

**Análisis bibliográfico sobre los efectos ambientales generados en el recurso hídrico por la minería aurífera en Antioquia y los métodos de medición y remediación utilizados.**

**Autora**

**Laura Victoria Valdés Pérez**

**Para optar el título de**

**Ingeniera Ambiental**

**Director**

**Kevin Alberto Berthi Mantilla**

**MSc. Ingeniería Ambiental**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD**

**Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente**

**Ingeniería Ambiental**

**Medellín, abril del 2020**

## Índice

Resumen.....	6
2. Planteamiento del problema .....	12
3. Justificación.....	14
4. Objetivos.....	16
4.1 Objetivo general .....	16
4.2 Objetivos específicos .....	16
5. Marco conceptual .....	17
5.1 Minería Aurífera en Antioquia.....	17
5.2 Características, Propiedades Y Aplicaciones Del Oro.....	18
5.3 Yacimientos Auríferos .....	19
5.4 Métodos de extracción del Oro .....	20
5.4.1 Minería artesanal.....	20
5.4.2 Lixiviación, cianuración de material con Oro.....	21
5.5 Contaminación generada en la exploración, explotación y extracción de oro en la minería aurífera .....	21
5.6 Contaminación generada en la explotación de minas auríferas .....	22
5.7 Contaminación del agua.....	23
5.8 El mercurio: Uso y demanda.....	23
6. Marco Legal. ....	27
7. Metodología .....	34
7.1 Tipo de estudio.....	34
7.2 Método de investigación .....	34
7.2.1 Método deductivo.....	34
7.2.2 Método de análisis – síntesis .....	35
7.3 Fuentes y técnicas para la recolección de la información: .....	35
7.4 Tratamiento de la información: .....	37
8. Resultados .....	38
8.1 Criterios para la evaluación de los métodos de remediación. ....	42
8.1.1 Criterios de localización.....	42

8.1.2 Criterios de características del medio.....	43
8.1.3 Criterios de aplicabilidad técnica. ....	43
8.1.4 Criterios de costos asociados. ....	43
8.1.4 Remediación mercurio .....	45
8.1.4.1 Fase sólida .....	46
9. Conclusiones .....	51
10. Bibliografía .....	53

## Índice de imágenes

<b>Imagen 1</b> Títulos mineros solicitados en Antioquia. ....	13
<b>Imagen 2.</b> Radiografía minera en Colombia. ....	37
<b>Imagen 3</b> Método de Fitoextracción .....	46
<b>Imagen 4</b> Sistema para retirar el mercurio del agua .....	49
<b>Imagen 5</b> Plan de erradicación del mercurio en Antioquia.....	50

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Marco legal .....	33
<b>Tabla 2</b> Métodos de remediación convencionales y no convencionales.....	42
<b>Tabla 3</b> Evaluación de los métodos de remediación con los parámetros de localización, características del medio, aplicación de técnicas y costos. ....	45

## Resumen

La situación de la contaminación del recurso hídrico y de las especies que habitan en él para territorios colombianos que tienen presencia de metales pesados u otros tipos de contaminantes ha sido documentada desde hace más de veinte años por diversas fuentes (Campos, 1990; Madrid, 2015; Parra y Espinosa, 2008; Mancera-Rodríguez y Álvarez-León, 2006; Botero y Mancera, 1996). Sin embargo, el análisis de lo que ocurre en el suelo y en la mezcla suelo-agua-contaminante es poco referenciado en estudios nacionales, siendo de interés vital cuando la sustancia que genera el impacto ambiental es un metal pesado como el mercurio.

En Antioquia, los recursos naturales intervenidos en los diferentes procesos de extracción minera que se desarrollan en el departamento de Antioquia se han afectado notoriamente a lo largo de los años y como principal recurso afectado se cuenta con el agua, esto es debido a la utilización sin control de sustancias tóxicas y en algunos casos ilegales como el cianuro y el mercurio. Si bien se han venido desarrollando múltiples trabajos y esfuerzos por remediar el daño e impacto ambiental, cabe recalcar que no todas las técnicas que se denominaron convencionales y no convencionales son aplicables a la realidad del país, ni para el caso de las consecuencias de la explotación aurífera por amalgamación con mercurio.

Por lo anterior, el siguiente documento ha establecido la presencia de diferentes tecnologías que nos permiten evolucionar en la implementación de procesos de remediación de contaminantes, los análisis teóricos de las alternativas que por diversas características podrían ser implementadas de una mejor forma. Sin embargo, la revisión, más allá de la teoría de las alternativas de tratamiento que pudieran ser efectivas para reducir las concentraciones de mercurio en los sistemas hídricos, requiere experimentación, que debe partir de los centros

académicos y de investigación hasta llegar a proyectos piloto que permitan brindar soluciones en los sitios donde está presente el problema, en otras palabras, se puede concluir que la investigación documental concluye que es relevante iniciar los procesos de experimentación y pruebas de laboratorio para recabar información real de las eficiencias de los procesos y de las variables de control requeridas para el mejoramiento y remediación de los efectos ambientales generados por la minería aurífera en Antioquia.

En otras palabras, la investigación documental concluye que es relevante iniciar los procesos de experimentación y pruebas de laboratorio para recabar información real de las eficiencias de los procesos y de las variables de control requeridas para el mejoramiento y remediación de los efectos ambientales generados por la minería aurífera en Antioquia.

## **Abstract**

The situation of contamination of the water resource and the species that inhabit it for Colombian territories that have a presence of heavy metals or other types of pollutants has been documented for more than twenty years by various sources (Campos, 1990; Madrid, 2015 ; Parra and Espinosa, 2008; Mancera-Rodríguez and Álvarez-León, 2006; Botero and Mancera, 1996).

However, the analysis of what happens in the soil and in the soil-water-contaminant mixture is poorly referenced in national studies, being of vital interest when the substance that generates the environmental impact is a heavy metal such as mercury.

In Antioquia, the natural resources in the mining processes that are developed in the department, have been affected over the years and as the main affected resource there is water due to the use of toxic substances such as cyanide and mercury , although multiple works and efforts to remedy the damage and environmental impact have been developed, it should be noted that not all techniques that were called conventional and unconventional are applicable to the reality of the country, nor in the case of the consequences of the gold exploitation by mercury amalgamation.

Therefore, the following document has established the multiple technologies that allow the development of pollutant remediation processes, theoretical analyzes of alternatives that could be implemented in a better way for various characteristics. However, the review, beyond the theory of treatment alternatives that could be effective in reducing mercury concentrations in water systems, requires experimentation, which should start from academic and research centers until reaching pilot projects that allow to provide solutions in the places where the problem is present, in other words, it can be concluded that the documentary research concludes that it is relevant to start the experimentation processes and laboratory tests to gather real information on the



efficiencies of the processes and the variables of control required for the improvement and remediation of the environmental effects generated by gold mining in Antioquia.

## 1. Introducción

Durante muchos años, el estado del recurso hídrico en Colombia se ha convertido en un tema fundamental, no solo por la abundancia con la que cuenta el país, sino también por lograr su cuidado y conservación. Es por esto, que como parte del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico de una cuenca (Decreto 1729 de 2002 – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT) en su fase de diagnóstico, ha determinado que las corporaciones ambientales competentes deben realizar una evaluación y caracterización de la variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua de las fuentes hídricas superficiales, que permita determinar los usos del recurso más adecuados de acuerdo con el Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura y el decreto 3930 de 2010 del MAVDT, así como la capacidad asimilativa de los cuerpos de agua para mantener variables de calidad debajo de intervalos de concentración preestablecidos. Por otro lado, según la Resolución 2145 de 2005 del MAVDT, los mecanismos de recuperación y/o protección que permitan alcanzar los objetivos de calidad del agua de las fuentes de la cuenca, deben ser aplicados previo conocimiento de los procesos naturales y antrópicos que ejercen mayor presión sobre las mismas.

Es así, como la situación de la contaminación del recurso hídrico y de las especies que habitan en él para territorios colombianos que tienen presencia de metales pesados u otros tipos de contaminantes, ha sido documentada desde hace más de veinte años por diversas fuentes (Campos, 1990; Madrid, 2015; Parra y Espinosa, 2008; Mancera-Rodríguez y Álvarez-León, 2006; Botero y Mancera, 1996). El agua es el recurso natural más intervenido en los procesos de extracción minera que se desarrollan en el departamento de Antioquia y el país en general, el cual ha sido afectado notoriamente a lo largo de los años. Esto es debido a la utilización sin control de sustancias tóxicas y en algunos casos ilegales como el cianuro y el mercurio. Si bien

se han venido desarrollando múltiples trabajos y esfuerzos por remediar el daño e impacto ambiental, cabe recalcar que no todas las técnicas que se denominaron convencionales y no convencionales son aplicables actualmente a la realidad del país, especialmente en el departamento de Antioquia, ni para el caso de las consecuencias de la explotación minera aurífera por amalgamación con mercurio.

