J y Londoño, L. (2012). *Estrategias para el emplazamiento de celdas de seguridad ambientalmente sostenibles*. (Tesis de posgrado). Corporación Universitaria Lasallista, Antioquia, Colombia.
- Instituto de la Amazonia Peruana & Ministerio de Ambiente. (2011). *Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio* (1). Recuperado de <http://cdam.minam.gob.pe/novedades/mineriamadrededios.pdf>
- Jaramillo, M., y Flóres, E. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies Lemna minor (Lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Jaramillo, M., Zapata, L., y Marulanda, T. (2015). Fitorremediación de mercurio a partir de *elodea sp.* *Ing. USBMed*, 6(2), 42-45. Recuperado de <http://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/1730/1503>
- León, D.E., y Peñuela, G. A. (2011). Trascendencia del metilmercurio en el ambiente, la alimentación y la salud humana. *Revista Producción + Limpia*, 6(2), 108-116. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v6n2/v6n2a10.pdf>
- Lizcano, O. (2010, 13 de noviembre). Una multinacional va a terminar de saquear a Marmato. *La patria*. Recuperado de <http://consulta.lapatria.com/story/una-multinacional-va-terminar->

de-saquear-marmato

- López, E. (2014). *Alternativas de disposición para la fitorremediación de suelos contaminados por actividades mineras. Especialización* (tesis de especialización). Corporación Universitaria Lasallista, Antioquia, Colombia.
- Luna, V., y Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), 32-55. Recuperado de <http://revistas.unam.mx/index.php/tip/article/view/49787/44774>
- Mancera, N., y Álvarez, R. (2006). Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 3 – 23. Recuperado de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/27140>
- Marrero, J., Amores, I., y Coto, O. (2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *Revista ICIDCA*, 46(3), 52-61. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223124988007.pdf>
- Martelo, J., y Lara, B. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221-243. Recuperado de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/viewFile/946/850>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2012). *Buscando soluciones para la gestión medioambiental responsable del mercurio*. Recuperado de [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/GESTION\\_MEDIOAMBIENTAL\\_MERCURIO\\_tcm7-284629.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/GESTION_MEDIOAMBIENTAL_MERCURIO_tcm7-284629.pdf)
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España. (2006). *Plantas invasoras. El Lirio de agua*. Recuperado de [http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_FSV%2FFSV\\_2006\\_1\\_1\\_8.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_FSV%2FFSV_2006_1_1_8.pdf)
- Ministerio de Ambiente Perú. (2015). *Por la ratificación del convenio de minamata*. Recuperado de [http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/10/cuadernillo\\_minamata.pdf](http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/10/cuadernillo_minamata.pdf)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Gestión Integral de Residuos*

- o Desechos Peligrosos*. Recuperado de [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias\\_qu%C3%ADmicas\\_y\\_residuos\\_peligrosos/gestion\\_integral\\_respel\\_bases\\_conceptuales.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias_qu%C3%ADmicas_y_residuos_peligrosos/gestion_integral_respel_bases_conceptuales.pdf)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Universidad de Antioquia. (2009). *Celdas de seguridad para la disposición de residuos de riesgo*. Recuperado de: <http://ingenieria.udea.edu.co/memoriastallerresiduossalud/TALLER%20NACIONAL%20BOGOTA/CI-MIN-888-2009%20Alternativas%20%20Celdas%20de%20Seguridad%20MAVDT.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino. (2011). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos*. Madrid, España. Recuperado de [http://www.prtr-es.es/Data/images/MTD\\_Incineracion\\_residuos\\_ES.pdf](http://www.prtr-es.es/Data/images/MTD_Incineracion_residuos_ES.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía (MME). (2009). *Así es la minería*. Recuperado de [http://www.simco.gov.co/Portals/0/archivos/Cartilla\\_Mineria.pdf](http://www.simco.gov.co/Portals/0/archivos/Cartilla_Mineria.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero Energética (MME & UPME). (2007). *Producción más limpia en la minería del oro en Colombia: Mercurio, cianuro y otras sustancias*. Recuperado de [http://www.upme.gov.co/Docs/Mineria\\_limpia.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Mineria_limpia.pdf)
- Muñoz, L., García, L., Rodríguez M. (2012). Percepción sobre daños a la salud y utilidad de medidas de protección de personas expuestas ocupacionalmente al mercurio en la minería del oro. *Revista Lasallista de Investigación*, 9(1), 53-61. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rlsi/v9n1/v9n1a06.pdf>
- Navarro, J., Alonso, A., y López, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Revista Ecosistemas*, 16(2), 10-25. Recuperado de <file:///C:/Users/Pc/Downloads/125-244-1-SM.pdf>
- Oyarzun, R., Higuera, P., y Lillo, J. (2011). *Minería Ambiental: Una introducción a los Impactos y su Remediación*. Recuperado de [http://www.aulados.net/GEMM/Libros\\_Manuales/Libro\\_Mineria\\_MA.pdf](http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/Libro_Mineria_MA.pdf)
- Paisio, C. E., González, P.S., Talano, M.A., y Agostini, E. (2012). Remediación biológica de Mercurio: Recientes avances. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 3(2), 119-146. Recuperado de <http://www.ambientalex.info/revistas/vol3n23.pdf>

