

**Impacto del mercurio en los ecosistemas colombianos y las técnicas aplicables para su
biorremediación**

Claudia Patricia Pinzón
Código: 53117404

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental
Bogotá, Colombia
2018

**Impacto del mercurio en los ecosistemas colombianos y las técnicas aplicables
para su biorremediación**

Claudia Patricia Pinzón
Código: 53117404

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:
Tecnólogo en Saneamiento Ambiental

Director:
Carlos Andrés Fajardo Gómez

Línea de investigación:
Gestión y manejo ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental
Bogotá, Colombia
2018

*La vida no te mide por los pasos que das
sino por las huellas que dejas.*

Agradecimientos

Agradezco en primera instancia a Dios por ser el artífice de mis proyectos, a mi hija Danery por ser el motor propulsor de mis sueños y metas y a mi tutor de proyecto Carlos Fajardo por aportar con su conocimiento al desarrollo óptimo de este documento.

1.	1. Introducción	16
2.	2. Planteamiento del problema	17
3.	3. Justificación	19
4.	4. Objetivos	23
	4.1. Objetivo General	23
	4.2. Objetivos Específicos	23
5.	5. Marco Conceptual y teórico	23
6.	5.1. El mercurio como agente contaminante	23
	5.1.1. Bioacumulación y transporte en la cadena trófica	24
	5.1.2. Efectos tóxicos del mercurio sobre la salud de los seres vivos	26
	5.2. El mercurio en la Industria Mundial.....	29
	5.2.1. Tratamiento de los residuos de mercurio a nivel mundial	30
	5.3. Uso del mercurio en la industria colombiana	32
	5.3.1. Tratamiento y disposición final de los residuos de mercurio en Colombia	35
	5.4. Técnicas fisicoquímicas para recuperación de ecosistemas afectados por mercurio	37
	5.4.1. Carbón activado granular	37
	5.4.2. Destilación del mercurio	38
	5.4.3. Desmercurización térmica.....	39
	5.4.4. Encapsulación del mercurio	39
	5.4.5. Oxidación fotocatalítica:	40
	5.5. Técnicas de biorremediación para ecosistemas afectados por mercurio	40
	5.5.1. Atenuación natural	41
	5.5.2. Bioestimulación	42
	5.5.3. Bioaugmentación	42
	5.5.4. Biosorción:	42
	5.6. Técnicas de biorremediación	43
	5.6.1. Degradación enzimática.....	44
	5.6.2. Remediación microbiana	44

5.6.3. Fitorremediación	45
7. 6. Resultados y discusión.....	46
6.1. Principales especies de fauna y flora afectadas	46
6.2. Ejemplos de afectación en la salud humana	47
6.3. Ecosistemas principales afectados en el mundo por el uso del mercurio	51
6.4. Ejemplos de ecosistemas colombianos afectados por el uso del mercurio	52
6.5. Disposición actual de los residuos de mercurio.....	54
6.6. Ejemplos de remediación fisicoquímica de mercurio.....	55
6.7. Ejemplos de biorremediación de mercurio	56
6.8. Comparativo entre las técnicas fisicoquímicas y la biorremediación para la remoción de mercurio	61
6.9. Ventajas de la biorremediación versus las técnicas fisicoquímicas	65
8. 7. Conclusiones y recomendaciones	66
7.1. Conclusiones	66
7.2. Recomendaciones.....	68
9. 8. Bibliografía	71