Por lo anterior, en la presente investigación se realiza una exhaustiva revisión documental y bibliográfica con el fin de obtener información actualizada sobre la presión ambiental que ejerce la minería aurífera sobre el recurso hídrico, además de los métodos de medición y remediación de contaminantes que han sido utilizados en Antioquia. Es de suma importancia conocer el estado actual de la presencia de diferentes tecnologías que permiten evolucionar en el desarrollo de procesos de remediación de contaminantes y los análisis teóricos de las alternativas que por diversas características podrían ser implementadas de una mejor manera. Además, la presente investigación pretende más allá de la teoría de las alternativas de tratamiento que pudieran ser efectivas para reducir las concentraciones de contaminantes en los sistemas hídricos, recalcar la importancia de la realización de ejercicios de experimentación en campo, que debe partir de los centros académicos y de investigación a partir de este tipo de investigaciones, hasta llegar a proyectos piloto que permitan brindar soluciones en los sitios donde esté presente el problema.

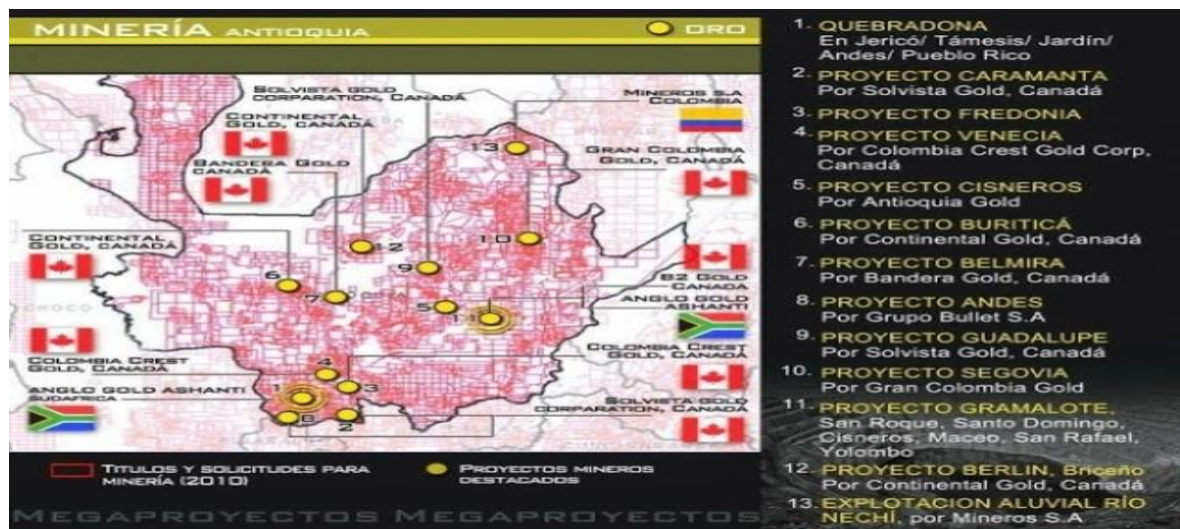
## **2. Planteamiento del problema**

Durante muchos años los minerales han jugado un papel esencial en las exportaciones del país, generando ingresos significativos. De hecho, su participación en el Producto Interno Bruto es cada vez más importante, ya que según datos otorgados por el banco de la república en el balance general del año 2017 se considera que la minería representó un 7,7% mientras que sectores como el industrial y el agropecuario apenas alcanzaron 1,6 y 1,8 puntos porcentuales. A pesar de ello, las acciones correctivas y preventivas de las empresas encargadas de la explotación minera en Colombia, son mínimas con respecto al daño ambiental que actualmente están causando, debido a que estas producen alteraciones a los diferentes recursos naturales como el suelo y agua, debido a que por las actividades desarrolladas deben deforestar, excavar, extraer y transportar materiales, realizando de esta forma drásticos cambios a las condiciones naturales del paisaje, alterando los ecosistemas y provocando así la pérdida del suelo y aumentando el riesgo de la formación de fenómenos erosivos que notoriamente podrían causar desastres naturales y afectaciones ambientales.

Colombia es el segundo país después de china que más contamina con el uso irracional de mercurio y el más contaminante de América latina, todo esto se debe a que la locomotora minera fomentada en el país lleva consigo el aumento de minería ilegal o informal, que es un tipo de minería no deseada ya que con esta se lleva a la presencia de diferentes grupos al margen de la ley. En el año 2013 a través de la ONU, 91 países firmaron un acuerdo llamado minamata, acuerdo que buscó proteger la vida humana y el medio ambiente de los efectos adversos del mercurio (PNUMA, 2013). Con las iniciativas propuestas para la prevención de enfermedades y el control de epidemias y demás males a la salud causada por el uso del mercurio en la minería y con la firma de este convenio, Colombia gestionó un plan para el control y reemplazo del

mercurio a mediano y largo plazo. Con este plan, no se ha llegado a lograr mayor avance ya que el mercurio aún se encuentra disponible en el mercado sin ningún control para su uso en la extracción de oro a pequeña escala.

Se observa, que de manera muy urgente se busquen soluciones a los problemas de contaminación ambiental al recurso hídrico causado por la utilización y aplicación de compuestos tóxicos en la extracción del oro en algunas zonas del departamento de Antioquia, debido a que el 15% de oro en el mundo se extrae de manera artesanal en pequeñas minas y en la mayoría de ellas se utiliza el mercurio. Luego, al querer imitar y tener mayor rentabilidad en la extracción del oro en Antioquia, se han ido perdiendo las costumbres que se tenían años atrás, ya que el uso de azogue para la amalgamación a desplazado el uso de instrumentos y herramientas artesanales como bateas, barras, barretones, jagueros, canalones, entre otros, con los cuales se lograba extraer oro de una manera amigable con el medio ambiente.



**Imagen 1** Títulos mineros solicitados en Antioquia.

Fuente: <https://noalamina.org/latinoamerica/colombia/item/12466-investigacion-conflictos-asociados-a-la-gran-mineria-en-antioquia>

### **3. Justificación**

La minería es sin duda alguna una de las actividades industriales más contaminantes del planeta, debido a que para poder llevar a cabo la extracción de los minerales se realiza un consumo y/o uso excesivo de los recursos naturales como el agua y el suelo. Un ejemplo claro de ello es la minería para la extracción de oro, donde se utiliza mercurio para separar las partículas del metal de la roca extraída de la mina. El mercurio Hg, es un elemento químico, tóxico y nocivo para la salud, que es usado en el proceso de amalgamación y posteriormente termina depositado como residuo en las fuentes hídricas generando altos niveles de contaminación en los peces, animales que beben agua del río, y por supuesto las comunidades que viven aguas abajo del vertimiento. Lastimosamente la subsistencia de estas comunidades depende de estos afluentes contaminados por la actividad minera realizada de forma irresponsable.

Colombia por ser un país rico en minerales, ha sido de los más afectados por los procesos extractivos mineros, ocasionando que el medio ambiente de la zona de actividad minera se haya visto notoriamente afectado. Según (Salamanca, L., 2013) en el reporte de la “Minería en Colombia” entregado a la Contraloría General de la República, ha establecido que “el gobierno nacional está buscando entre sus prioridades que la actividad minera sea explotada en gran escala, ya que los recursos minerales del país pueden generar las divisas necesarias para atender las necesidades tanto de las zonas afectadas por la minería, como otras de carácter nacional”.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, el departamento de Antioquia no es ajeno a esta situación, el cual afortunadamente cuenta con organismos ambientales, tales como la Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) de Antioquia, las cuales vienen trabajando en conjunto con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y las diferentes entidades involucradas y responsables del sector minero, que desde el año 2016 han desarrollado Planes de

Manejo Ambiental (título minero), donde se destacan los permisos y licencias necesarias para llevar a cabo la explotación de los recursos de la minería y compromisos ambientales buscando establecer un equilibrio entre la explotación y el medio ambiente. Este documento deja de lado los efectos y los métodos químicos necesarios para establecer y disminuir los contaminantes sobre el aire, el agua y el suelo causado por la minería de oro, temas base de esta investigación que no han sido protagonistas de estudios por entes territoriales o gubernamentales, quizás se ha avanzado un poco en la importancia de que la explotación no se haga de forma ilegal y que cuente con todos los permisos exigidos por el ente regulador.

Dadas las condiciones desfavorables que se presentan en la actualidad, donde la extracción minera es una de las locomotoras más considerables para el gobierno, se hace importante que dentro del campo de acción del ingeniero ambiental, se adquiera conocimientos sobre los procesos mineros, los contaminantes, las emisiones y los controles específicos que permitirán levantar alertas tempranas para remediar de manera más eficaz cualquier impacto sobre el suelo, el aire y el agua que puedan darse a cabo por los procesos no autorizados de minerales y principalmente el oro.

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Realizar una revisión bibliográfica sobre los efectos ambientales generados, métodos de medición y remediación que han sido utilizados por la minería aurífera en Antioquia en el recurso hídrico.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Consultar cuáles son los principales contaminantes derivados de la minería aurífera, sus características e impacto ambiental.
- Analizar los reportes de casos de contaminación hídrica por minería aurífera en Antioquia, los métodos de medición y tratamiento utilizados.
- Proponer metodologías de monitoreo y remediación de vanguardia tecnológica para ser aplicables en el proceso de tratamiento de las aguas residuales provenientes de la minería aurífera.