- Pérez, V. Ramón, G. (2011). *Efecto de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana*. Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". Pinar del Río. Cuba
- Piñeros, Y. (2013). Tratamiento de aguas residuales y sus avances científicos. *Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*. Recuperado de <http://www.utadeo.edu.co/es/noticia/opinion/ingenieria-quimica/82/tratamiento-de-aguas-residuales-industriales-y-sus-avances>
- Poma, V., y Valderrama, A. (2014). Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (ii) y mercurio (ii) con la especie *Eichhornia Crassipes* (Jacinto de agua). *RevSocQuím Perú*, 80 (3), 164-173. Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v80n3/a03v80n3.pdf>
- Posada, M., Arroyave, M. (2006). Efectos del Mercurio sobre algunas plantas tropicales. *Revista EIA*, (6), 57-67. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n6/n6a06.pdf>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2008). *El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala*. Recuperado de [http://www.ige.org/archivos/IGE/mercurio\\_en\\_la\\_Mineria\\_de\\_Au.pdf](http://www.ige.org/archivos/IGE/mercurio_en_la_Mineria_de_Au.pdf)
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (PNUMA y MADS). (2012). *Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala*. Recuperado de [https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis\\_Nacional\\_de\\_la\\_ASGM.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf)
- Raimann, X., Rodríguez, L., Chavez, P., y Torrejon, C. (2014). Mercurio en pescados y su importancia en la salud. *Revista Médica de Chile*, 142, 1174-1180. Recuperado de <http://www.scielo.cl/pdf/rmc/v142n9/art12.pdf>
- Ramírez, A. (2008). Intoxicación ocupacional por mercurio. *Revista Anales de la Facultad de Medicina*, 69(1), 46-51. Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/afm/v69n1/a10v69n1.pdf>
- Ramírez, M. (2012). Territorialidad y conflicto en un contexto minero: el caso del municipio de Marmato, Caldas. *Ánfora*, 19(33), 89-113. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=357834267005>

- Rodríguez, C. (2015, 20 de agosto). Comiendo mercurio. *El espectador*. Recuperado de <http://www.elespectador.com/opinion/comiendo-mercurio>
- Rodríguez, E. 2016. *Vertederos controlados*. Recuperado de <http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/vertederos-controlados/>
- Rodríguez, E. 2016. *Incineración*. Recuperado de <http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/incineracion/>
- Roldan, N. (2014, 19 de Noviembre). Marmato, el drama de un pueblo que vive sobre una montaña de oro. *Revista cromos*. Recuperado de <http://www.cromos.com.co/actualidad-cronicas/marmato-el-drama-de-un-pueblo-que-vive-sobre-una-montana-de-oro-16018>
- Sepúlveda, N. (2013). *Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver (Vetiveria zizainodes)* (tesis de maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Silva, J (15 de agosto de 2014). Mercurio por minería ilegal ya llega a 80 municipios. *El Tiempo*. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/contaminacion-por-mercurio-debido-a-mineria-ilegal-llega-a-80-municipios/14391252>
- Silva, S. (16 de enero de 2014). La minería en Colombia: la maldición de los recursos naturales. *El Tiempo*. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13366835>
- Silva, S. (15 de agosto de 2014). Mercurio por minería ilegal ya llega a 80 municipios. *El Tiempo*. Recuperado el 20 de julio de 2016 de <http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/contaminacion-por-mercurio-debido-a-mineria-ilegal-llega-a-80-municipios/14391252>
- Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE). (2011). *Informe quincenal de la SNMPE de Perú*. Recuperado de <file:///C:/Users/Pc/Downloads/pdf-697-Informe-Quincenal-Mineria-Tajo-abierto-y-socavon.pdf>
- Tangahu, B., Sheikh, S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., y Mukhlisin, M. (2011). A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 1-31. doi: 10.1155/2011/939161
- Torres, K y Zuluaga, T. (2009). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

- Universidad Politécnica de Madrid. (2006). *Métodos de Minería a Cielo Abierto*. Recuperado de [http://oa.upm.es/10675/1/20111122\\_METODOS\\_MINERIA\\_A\\_CIELO\\_ABIERTO.pdf](http://oa.upm.es/10675/1/20111122_METODOS_MINERIA_A_CIELO_ABIERTO.pdf)
- Grajales, J. (2014). Trabajo infantil en Marmato, Caldas (Colombia). *Revista Gestión y región*, (17), 87-98. Recuperado de <http://biblioteca.ucp.edu.co/ojs/index.php/gestionyregion/article/viewFile/2347/2212>
- Vidal, J. (2009). *Capacidad del guarumo (cecropia peltata) como planta fitorremediadora de suelos contaminados con mercurio* (tesis de magister). Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Weinberg, J. (2010). *Introducción a la Contaminación por Mercurio para las ONG*. Recuperado de [http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/INC2/IPEN%20ONGO%20Guide%20to%20Mercury%20Pollution\\_Spanish.pdf](http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/INC2/IPEN%20ONGO%20Guide%20to%20Mercury%20Pollution_Spanish.pdf)
- Zetina, P., Reta, J., Ortega, M., Sánchez, M., Herrera, J., y Becerril, M. (2010). Utilización de la lenteja agua (lemnaceae) en la producción de tilapia (oreochromis spp.). *Archivos de zootecnia*, 59 (R), 133-155. Recuperado de [http://www.uco.es/organiza/servicios/publica/az/php/img/web/02\\_20\\_13\\_1492REVISIIONEstadoZetina.pdf](http://www.uco.es/organiza/servicios/publica/az/php/img/web/02_20_13_1492REVISIIONEstadoZetina.pdf)
- [Fotografía de Juan Luis Menendez]. (Asturias, 2015). Fotografías de Lemna minor. Astornatura.com
- [Fotografía de Manuel Fernández]. (Tabaza, 2006). Fotografías de Eichhornia crassipes. Astornatura.com