Resumen

El trabajo de investigación está enfocado en una revisión bibliográfica del impacto que ha tenido el uso del mercurio en los ecosistemas colombianos, y tiene como objetivo analizar en el contexto colombiano las fuentes de contaminación, el manejo y la disposición final de este metal pesado así como las estrategias que se han implementado en el país para la recuperación de los ecosistemas afectados, con el fin de determinar las ventajas de las técnicas de biorremediación versus las técnicas fisicoquímicas, que en su mayoría requieren uso de aditivos químicos que pueden tener efectos secundarios y perjudiciales en el ecosistema tratado. La metodología a implementar en la investigación es una revisión bibliográfica del impacto causado por el mercurio en varios ecosistemas del país con la pérdida de especies nativas de flora y fauna, y de la calidad del agua, aire y suelo del lugar. De otra parte, con la comparación de las técnicas fisicoquímicas con las técnicas de biorremediación se pretende establecer la prioridad de la biorremediación como la mejor alternativa para recuperar los ecosistemas afectados por mercurio debido al uso de microorganismos que se pueden integrar al medio sin afectar su composición natural y favoreciendo la recuperación de las características propias del ecosistema.

Palabras claves: *Metal pesado, Biorremediación, Contaminación, Ecosistema*

Abstract

The research work is focused on a bibliographic review of the impact that the use of mercury has had on Colombian ecosystems, and its objective is to analyze in the Colombian context the sources of contamination, the handling and final disposal of this heavy metal and the Strategies that have been implemented in the country for the recovery of affected ecosystems in order to determine the advantages of bioremediation techniques versus physicochemical techniques, which mostly require the use of chemical additives that can have adverse and harmful effects on the treated ecosystem. The methodology to be implemented in the research is an extensive bibliographic review of the impact caused by mercury in several ecosystems of the country with the loss of native species of flora and fauna, and the quality of the water, air and soil of the place. On the other hand, the comparison of physicochemical techniques with bioremediation techniques aims to establish the priority of bioremediation as the best alternative to recover the ecosystems affected by mercury due to the use of microorganisms that can be integrated into the environment without affecting their composition natural and favoring the recovery of the characteristics of the ecosystem.

Keywords: Heavy metal, Bioremediation, Pollution, Ecosystem

Lista de figuras

Figura 1. Mercurio.....	24
Figura 2. Ciclo de biomagnificación del mercurio.....	25
Figura 3. Carbón Activado Granular.....	37
Figura 4. Destilación de mercurio.....	39
Figura 5. Producto final estabilizado por microencapsulación de mercurio líquido y residuos de mercurio mediante cemento polimérico de azufre.....	40
Figura 6. Proceso de biosorción.....	43
Figura 7. Degradación enzimática.....	44

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades del mercurio.....	24
Tabla 2. Formas químicas del mercurio y sus fuentes de exposición.....	27
Tabla 3. Normatividad Vigente para la Disposición final de Residuos de Mercurio en Colombia.....	36
Tabla 4. Mecanismos de fitorremediación.....	45
Tabla 5. Técnicas fisicoquímicas para la remoción de mercurio.....	61
Tabla 6. Técnicas de biorremediación de mercurio.....	62
Tabla 7. Comparativo de ejemplos de remediación de mercurio.....	62

1. Introducción

El mercurio es un metal pesado con unas propiedades muy especiales que son apetecidas en la industria minera, farmacológica e industrial. Es el único metal que permanece líquido a temperatura ambiente y tiene una excelente relación con el oro permitiendo su separación y obtención del residuo explotado por los mineros. (Rowlatt, 2013).

Este metal puede llegar al medio ambiente de forma natural por medio de erupciones volcánicas y de manera antrópica mediante residuos industriales o mineros. Lamentablemente, sus múltiples propiedades y beneficios son opacados por las consecuencias que trae su uso para la salud humana y el medio ambiente. El mercurio se ha convertido en un veneno circundante con gran facilidad de bioacumulación y biomagnificación dentro de la cadena trófica, lo que aumenta sus efectos y el riesgo de intoxicación y contaminación por contacto con el mismo. (Gaioli, Amoedo, & González, 2012)

Aunque su uso data de la época de los alquimistas, hasta hace pocos años se empezó a dar conocimiento e importancia de sus efectos adversos debido a la contaminación continua generada desde 1932 hasta 1968 cuando la industria de fertilizantes, petroquímicos y plásticos Chisso Corporation vertió residuos de mercurio en la Bahía de Minamata (Japón) lo que originó la contaminación del agua, formando un compuesto de metilmercurio que es la forma más tóxica del mercurio. Esto trajo como consecuencia malformaciones fetales y trastornos de neurodesarrollo en los recién nacidos

principalmente. En las personas adultas se presentaron problemas neurosensoriales y trastornos cognitivos. Gaioli et al. (2012).