## **5. Marco conceptual**

Según la Contraloría General de la República (2014), 80 municipios y 17 departamentos tienen problemas de contaminación producto del uso de mercurio empleado para la extracción artesanal de oro y su situación corresponde a un incremento histórico de la explotación. Dentro de los departamentos en riesgo se encuentran Amazonas, Antioquia, Bolívar, Caldas, Cauca y Chocó. Los departamentos de Antioquia y Bolívar poseen la mayor cantidad de minas para extracción de diferentes minerales activas del país y producen alrededor de 18.8 toneladas de oro (Olivero y Johnson, 2002). Si bien no se tiene un dato exacto sobre cuanto mercurio es liberado al ambiente por parte de la UPME, se estima que 80 – 100 toneladas por año son arrojadas al ambiente en Colombia (Olivero & Johnson, 2002).

### **5.1 Minería Aurífera en Antioquia**

Las tradiciones mineras de los habitantes del Bajo Cauca antioqueño comienzan desde de la época colonial cuando los españoles se enteraron de la gran riqueza con la que contaba el departamento de Antioquia, ordenó una campaña en la cual desplazaran y aniquilaban las comunidades pobladoras del territorio quienes eran indígenas y eran quienes extraían el mineral para ser utilizado para la orfebrería, vinculado como agradecimiento espiritual; por lo cual el metal precioso no era frecuente que se realizara su intercambio ni el uso comercial.

Gran parte de la minería que se desarrolla en el Bajo Cauca es de extracción de oro, tanto aluvial como de veta, situación que históricamente se ha evidenciado, tanto así que la mayoría de títulos auríferos están en el Bajo Cauca antioqueño y más recientemente en el departamento de Chocó. No obstante, únicamente cerca del 25% de los títulos formales están en fase de explotación, por lo que se podría esperar que la producción de oro se incremente de manera

exponencial en los próximos años; lo anterior sin tener en cuenta la minería informal e ilegal que actualmente se desarrolla en la región.

Según cifras reportadas por la Unidad de planeación minero energética (UPME) en el documento, El sector minero Colombiano Actual, se concluye que: “la producción de oro del Bajo Cauca para el año 2014 es de 14 millones de gramos, lo que representaba el 51%. El Sector Minero Colombiano Actual de la producción total de oro en Antioquia y un 25% del total nacional” (pág. 3).

## **5.2 Características, Propiedades Y Aplicaciones Del Oro**

Algunos autores, (Fitzpatrick, P. 2013) consideran que El oro (Au) es un elemento químico que se encuentra en estado natural, de color amarillento, es considerado metal precioso. Algunas de sus características principales son las siguientes (pág. 201):

- Considerado el metal más flexible y suave,
- Buen conductor del calor y la electricidad
- Tiene una alta resistencia a la alteración química por parte del calor, la humedad y la mayoría de los agentes corrosivos
- Es un metal muy denso, con un alto punto de fusión y alta afinidad electrónica.
- Sus estados de oxidación más importantes son: 1+ y 3+
- No reacciona con la mayoría de los compuestos químicos, pero es soluble con Cianuros alcalinos (cianuro de potasio o cianuro de sodio), Agua regia (mezcla de ácido clorhídrico - HCL y ácido nítrico – HNO<sub>3</sub> en relación 3:1), Mercurio (Hg) y con soluciones que contienen cloruros (Cl<sup>-</sup>), bromuros (Br<sup>-</sup>) o yoduros (I<sup>-</sup>).

El oro tiene varias aplicaciones, según el autor (Fitzpatrick, 2013) considera que las más relevantes son: “En electricidad al recubrir la superficie de las conexiones, en medicina uno de sus isótopos es usado en radioterapias para combatir el cáncer y también se emplea en la industria aeroespacial para recubrir partes esenciales en los satélites ya que el oro es un buen repelente de la luz infrarroja. (pág. 203).

### **5.3 Yacimientos Auríferos**

Basado en los citados por Fitzpatrick, en el artículo, “Heterogeneous photocatalysis: recent advances and applications. Catalysts”, los yacimientos auríferos son diversos y se mencionará a continuación los principales:

- Depósitos de venas epitermales: son depósitos de oro que están entre 1 km hasta 2 km por debajo de la corteza debido a la actividad volcánica de la Tierra que permiten que los minerales se mezclen y oxiden químicamente y alteren los elementos. (pág. 202).
- Depósitos alojados de piedra verde: Los depósitos alojados de piedra verde son regiones de la corteza de la superficie donde grandes cantidades de piedra verde, un tipo de roca metamórfica, se acumula a lo largo de las líneas de la falla (pág. 203).
- Depósitos de skarn: El skarn es una roca metamórfica con una gran cantidad de silicato. (pág. 203).

Muchos, si no todos, los depósitos de oro tardan millones de años en desarrollarse. La mayoría de los depósitos de oro, ya sea que estén profundos en la corteza terrestre o cerca de la superficie, se han desarrollado como resultado de la actividad de la roca metamórfica.

Esto significa que los depósitos sedimentarios del agua del océano y la actividad volcánica ayudan a alterar químicamente los elementos lo suficiente como para crear los depósitos de oro que se ven hoy en día.

## **5.4 Métodos de extracción del Oro**

Laguna, J. (2010) en el documento, “La gobernanza ambiental internacional y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente”, ha concluido que:

Una vez finalizada la etapa de exploración, se procede a explotar el yacimiento principalmente a través de minería subterránea, para lo cual se realizan cámaras a través de las formaciones, siguiendo la ruta de afloramiento del cuarzo aurífero. En la mina se realizan perforaciones sistemáticas a la roca, donde se colocan explosivos para su posterior explosión, con la finalidad de obtener material granulado que sea transportable fuera de la mina y llevado a la planta de extracción (pág. 153).

Se puede utilizar varias técnicas para la extracción de oro, pero las más utilizadas son la minería artesanal y la lixiviación:

### **5.4.1 Minería artesanal**

Suárez, L. G. (2011), señalan que esta técnica utiliza un recipiente hundido de poca profundidad, de unos 25 a 35 centímetros de diámetro. Antiguamente estos recipientes o bateas eran de metal, pero actualmente se usan también los de plástico, con un detector de metales puede saberse de antemano si el material contendrá oro o no. El procedimiento consiste en llenar el recipiente con la arena y gravilla que contiene oro, sumergirlo en agua y agitarlo. Como el oro es más denso que la arena o la roca se asienta en el fondo (pág. 172).

El oro normalmente se encuentra en las orillas de los ríos y los arroyos y con la misma agua de éstos se realiza la separación del oro y las arenas, en algunos casos se encuentra el metal en orillas secas por lo cual debe tomarse agua de alguna fuente cercana. El bateo es una técnica

tradicional muy usada porque evidentemente es muy sencilla y se realiza de forma individual pero no es viable para extraer el oro de los grandes depósitos.

#### **5.4.2 Lixiviación, cianuración de material con Oro**

El tratamiento metalúrgico de las menas de oro está basado principalmente en las propiedades inusuales del oro nativo y sus posibles aleaciones con plata. Ambientales tales como, Olivero, J., Mendonza, C., & Mestre, J. (1995), aseguran que dado el alto peso específico del metal comparado con los de la ganga asociada y por su solubilidad en soluciones alcalinas diluidas de cianuro de sodio o potasio (pag 191), hacen este proceso mas viable y rentable para las grandes compañías.

#### **5.5 Contaminación generada en la exploración, explotación y extracción de oro en la minería aurífera**

Todos los métodos de extracción minera producen algún grado de alteración de la superficie y los estratos subyacentes, así como los acuíferos. Para docente de la Universidad Nacional de Colombia, Díaz-Arriaga, F. A. (2014), los impactos de la exploración y pre-desarrollo, usualmente, son de corta duración e incluyen (pág. 23):

- alteración superficial causada por los caminos de acceso, hoyos y fosas de prueba, y preparación del sitio;
- polvo atmosférico proveniente del tráfico, perforación, excavación, y desbroce del sitio;
- ruido y emisiones de la operación de los equipos a diésel;
- alteración del suelo y la vegetación, ríos, drenajes, humedales, recursos culturales o históricos, y acuíferos de agua freática; y, conflictos con los otros usos de la tierra.

Las diferencias se darán a partir de la explotación y extracción de metales donde los procesos tienen notables cambios y sobre todo en la fase de extracción de oro donde se aplican químicos muy contaminantes.

### **5.6 Contaminación generada en la explotación de minas auríferas**

Cano, S. E. (2012), asegura que, “tanto la extracción superficial, como la subterránea, incluyen los siguientes aspectos: drenaje del área de la mina y descarga del agua de la misma; remoción y almacenamiento/eliminación de grandes volúmenes de desechos; y traslado y procesamiento de los minerales o materiales de construcción” (pág. 23). Este removimiento requiere el uso de equipos de extracción y transporte a diésel o eléctricos, y una numerosa y calificada fuerza laboral. Se requerirán amplios servicios de apoyo, por ejemplo, un complejo de transporte, oficinas y talleres (parte de estos funcionarán bajo tierra en las minas subterráneas) y servicios públicos. El transporte del mineral dentro del área de la mina y hacia las instalaciones de procesamiento puede utilizar camiones, poliducto o banda de transporte, y generalmente, incluirá instalaciones de almacenamiento a granel, mezcla y carga.

De acuerdo con Pantoja (2001), en la minería que se desarrolla en el sur del país, se emplean aproximadamente 5 kg de mercurio para obtener 1 kg de oro. Por su parte, la Corporación Autónoma Regional del Cauca (2007) reporta que para la extracción de 0.0019 kg oro son necesarios alrededor de 0.112 kg de mercurio.

Acorde con los datos recopilados por el MAVD (2010) en 2009, fueron liberados al ambiente 345.570 kg de mercurio, distribuidos de la siguiente manera: 31 260 kg generados al agua, 74 420 kg al aire y 151 650 kg al suelo, 45 400 kg durante el tratamiento o la disposición, 28 190 kg producidos en impurezas y 14 650 kg en residuos generales. Esto refleja que la matriz

que se ve más afectada es el suelo y que donde se produce una mayor liberación es durante la disposición.

### **5.7 Contaminación del agua**

Los hoyos mal sellados, o que no tengan el entubado adecuado, pueden permitir intercambio y contaminación entre los acuíferos. Si no es neutralizada o tratada adecuadamente, el efluente del proceso de eliminación de agua de las minas superficiales o subterráneas, puede ser muy ácido, y contaminará las aguas superficiales locales y las aguas freáticas de poca profundidad, con nitratos, metales pesados o aceite de los equipos, reduciendo las existencias locales de agua, o causando erosión en los ríos y canales.

Suárez, L. G. (2011), en el documento “Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia”, ha concluido que la remoción de estratos de piedra puede interrumpir la continuidad del acuífero local, y producir interconexiones y contaminación entre las aguas subterráneas; el material de relleno puede alterar las características hídricas y calidad del agua. La extracción in situ puede contaminar el acuífero si se pierde el control del lixiviador o se deja de neutralizar adecuadamente la región lixiviada al finalizar las operaciones.

### **5.8 El mercurio: Uso y demanda**

El mercurio es el elemento metálico de peso atómico 200,61 g/mol; es el único metal en Estado líquido a presión y temperatura ambiente. Este metal es inoxidable con una gravedad específica de 13.6 g/cm<sup>3</sup>; su punto de fusión es bajo, 357°C, y es un muy buen conductor del calor y de la electricidad; su presión de vapor es de  $2 \times 10^{-3}$  mm de Hg 25°C, por ello cuando el mercurio eleva su temperatura por encima de 40°C, produce vapores corrosivos, tóxicos y más pesados

que el aire; adicionalmente, es muy soluble en ácido nítrico concentrado, acetileno, amoníaco y cloro.

Por ser líquido a temperatura ambiente y por tener una presión de vapor baja, su movilidad en el aire es significativa; el valor de solubilidad en agua, entre de 0,02 mg/L a 25°C, indica que es de mediana movilidad en agua y el valor Log Kow de 5,95 muestra su alta afinidad con la biota animal; además, el mercurio no solo es altamente bio acumulable sino que forma parte de una cadena trófica; las especies mayores como el hombre pueden no solo acumularlo sino bio magnificarlo en sus organismos.

El mercurio se presenta en la naturaleza en diferentes especies químicas: las de tipo elemental ( $Hg_0$ ), las de tipo inorgánico ( $Hg^+$ ,  $Hg^{2+}$ ) y las orgánicas, es decir, aquellas que involucran átomos de hidrógeno y carbono. El mayor o menor efecto tóxico del mercurio depende de su forma química y de la vía de exposición; el metil-mercurio ( $HgCH_3$ ) y el dimetil-mercurio ( $Hg(CH_3)_2$ ) son las formas orgánicas más tóxicas que afectan al sistema inmunológico, alteran los sistemas genéticos y enzimáticos y dañan el sistema nervioso, incluyendo la coordinación y los sentidos del tacto, el gusto y la vista.

Idrovo, Á. J., Manotas, L. E., Villamil, G., Ortiz, J. E., Silva, E., Romero, S. A., & Azcárate, C. E. (2001), consideran que las principales manifestaciones por intoxicación con mercurio en el organismo humano son los daños al sistema nervioso, daños cerebrales, daño al ADN y a los cromosomas, reacciones alérgicas, cansancio, dolor de cabeza y defectos de nacimiento y abortos (pag 28).



El mercurio, dentro de la industria minera artesanal y semi-industrial es utilizado al aprovechar su propiedad de aleación con metales para lograr la extracción del metal precioso de la veta rocosa. El mercurio hace una aleación con el metal precioso y la amalgama resultante es sometida a procesos de separación por vía térmica, realizando un calentamiento. De la amalgama, el mercurio se evapora y, en los casos semi-industriales, se recupera con un sistema de condensación, mientras que el remanente es el metal precioso -oro o plata-. El sistema es relativamente sencillo y muy eficiente, sin embargo, durante el proceso siempre hay un nivel de desperdicio tanto en el proceso de amalgamación como en el de separación y condensación, donde el mercurio se pierde, ya sea en forma líquida, ya sea en forma de vapor, liberándose en el ambiente (Martínez y Uribe, 2015).

Así mismo, los autores concluyen que el mercurio elemental sigue siendo utilizado en diferentes tipos de industrias como en la producción de cloro-soda, en la fabricación de equipos eléctricos y de máquinas e instrumentos científicos y de laboratorio, en las amalgamas dentales y otros compuestos similares, en la fabricación de productos químicos para fotografía y en la fabricación de lámparas fluorescentes, por mencionar algunos usos; también sus sales tanto orgánicas como inorgánicas tienen aplicaciones industriales en pinturas, en la industria cosmética y farmacéutica, en la producción de algunos catalizadores y en la elaboración de plaguicidas; el mercurio es contaminante de varios minerales de los que se extraen diferentes materias primas y además es parte constitutiva de varios bienes de uso masivo como los termómetros de mercurio.

El mercurio presente en las zonas mineras tiene dos orígenes: el natural y el antropogénico. Si bien en ocasiones se han reportado trazas de mercurio en fuentes de aguas no intervenidas por vertimientos mercuriosos (ya sea de minería, de agricultura o de industria),

inclusive sobrepasando los límites permisibles en agua, el fenómeno se explica por presencia de mercurio metálico y de minerales de mercurio en rocas y en casos muy aislados por transportes de corrientes de aire con vapores de erupción de eventos volcánicos.

## 6. Marco Legal.

<b>Día</b>	<b>Mes</b>	<b>Año</b>	<b>Ajuste normativo</b>	<b>Finalidad</b>	<b>Dependencia/plan/programa/proyecto</b>	<b>Instancia de gobierno</b>	<b>Fuente</b>
18	12	1974	Decreto 2811	Reglamenta el uso de los recursos Naturales Renovables	N/D	Presidencia de la república	Sistema Único de Información
26	5	2015	Decreto 1076	Se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales" Explotación minera: En lo que respecta a la definición de explotación minera se acogerá lo dispuesto en la Ley 685 de 2001, o la que la modifique, sustituya o derogue	El rector de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado orientar y regular ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los	Presidencia de la república	Normativa – SUIN  MDE, 2001

					recursos naturales renovables y del ambiente de la Nación, a fin de asegurar el desarrollo sostenible, perjuicio de funciones asignadas a otros sectores.		Puentes, L.M. 2012  Rojas, J., Zamora, A., Tamayo, P. and García, M., 2011.
15	7	2013	Ley 1658	En la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones	A efectos de proteger y salvaguardar la salud humana y preservar los recursos naturales renovables y el ambiente, reglámente en todo el territorio nacional el uso, importación, producción, comercialización, manejo, transporte, almacenamiento, disposición final y liberación al ambiente del mercurio en		DNP, 2014  Decreto

					las actividades industriales, cualquiera que ellas sean.		1898/16
11	6	1997	Ley 373	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.	Todo plan ambiental regional y municipal debe incorporar obligatoriamente un programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Se entiende por programa para el uso eficiente y ahorro de agua el conjunto de proyectos y acciones que deben elaborar y adoptar las entidades encargadas de la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción	Congreso de Colombia	

					hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico.	
17	3	2015	Resolución 631	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones"	La presente Resolución establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible
		1984	Decreto 1594	Usos del agua y residuos líquidos	N/D	Ministerio de salud

25	10	2010	Decreto 3930	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.	Conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación ambiental para garantizar el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales,	Presidencia de la república
26	5	2015	Decreto 1073	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía	N/D	Presidencia de la república
26	7	1978	Decreto 1541	Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley	N/D	N/D