De ahí partió el interés de minimizar el uso del mercurio remplazándolo con otros elementos de menor impacto y más amigables con el medio ambiente para evitar el deterioro de los ecosistemas, así como consecuencias negativas en la salud humana. Adicional al minimizar su uso, es necesario focalizar esfuerzos en remediar y recuperar aquellos ecosistemas que han sido deteriorados por el uso de este metal. (Rowlatt, 2013).

2. Planteamiento del problema

El mercurio es un metal pesado altamente tóxico y contaminante con efectos adversos para la salud humana y para la calidad de vida de los ecosistemas. La transformación de este metal en componentes tóxicos como el metilmercurio aumenta la capacidad de acumulación de este metal pesado en la atmósfera, suelo y fuentes hídricas facilitando la contaminación y toxicidad en el ambiente y la biomagnificación en toda la cadena trófica dificultando el control de sus efectos y su eliminación total. (Weinberg, 2007)

Una de las industrias que más ha tenido trascendencia en la contaminación con este metal pesado en Colombia es la minería, ya que, para el proceso de amalgamación del oro, utiliza el mercurio que es eliminado por evaporación a la atmósfera o por vertimiento a las fuentes hídricas. (Olivero, Young, & Caballero, 2014)

Desafortunadamente, en industrias como la minera, no existe un protocolo establecido para el tratamiento y la disposición final de residuos peligrosos como el

mercurio y la disposición final del mismo, ocasionando efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana. Así mismo, no se ha definido una técnica efectiva para la protección de los ecosistemas ni para la recuperación de aquellos que ya están afectados. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012)

Dentro de las alternativas fisicoquímicas para la recuperación de estos ecosistemas están la fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio que permite el almacenamiento del mercurio en un catalizador para su posterior extracción, (Garcés, Mejía, & Santamaria, 2015). Los procesos físicos de solidificación, estabilización o vitrificación solo generan encapsulamiento o atrapamiento del mercurio, pero no su eliminación del ambiente. Otros métodos aplican la oxidación o reducción de mercurio logrando su precipitación o la remoción por adsorción. Sin embargo, estas técnicas traen como consecuencia la obtención de nuevas sustancias contaminantes o la movilidad del mercurio hacia otro medio, (Martinez & Uribe, 2015)

Aunque las técnicas fisicoquímicas son prometedoras como una opción de recuperación de los ecosistemas no son del todo eficientes debido al uso de aditivos químicos utilizados en el proceso para la movilización o remoción del mercurio lo cual genera daños secundarios en el ambiente. (Martinez & Uribe, 2015)

Debido a las desventajas que presenta el uso de los métodos fisicoquímicos para la remoción de mercurio, la biorremediación representa una mejor alternativa para la recuperación de ecosistemas afectados por mercurio, y por medio de esta investigación se pretende proporcionar un contexto a nivel colombiano de las industrias generadoras de este metal pesado, y el manejo que le dan a este, así como las alternativas de biorremediación

empleadas para el tratamiento del mercurio. (Paisio, González, Talano y Agostini, 2012)

3. Justificación

En Colombia, muchos ecosistemas se han visto afectados por la contaminación producida por el uso y disposición final inadecuada del mercurio. Los efectos en la salud humana y en los ecosistemas nativos son en su mayoría irreversibles debido a su acumulación y biomagnificación, especialmente de compuestos derivados como el metilmercurio siendo la forma más tóxica de este metal y la de más compleja eliminación. La industria, en especial la minera, que ha sido la mayor contribuyente a este impacto ambiental en los últimos años, se ha expandido bajo la bandera de un crecimiento económico planteado en el plan de desarrollo de Colombia, y al aumento de la inversión extranjera. Sin embargo, debido a situaciones de explotación ilegal, no se han establecido controles eficientes para mitigar las consecuencias sociales y ambientales que trae a su paso el uso del mercurio. (Martinez & Uribe, 2015)