				23 de 1973		
		2002	Decreto 1729	Cuencas hidrográficas		
15	8	2001	Ley 685	Por el cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones	Fomentar la exploración del territorio nacional y de los espacios marítimos jurisdiccionales, en orden a establecer la existencia de minerales; a facilitar su racional explotación; a que con ellos se atiendan las necesidades de la demanda; a crear oportunidades de empleo en las actividades mineras; a estimular la inversión en esta industria y a promover el desarrollo de las regiones donde se adelante.	Congreso de Colombia



11	5	2018	Ley 1892	POR MEDIO DE LA CUAL SE APRUEBA EL ((CONVENIO DE MINAMATA SOBRE EL MERCURIO», HECHO EN KUMAMOTO (JAPÓN) EL 10 DE OCTUBRE DE 2013."	Reconociendo que el mercurio es un producto químico de preocupación mundial debido a su transporte a larga distancia en la atmósfera, su persistencia en el medio ambiente tras su introducción antropógena, su capacidad de bioacumulación, en los ecosistemas y sus importantes efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente.,	Congreso de Colombia
----	---	------	----------	--	---	----------------------

**Tabla 1.** Marco legal

## **7. Metodología**

### **7.1 Tipo de estudio**

El tipo de estudio empleado para la elaboración de este trabajo de grado es descriptivo ya que busca mostrar las acciones que describen cómo la minería artesanal e ilegal en Colombia está provocando una contaminación desmedida a los recursos naturales en especial el hídrico, los impactos negativos y desfavorables generados al medio ambiente, los recursos y a la población humana con el depósito de mercurio, cianuro y demás elementos químicos que son utilizados en ésta práctica.

La creación de la necesidad de crear y practicar una minería sostenible económica y ambientalmente es un tema que ya ha sido evaluado y aprobado por diferentes autores, entidades responsables y organizaciones tanto nacionales como mundiales, aunque a la fecha en Colombia no se ha logrado obtener o terminar un plan estratégico debidamente organizado y estructurado.

### **7.2 Método de investigación**

**7.2.1 Método deductivo:** El primer aporte relevante, respecto al desarrollo de un método sistemático para descubrir la verdad, fue efectuado por los filósofos griegos. Aristóteles (384 a. C. - 322 a. C.) y sus discípulos establecieron el razonamiento deductivo como un proceso del pensamiento en el cual de afirmaciones generales se llega a afirmaciones específicas aplicando las reglas de la lógica (Dávila, G., 2006).

En este trabajo se hará uso del método deductivo ya que lo que se busca es que a partir del análisis y la investigación de las experiencias aprendidas y vividas en el ejercicio de la explotación minera del oro por parte de empresas responsables y mineros artesanales, y de los

estudios socioeconómicos y ambientales efectuados a nivel global, nacional y departamental, para buscar alternativas y soluciones a los impactos negativos generados por la contaminación al recurso hídrico con sustancias tóxicas en especial para el caso de Antioquia

**7.2.2 Método de análisis – síntesis:** Se trata de un método relacionado con el pensamiento crítico. Análisis-síntesis son procesos mentales que se complementan entre sí, de inmensa utilidad en el estudio de problemas o realidades complejas. En el análisis se lleva a cabo una separación de las partes de los problemas o realidades hasta llegar a conocer los principales elementos que los conforman y las relaciones que existen entre ellos. La síntesis hace referencia a la composición de un todo mediante la unión de las partes, agrupándolas u organizándolas de diversas maneras. Análisis y síntesis son opuestos entre sí, el final del primer proceso marca el inicio del segundo (**Morales, M., 2013**).

Las diferentes fuentes que serán consultadas para la elaboración de este trabajo, sometidas a un proceso de análisis con el fin de unificar la información y poderla procesar de una manera más entendible para los lectores, tomando en cuenta cada uno de los componentes que influyen de manera significativa en el ejercicio de la exploración minera del oro y las afectaciones ambientales y especialmente en el recurso hídrico en el departamento de Antioquia, con el propósito de conocerlos y estudiarlos mucho más a profundidad y así poder determinar y evaluar cual es la forma en la cual se relacionan, lo que permitirá posteriormente, reorganizarlos y darles una estructura con el fin de formular respuestas a la problemática hallada.

**7.3 Fuentes y técnicas para la recolección de la información:** el presente trabajo de revisión bibliográfica se basará específicamente al uso de fuentes de información secundarias (libros

especializados, artículos, textos técnicos, tesis de grado, prensa, etc.) relacionadas con la explotación minera aurífera y las afectaciones al recurso hídrico que la realización de la actividad conlleva, investigación de documentos sobre la utilización de agentes contaminantes como mercurio y cianuro en la extracción de oro en diferentes idiomas, de autoría tanto de expertos o personas interesadas en sacar a relucir tan importante tema, como de entidades nacionales y extranjeras, con el propósito de obtener un panorama lo más completo y claro posible, analizando y considerando diferentes puntos de vista y documentos de interés para los lectores e investigadores a los cuales les llame la atención todo lo que tiene que ver con la minería y las consecuencias que ésta lleva consigo.

**7.4 Tratamiento de la información:** se seleccionará la información más relevante y necesaria para el propósito del estudio, que sea procedente de fuentes confiables, se realizará un análisis y se organizará a través de tablas y gráficos, facilitando así su gestión, comprensión y consolidación, a fin de que sea empleada como insumo en la construcción de la revisión bibliográfica de los impactos generados al recurso hídrico con la disposición de sustancias tóxicas como resultado de la extracción minera aurífera.



**Imagen 2.** Radiografía minera en Colombia.

## 8. Resultados

Revisando los resultados obtenidos en la tabla 2.0, se puede establecer que los métodos más viables para la remediación de fuentes hídricas contaminadas por la minería aurífera son:

- Landfarming.
- Fitotratamientos.
- Oxidación química.
- Oxidación avanzada.
- Electrocinética.
- Barreras biológicas y electrorremediación.
- Fitorremediación con endófitas.
- Ingeniería genética con fitorremediación.

Esto implicaría que existen cuatro tecnologías convencionales, la landfarming, la fitotratamientos, la oxidación química y electrocinética, las cuales tienen alta aplicabilidad según los criterios evaluados. A estas le siguen cuatro tratamientos no convencionales. La oxidación avanzada, las barreras biológicas/electrorremediación, la fitorremediación con endófitas y por último, la ingeniería genética/fitorremediación.

Desde este punto, es claro que los esfuerzos en desarrollar proyectos piloto -usando los métodos de remediación convencionales mencionados- y las necesidades de ahondar en investigaciones de laboratorio -usando los métodos de remediación no convencionales mencionados- deben dirigir el desarrollo de trabajos in situ y en laboratorio en el país, pensando en el manejo óptimo de los recursos y, asimismo, en las necesidades de ampliar el

espectro de los métodos aplicables a la naturaleza de las problemáticas presentes en el territorio nacional

La remediación de la contaminación de los recursos y en éste caso el hídrico causada por la utilización de metales pesados u otros tipos de contaminantes en la minería aurífera, ha venido siendo documentada desde 1990 por diversas fuentes (Campos, 1990; Madrid, 2015; Parra y Espinosa, 2008; Mancera-Rodríguez y Álvarez-León, 2006; Botero y Mancera, 1996). Sin embargo, el análisis de lo que ocurre en la mezcla del suelo, el agua y el contaminante es poco referenciada en estudios nacionales (Colombia), siendo de interés vital cuando la sustancia que genera el impacto ambiental es un metal pesado como el mercurio.

Según el Manual de Legislación Ambiental, la remediación consiste en un conjunto de técnicas que tienen como objetivo hacer la recuperación de suelos o cuerpos de agua contaminados, con miras a restaurar algunas de las características y propiedades de la matriz ambiental, de tal modo que se puedan conservar y/o mejorar las características, se mantenga el equilibrio eco sistémico y se evite de esta manera generar un mayor peligro para animales, plantas y seres humanos (pag 21). En algunos casos, se debe realizar un tren de tratamientos para alcanzar el objetivo principal de la remediación

Los tratamientos de remediación también se pueden clasificar de acuerdo con si son convencionales -tradicionales- o no convencionales (innovadoras). Para el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climática (INECC, 2007), los primeros se refieren a aquellos tratamientos que han sido probados de manera artesanal y empírica o afuera de laboratorios o plantas certificadas, además en sus resultados se evidencian las buenas prácticas y técnicas utilizadas y se encuentran disponibles en la región en la cual se requieren, esto no hace necesaria la búsqueda

de elementos, insumos o personal para poder llevar a cabo los ensayos y de ésta manera obtener resultados óptimos. Los tratamientos no convencionales son aquellos cuyas bases parten de los fundamentos teóricos de los denominados convencionales, pero a diferencia éstos buscan aumentar la eficiencia de remoción y disminuyendo los tiempos de dicho proceso frente a los tratamientos convencionales

No todas las técnicas que se denominaron convencionales y no convencionales son aplicables a la realidad que se está llevando a cabo en los planes pilotos utilizados en el departamento de Antioquia, ni para el caso de las consecuencias de la explotación aurífera por amalgamación con mercurio. Por ello, conviene desarrollar un análisis teórico de las alternativas que por diversas características podrían ser implementadas de una mejor forma y, desde allí, iniciar los procesos de experimentación y pruebas de laboratorio para recabar información real de las eficiencias de los procesos y de las variables de control requeridas, por lo cual se precisan algunas actividades necesarias.