Debido a las consecuencias que conllevan estas actividades de explotación y al daño casi irreversible en los ecosistemas, se hace prioritaria la implementación de estrategias para su recuperación, teniendo en cuenta que varios ecosistemas se ven afectados y tras el término de la vida útil de su explotación simplemente son abandonados. A esta problemática contribuye la asignación de licencias ambientales de explotación en ecosistemas vitales como paramos o reservas indígenas y la no exigencia de planes de manejo ambiental antes y después de la actividad industrial o de explotación, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012).

A nivel mundial se han implementado técnicas para la recuperación de ambientes

contaminados con mercurio predominando el uso de técnicas fisicoquímicas especialmente en agua y suelo tales como la amalgamación, la formación de sulfuros, la vitrificación, el lavado de suelos, la desorción térmica, la nanotecnología, procesos de encapsulación o estabilización y electro remediación. Aunque estas son técnicas con un buen porcentaje de eficiencia, son de alto costo por el uso de reactivos o equipos especializados y los reactivos adicionales utilizados pueden tener efectos secundarios en el medio ambiente. (Paisio et al, 2012).

En contraparte, se ha investigado la eficiencia de algunos microorganismos en la remoción y eliminación de metales pesados. A partir de estas investigaciones se ha determinado que estos microorganismos emplean diferentes procesos enzimáticos que permiten su detoxificación y degradación natural del metal. La biorremediación es una técnica sencilla de implementar, económica y sin efectos secundarios, ya que los microorganismos adaptan su metabolismo a las condiciones del medio absorbiendo la sustancia y metabolizándola en otros compuestos de más fácil eliminación como agua o dióxido de carbono. (Olivero et al. 2002).

La biorremediación se basa en la eliminación o neutralización de contaminantes mediante tres procesos naturales principalmente: degradación enzimática, remediación microbiana y fitorremediación. La degradación enzimática consiste en el empleo de enzimas previamente adaptadas o modificadas para la eliminación de contaminantes, la remediación microbiana se basa en el uso de microorganismos endémicos o inoculados en el sitio de contaminación los cuales se someten a un proceso de bioestimulación o bioaumentación con el fin de acelerar el proceso de eliminación de las sustancias nocivas y

la fitorremediación que consiste en la eliminación de contaminantes mediante el uso de plantas que son tolerantes a altas concentraciones de sustancias contaminantes o metales pesados y que realizan el proceso mediante la acumulación en partes aéreas o raíces, la reducción de la movilidad del contaminante o la transformación del mismo en sustancias menos tóxicas para liberarlas al medio ambiente y reducir su efecto negativo (Di Paola & Vicién).

En Colombia, se hace indispensable la aplicación de estrategias de biorremediación para no afectar aún más los ecosistemas. Aunque algunas instituciones han realizado investigaciones al respecto aún falta más inversión e impulso a la investigación en el tema.

El objetivo de esta monografía es dar un aporte de valor bibliográfico a la investigación relacionada a la recuperación de ecosistemas afectados por el uso del mercurio utilizando la biorremediación como una técnica económica y de mayor beneficio para el medio ambiente

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Analizar el contexto nacional del manejo y disposición de mercurio, y las estrategias de biorremediación implementadas para el tratamiento de ecosistemas contaminados con mercurio.

4.2. Objetivos Específicos

- ✓ Determinar la situación actual del manejo y disposición de los residuos de mercurio generados por las industrias colombianas.
- ✓ Realizar un análisis comparativo de los métodos fisicoquímicos y biológicos empleados para el tratamiento de ecosistemas contaminados con mercurio.
- ✓ Identificar las diferentes alternativas disponibles para la recuperación y o eliminación del mercurio en ecosistemas afectados.