- No debe haber destrucción ecológica masiva por la cual se puedan causar daños o cambios al ecosistema.
- Las cargas de sedimentos aportados a los lagos, ríos y quebradas y demás cuerpos de agua deben ser controlados en su cantidad y frecuencia para evitar así el deterioro del ecosistema acuático.
- La no utilización de sustancias químicas como el mercurio, cianuro y otros contaminantes tóxicos en el proceso de extracción de minerales como el oro.
- Dar cumplimiento a la normatividad vigente nacional, regional y local.
- Dado que el Departamento de Antioquia es el primer productor de oro en Colombia, en el departamento se cuenta con 2 distritos más grandes que son Nordeste-Bajo



cauca y Puerto Nare y donde son estos municipios los que se destacan por la realización de dicha actividad; Bagre, Caucasia, Segovia y Remedios. Se sobre entiende que el ser el mayor productor de oro del país, también lleva a ser el departamento con mayor consumo de mercurio promedio 129.22 ton/año (67% consumo del país) (UMPE) UNIVERSIDAD DE CORDOBA 2014.

- Por lo anteriormente descrito, se evidencia una fuerte contaminación al recurso hídrico debido a las cargas contaminantes arrojadas durante la actividad de extracción minera.

A continuación, se resaltan los métodos más importantes en la tipología convencional y no convencional.

Tipología	Tipología	Método
Convencional	Biológico	<i>Landfarming</i>
		Compostaje
		Fitotratamientos
		Humedales artificiales
		Reactores aerobios
		Reactores anaerobios
	Físico-químico	Absorción por vapor
		Oxidación química
		Electrocinética
	Térmicos	Incineración
Desorción térmica		
Pirolisis		
No Convencional		Oxidación avanzada
		Barreras biológicas y electro remediación
		Nanotecnología
		Ultrasonidos

	Fitorremediación con endófitas
	Ingeniería genética con fitorremediación

**Tabla 2** Métodos de remediación convencionales y no convencionales.

### **8.1 Criterios para la evaluación de los métodos de remediación.**

Los autores, (Campos, 1990; Madrid, 2015; Parra y Espinosa, 2008; Mancera-Rodríguez y Álvarez-León, 2006; Botero y Mancera, 1996), han concluido en sus investigaciones que son múltiples las variables como temperatura, pH, concentración de oxígeno, entre otras, que han sido definidas en forma general como propias para el desarrollo y la obtención de excelentes resultados en los procesos de remediación con el objetivo de realizar análisis experimentales posteriores.

Para el territorio Antioqueño, la Agencia Nacional de Minería, el ministerio del medio ambiente, la Universidad Nacional de Colombia y Martínez Sepúlveda, J. A., & Casallas, M. R. (2018), han planteado desarrollar una evaluación de la factibilidad de implementación de estas técnicas en el territorio colombiano, bajo cuatro criterios que pueden afectar su aplicación, a saber: dichos criterios son los siguientes.

#### **8.1.1 Criterios de localización.**

- L1. Cercanía a centro urbano con más de 100 000 habitantes
- L2. Vías de acceso de red nacional primaria o secundaria (L2)
- L3. Facilidades en la zona de actividad (energía eléctrica, agua, combustible, recursos humanos) (L3)
- L4. Población rural o urbana en cercanías de la zona afectada
- L5. Suelo en áreas ambientales sensibles

### **8.1.2 Criterios de características del medio.**

M1. Suelo en contacto permanente con fuentes hídricas superficiales/alta pluviosidad

M2. Suelo con porcentajes de arcilla mayores de 30 %

M3. Suelo con condiciones de radiación solar alta

### **8.1.3 Criterios de aplicabilidad técnica.**

A1. Viabilidad técnica para la aplicación de la alternativa. Este criterio es habilitante para la implementación, esto es, si no hay viabilidad técnica de la alternativa, no se puede desarrollar

A2. Requerimientos de equipos especializados para la remediación

A3. Requerimientos de personal especializado para la remediación

### **8.1.4 Criterios de costos asociados.**

E1. Costos de inversión para método

E2. Costos de operación para método

E3. Costos de disposición final de excedentes (si los hay)

Bajo estos parámetros, y los métodos de remediación tanto convencionales como no convencionales, se ha planteado una parametrización con el fin de buscar una cura a este mal que afecta los suelos y los ríos no solo del departamento Antioqueño sino de todo el territorio nacional.

Las técnicas de remediación fueron evaluadas bajo los criterios de calificación bueno, medio, alto.

Alto: estado ideal del criterio. Mejor escenario para la implementación-.

Medio: estado básico. La implementación no presenta ventajas significativas-.

Bajo: Estado adverso. Peor escenario posible para la implementación.

Método	L1	L2	L3	L4	L5	M1	M2	M3	A1	A2	A3	E1	E2	E3
<i>Landfarming</i>	M	M	M	B	B	B	B	B	M	A	A	B	A	M
Compostaje	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	M
Fito tratamientos	M	M	M	B	B	B	M	B	M	A	M	A	M	M
Humedales artificiales	M	M	M	B	B	B	B	B	B	A	M	M	M	M
Reactores aerobios	B	B	B	M	M	M	M	M	B	M	B	B	B	M
Reactores anaerobios	B	B	B	M	M	M	M	M	B	M	B	B	B	M
Absorción por vapor	M	M	B	M	M	B	M	M	B	A	B	B	B	A
Oxidación química	M	M	B	M	M	B	M	B	M	M	M	M	M	A
Electrocínética	M	M	B	M	M	B	B	B	M	M	B	M	M	A
Incineración	B	B	B	A	A	B	A	A	B	B	B	B	B	B
Desorción térmica	B	B	B	M	M	B	B	B	B	B	B	B	B	A
Pirolisis	B	B	B	A	A	B	A	A	B	B	B	B	B	B
Oxidación avanzada	B	B	B	M	M	B	A	A	M	M	B	M	M	M
Barreras biológicas y electrorre- mediación	B	B	B	M	M	B	M	M	M	M	B	M	M	A

Nanotecnología	B	B	B	M	M	M	B	B	B	B	B	B	B	M
Ultrasonidos	B	B	B	M	M	M	B	B	B	B	B	B	B	M
Fito remediación con endófitas	B	B	B	M	M	B	B	B	M	B	B	B	B	M
Ingeniería genética con fitorremediación	B	B	B	M	M	B	B	B	M	B	B	B	B	M

**Tabla 3** Evaluación de los métodos de remediación con los parámetros de localización, características del medio, aplicación de técnicas y costos.

#### 8.1.4 Remediación mercurio

El mercurio es un elemento químico, por lo cual es imposible obtener su destrucción debido a su conformación iónica, catiónica y a los enlaces que lo conforman, sin embargo, sí es posible y por medio de la utilización de diferentes técnicas modificar el comportamiento físico-químico del elemento, ya sea modificando su estado de oxidación y/o controlando su movilidad. La primera forma comprende el uso de herramientas químicas, y por medio de ellas lograr oxidar el mercurio y obtener su acomplejamiento.

El segundo involucra medios físicos de encapsulamiento o atrapamiento - solidificación/estabilización o vitrificación-, donde el mercurio simplemente es “atrapado” en una matriz sólida que impide su contacto y movimiento hacia el entorno de acuerdo con la United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2007). Los fenómenos de sorción -adsorción y absorción- también son utilizados para la remoción de mercurio de ciertos ambientes. Sin embargo, este tipo de medio físico trae como consecuencia la migración de la sustancia y no necesariamente su inmovilización (Martínez y Uribe, 2015).

Basándose en resultados de la utilización de diferentes ensayos y metodologías de remediación, se pudo obtener información y dar en conocimiento de cuatro metodologías de

remediación que son las más utilizadas para remediación de suelos y residuos (remediación física) (USEPA, 2007). Cabe resaltar que sólo una de las cuatro metodologías ha sido la más opcionada para brindar tratamiento al mercurio elemental la cual es el proceso de solidificación/estabilización, las otras 3 metodologías han sido utilizadas con compuestos mercuriados.



**Imagen 3** Método de Fitoextracción

Fuente: <https://agriculturers.com/la-fitorremediacion-plantas-para-tratar-la-contaminacion-ambiental/>

#### **8.1.4.1 Fase sólida**

Para la fase sólida, se han identificado como metodologías de remediación aplicables la solidificación/estabilización, el lavado de suelo, el tratamiento térmico y la vitrificación. El proceso de solidificación hace que el metal se adhiera a un bloque de diferentes materiales en el cual éste queda atrapado debido a que el bloque de materiales es menos permeable al agua que el suelo. La estabilización que se genera a través de una reacción química hace que el metal sea menos susceptible de ser lixiviado al ambiente (Martínez y Uribe, 2015)

El lavado de suelo consiste en un proceso mecánico que usa líquidos, generalmente agua, algunas veces aditivada, para depurar los suelos. Este proceso remueve los metales y los concentra en un volumen menor. Los metales tienden a estar ligados o adsorbidos, química o físicamente, a las partículas de limos o arcillas; estas últimas, a su vez, tienden a unirse a las partículas de arena o grava. El proceso de lavado de suelo separa las partículas finas contaminadas -arcillas y limos- de las partículas gruesas-arenas y gravas-. Una vez se termina el proceso, un menor volumen de suelo, que contiene la mayoría de las partículas finas, puede ser tratado por otros métodos -p. ej. incineración o biorremediación- o dispuesto de acuerdo con la normativa vigente. La mayoría del volumen de suelo residual se considera limpio.

El quemado y condensado -roasting/retorting- e incineración son las técnicas de tratamiento térmico más utilizadas para el tratamiento de material contaminado con mercurio. La primera operación separa el mercurio del resto del material y lo condensa para su recuperación o remoción. La segunda vaporiza el mercurio y este debe ser recuperado de los sistemas de control de emisiones.

La contaminación de suelos por el mercurio resultante de la explotación aurífera puede ser remediada mediante la utilización de plantas que lo acumulan en sus tejidos, disminuyendo su impacto sobre los ecosistemas y la salud humana. En este trabajo se determinó la influencia del grado de contaminación, la aplicación de ácido cítrico y tiempo de crecimiento del guarumo, sobre la tasa de remoción de mercurio en suelo. Después de 4 meses de crecimiento, los porcentajes de remoción estuvieron entre 15.7% y 33.7% debido a la capacidad del guarumo para acumular grandes cantidades del metal sin presentar efectos

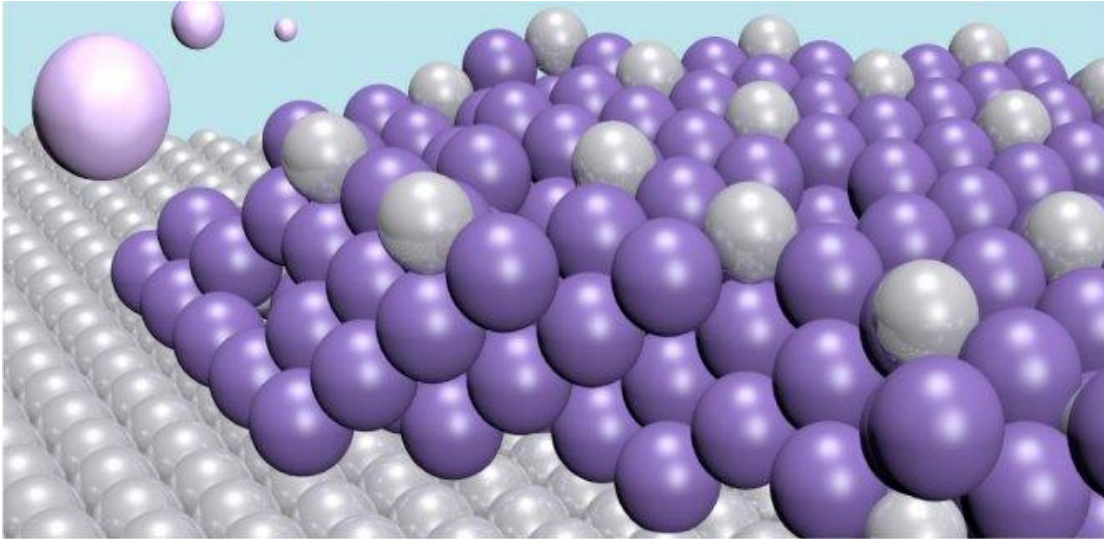
tóxicos considerables, así como al alto contenido de mercurio biodisponible en los suelos contaminados, lo que conllevó también a que el ácido cítrico no tuviera una influencia significativa sobre la recuperación de Hg; por lo cual se concluyó, que el guarumo es una especie con capacidad fitorremediadora.

La vitrificación se considera como una tecnología probada para la disposición y almacenamiento a largo plazo de materiales radiactivos, normalmente metales, el cual puede ser usado en metales no radiactivos. El proceso se conoce también como geofundición. La fase se puede llevar a cabo in situ o ex situ. El primero se lleva a cabo en el lugar donde se encuentra el propio suelo comprometido a través del uso de electrodos que se entierran en el lugar y funden el material suelo que al enfriarse genera una cápsula vítrea que contiene el metal. La técnica ex situ implica la remoción del suelo impactado y la introducción de este entre un horno donde se funde y se crea el material sólido. El material resultante es similar a la obsidiana y no permite la lixiviación de los metales que queden atrapados en su matriz.

Otros métodos como el uso de plantas para la captura de metales pesados, el uso de plantas y sustancias quelantes (She et al. , 2014) o, incluso, el uso de nanotecnología para mejorar los procesos de remediación (Cameselle et al. , 2013) son parte de los estudios que se vienen desarrollando en múltiples centros de investigación alrededor del mundo en la actualidad, y donde es promisoría la obtención de resultados en los próximos años (Martínez y Uribe, 2015). Existe un nuevo método en el cual interviene una placa metálica (un electrodo), que une a ella metales pesados específicos. El electrodo está hecho del metal noble platino, y a través de un proceso electroquímico extrae el mercurio del agua para formar una aleación de los dos. De esta forma, el agua queda limpia de contaminación por mercurio. La aleación formada por los dos metales es muy estable, de modo que no hay



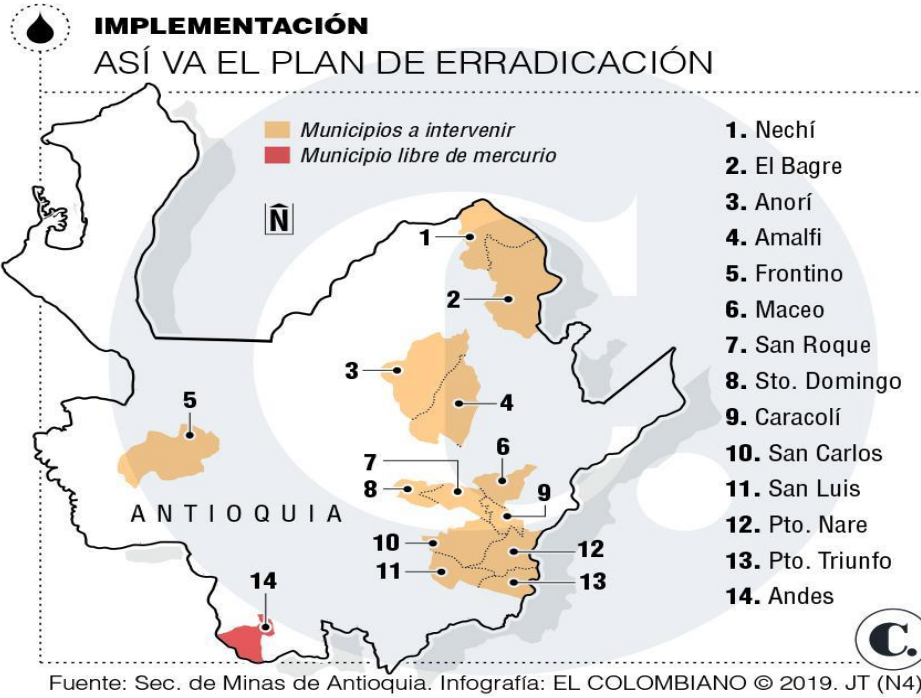
riesgo de que el mercurio vuelva a entrar en el agua



**Imagen 4** Sistema para retirar el mercurio del agua

Fuente: <https://noticiasdelaciencia.com/art/30776/nuevo-sistema-para-retirar-el-mercurio-del-agua>

Cuando los iones de mercurio (morado claro) en un líquido se acercan a un electrodo de platino, son atraídos a la superficie de este, donde se ven reducidos a mercurio metálico. En el electrodo, los átomos de mercurio (morado oscuro) y los de platino (gris) dan forma a una aleación muy estable, y de este modo el mercurio se elimina del agua. (Imagen: Björn Wickman y Adam Arvidsson / Chalmers University of Technology)



**Imagen 5** Plan de erradicación del mercurio en Antioquia

Fuente: <https://www.elcolombiano.com/antioquia/andes-abre-el-camino-del-mercurio-cero-en-antioquia-KG11604178>

## 9. Conclusiones

Las condiciones sociales, ambientales y económicas relacionadas con la explotación minera artesanal y la extracción ilegal del oro en el territorio colombiano se encuentran asociadas con la utilización indiscriminada del mercurio, elemento químico que por sus características químicas requiere altos cuidados en su manejo, por cuanto los impactos que genera este elemento en los ecosistemas, en la biota y en la salud de los seres humanos son negativos. Lamentablemente, el deficiente manejo que se hace del mercurio durante la explotación aurífera, que para 2012 se estimó en 205 toneladas, ha dejado como consecuencia múltiples afectaciones ambientales que, dadas las condiciones de ubicación y climatológicas son muy difíciles de intervenir y en las cuales no es posible asignar responsables que puedan responder por los daños y perjuicios.

Existen gran variedad de tecnologías y metodologías que permiten el desarrollo de procesos de remediación de contaminantes. Sin embargo, la revisión, más allá de la teoría de las alternativas de tratamiento que pudieran ser efectivas para reducir las concentraciones de mercurio en los sistemas hídricos, requiere experimentación, que debe partir de los centros académicos y de investigación hasta llegar a proyectos piloto que permitan brindar soluciones en los sitios donde está presente el problema. Por lo anterior, es importante continuar con la investigación y de ésta manera poder avanzar en el conocimiento de la problemática para así llegar a adoptar las tecnologías necesarias y requeridas para las condiciones de las zonas de explotación y así permitir que no existan limitantes técnicos o económicos que impidan que se realice una correcta descontaminación de suelos contaminados con mercurio.

Este estudio relaciona al menos ocho alternativas de remediación (landfarming, Fito tratamientos, oxidación química, oxidación avanzada, electrocinética, barreras biológicas con

electro remediación, fitorremediación con endófitas e ingeniería genética con fitorremediación) que desde la revisión teórica y, después de la evaluación de unos criterios de priorización, pueden ser la base para el desarrollo de labores experimentales en las próximas fases de investigación en el tema.

### **Tecnologías de fitorremediación (método recomendado según la investigación realizada)**

Las tecnologías de fitorremediación se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición.

La Fitoextracción o fitoacumulación consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en 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.

## 10. Bibliografía

Ambiental - EIA . Obtenido de Proyectos de explotación minera:

[http://www.anla.gov.co/sites/default/files/comunicaciones/SIPTA/Terminos\\_referencia/tr\\_eia\\_mineria\\_2016.pdf](http://www.anla.gov.co/sites/default/files/comunicaciones/SIPTA/Terminos_referencia/tr_eia_mineria_2016.pdf)

Ámbito jurídico. (31 de mayo de 2013). La normativa minera tras la caída de la Ley 1382: más dudas que certezas. Obtenido de

[https://www.ambitojuridico.com/BancoConocimiento/Administrativo-y-](https://www.ambitojuridico.com/BancoConocimiento/Administrativo-y-Contratacion/noti-130531-07-la-normativa-minera-tras-la-caida-de-la-ley-1382-mas-dudas-que-certezas)

[Contratacion/noti-130531-07-la-normativa-minera-tras-la-caida-de-la-ley-1382-mas-dudas-que-certezas.](https://www.ambitojuridico.com/BancoConocimiento/Administrativo-y-Contratacion/noti-130531-07-la-normativa-minera-tras-la-caida-de-la-ley-1382-mas-dudas-que-certezas)

ANLA. (2016). Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto

Asamblea Nacional Constituyente. (1991). Constitución Política de Colombia. Obtenido de

<http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion%20politica%20de%20Colombia%20-%202015.pdf>

Boerchers, M. (26 de febrero de 2016). Mining for Sustainability: Examining the Relationships Among Environmental Assessments, Mining Legacy Issues, and Learning. Obtenido de

[http://www.umanitoba.ca/institutes/natural\\_resources/pdf/theses/Boerchers,%20Morrissa.MNRM%202016.pdf](http://www.umanitoba.ca/institutes/natural_resources/pdf/theses/Boerchers,%20Morrissa.MNRM%202016.pdf).

Campos, N. H. (1990). La contaminación por metales pesados en la Ciénaga Grande de Santa

Marta, Caribe colombiano. *Caldasia*, 16(77), 231-243.

Cano, S. E. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomédica*, 32(3).

CGR. (2013). Minería en Colombia: Derechos, políticas públicas y gobernanza. Obtenido de [http://www.contraloria.gov.co/documents/20181/472306/01\\_CGR\\_mineria\\_I\\_2013\\_com\\_p.pdf/40d982e6-ceb7-4b2e-8cf2-5d46b5390dad](http://www.contraloria.gov.co/documents/20181/472306/01_CGR_mineria_I_2013_com_p.pdf/40d982e6-ceb7-4b2e-8cf2-5d46b5390dad)

Colciencias & Universidad EAFIT. (Marzo de 2014). Oro como fortuna. Instituciones, capital social y gobernanza de la minería aurífera colombiana. Obtenido de [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/9107/oro\\_como\\_fortuna.pdf?sequence=1](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/9107/oro_como_fortuna.pdf?sequence=1)

Congreso de la República de Colombia. (15 de agosto de 2001). Ley 685 de 2001. Obtenido de Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones: <http://www.bdlaw.com/assets/htmldocuments/Colombia%20%20Ley%20658%20de%202001%20Mining%20Law.PDF>

Congreso de la República de Colombia. (15 de julio de 2013). Ley 1658 de 2013. Obtenido de Comercialización y uso del mercurio en las diferentes actividades industriales del país:

Congreso de la República de Colombia. (24 de abril de 2012). Ley 1323 de 2012. Obtenido de Política nacional de gestión del riesgo de desastres y Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=47141>

Congreso de la República. (22 de diciembre de 1993). Ley 99 de 1993. Obtenido de [http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img\\_upload/03d591f205ab80e521292987c313699c/ley-99-de-1993\\_1.pdf](http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img_upload/03d591f205ab80e521292987c313699c/ley-99-de-1993_1.pdf)

Cossu R., S. V. (s.f.). Urban Mining: A global cycle approach to resource recovery from solid wast.

Decreto 1729 de 2002. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogota. diario oficial 44893 del 7 de agosto de 2002 (Presidencia de la República, 2002)

Decreto 3930 de 2010. Presidencia de la República de Colombia. Bogotá. Presidencia de la República de Colombia (Ministerio de Ambiente, 2010)

Díaz-Arriaga, F. A. (2014). Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de Salud Pública*, 16, 947-957.

Diccionario soviético de filosofía. (2000). Análisis síntesis. Obtenido de <http://www.filosofia.org/enc/ros/analisis.htm>

EDP. (2012). Mejores prácticas ambientales. Obtenido de <http://www.mapaedp.com/buenas-practicas-ambientales>.

EDP. (2012). Mejores prácticas ambientales. Obtenido de <http://www.mapaedp.com/buenas-practicas-ambientales>

Escobar, A., & Martínez, H. (2014). El sector minero colombiano actual. Insumos para el desarrollo del Plan Nacional de Ordenamiento Minero, 1-29.

Fernández, C. (2017). El mercurio: una intoxicación silenciosa. *El Tiempo*, versión digital. Recuperado de: <https://bit.ly/33xlEBS>

Fitzpatrick, P. (2013). Heterogeneous photocatalysis: recent advances and applications. *Catalysts*, 3(1), 189-218.

[http://www.minambiente.gov.co/images/Atencion\\_y\\_participacion\\_al\\_ciudadano/Consulta Publica/LEY%201658%20DEL%2015%20DE%20JULIO%20DE%202013.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_participacion_al_ciudadano/Consulta_Publica/LEY%201658%20DEL%2015%20DE%20JULIO%20DE%202013.pdf)

Idrovo, Á. J., Manotas, L. E., Villamil, G., Ortiz, J. E., Silva, E., Romero, S. A., & Azcárate, C. E. (2001). Niveles de mercurio y percepción del riesgo en una población minera aurífera del Guainía (Orinoquia colombiana). *Biomédica*, 21(2), 134-141.

Laguna, J. (2010). La gobernanza ambiental internacional y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. *Rev. Mex. Política Exter*, 88, 75-106.

Ley 1658 de 2013. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá. diario oficial: No. 48852 del 15 de julio de 2013. (Congreso de Colombia, 2013)

Madrid, G. L. (2015). Genotoxicidad de metales pesados (Hg, Zn, Cu, Pb y Cd) asociado a explotaciones mineras en pobladores de la cuenca del río San Jorge del departamento de Córdoba, Colombia. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 1(23). 103-111

Mancera-Rodríguez, N. J. y Álvarez-León, 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.

Martínez Sepúlveda, J. A., & Casallas, M. R. (2018). Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro.

Minminas. (2016). Pan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio. La ruta hacia un beneficio sostenible del oro. Ministerio de minas y energía. República de



Colombia. Recuperado de: <https://bit.ly/33vMfPE>

Olivero, J., Mendonza, C., & Mestre, J. (1995). Mercurio en cabello de diferentes grupos ocupacionales en una zona de minería aurífera en el Norte de Colombia. *Revista de Saúde Pública*, 29, 376-379.

Parra, J.P. , Espinosa, L.F. (2008). Distribución de metales pesados (Pb, Cd y Zn) en perfiles de sedimento asociado a *Rhizophora mangle* en el Río Sevilla - Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Boletín de investigaciones marinas y costeras*, 37(1). p. 95-110.

Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. *Ecología aplicada*, 5(1-2), 149-155.

Resolucion 1433 de 2004. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogota. Diario Oficial 45774 de diciembre 27 de 2004. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004)

Ronderos, M. T. (2011). La fiebre minera se apoderó de Colombia. *Revista semana*, 6, 246055-3.

Salamanca, L. J. G. (Ed.). (2013). *Minería en Colombia*. Contraloría General de la República.

Suárez, L. G. (2011). Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia. *Opinión jurídica*, 10, 123-139.