5. Marco Conceptual y teórico

5.1. El mercurio como agente contaminante

El mercurio es un metal pesado altamente tóxico que ha sido utilizado en el transcurso de la historia en diferentes actividades. Se puede liberar al medio ambiente en eventos naturales como son las erupciones volcánicas o por actividades antropogénicas como la minería, especialmente la explotación aurífera ya que el mercurio es el único metal que tiene reacción de amalgama con el oro, por tal motivo es utilizado en la extracción del mismo. A pesar de su gran utilidad poco a poco se ha ido disminuyendo su

uso debido a los efectos adversos en el medio ambiente y en la salud de las personas.

(Rowlatt, 2013)

Tabla 1.
Propiedades del mercurio


	Metal noble soluble únicamente en soluciones oxidantes. (Escuela de Química, 2016)
	Masa atómica: 200, 59 g/mol. (Escuela de Química, 2016)
	Densidad: 16,6 g/ml. (Escuela de Química, 2016)
	Punto de ebullición: 357 ° C. (Escuela de Química, 2016)
	Forma soluciones llamadas amalgamas con algunos metales como el oro, plata, cobre y plomo. (Escuela de Química, 2016)
	La tensión superficial del mercurio líquido es de 484 dinas/cm, 6 veces mayor que el agua en contacto con el aire, por este motivo no puede mojar ninguna superficie con la que este en contacto. En aire seco no se oxida pero en húmedo se cubre con una capa de óxido. (Escuela de Química, 2016)
	Tiene capacidad para reaccionar en forma líquida, sólida o acuosa. (Escuela de Química, 2016)

Figura 1. Mercurio
Fuente. (Sotomayor, 2017)

Se relacionan las principales propiedades del metal mercurio Hg

5.1.1. Bioacumulación y transporte en la cadena trófica

El mercurio es fácilmente bioacumulable y se presenta en las cadenas tróficas en dos formas: orgánicas e inorgánicas. Dentro de las especies inorgánicas están el metal mercurio, el óxido de mercurio, el catión mercurio y el catión mercurioso y dentro de las

formas orgánicas el dimetil mercurio, el metil mercurio y el fenil mercurio. La principal incorporación del mercurio a las cadenas tróficas es a partir del metal mercurio ya que es el más volátil y a temperatura ambiente se sublima incorporándose a la atmosfera en forma de vapor. (Doadrio, 2004).

En el medio acuático, el metil mercurio es el que genera una mayor interferencia en la cadena trófica debido a la facilidad que tiene para atravesar las membranas celulares y ser absorbido por el organismo afectando principalmente el sistema nervioso debido a su toxicidad. Por su gran capacidad de mantenerse en el ambiente, este compuesto se bioacumula y magnifica en la cadena trófica repetidamente desde el zooplancton hasta el depredador que encabeza la cadena. (Kehrig, y otros, 2017).



Figura 2. Ciclo de biomagnificación del mercurio
Tomado de (Sacristán, 2017)

La biomagnificación en la cadena trófica se da principalmente por la afectación de las fuentes de agua destinadas a consumo humano y que no reciben un tratamiento adecuado para su potabilización. Las emisiones atmosféricas, vertimientos o inundaciones también contribuyen a expandir el contaminante en el ambiente. (Calao & Marrugo, 2015)

La bioacumulación del mercurio en la cadena trófica se va dando gracias a la biomagnificación donde comienza el ciclo con el productor o consumidor primario llegando al depredador tope el cual va a tener las mayores concentraciones de mercurio. La bioacumulación se da porque el organismo que absorbe el mercurio retiene más de lo que puede eliminar y así al ser transferido a otro nivel trófico, se incrementa la concentración en la cadena trófica afectando principalmente a los animales carnívoros. (Sánchez O. , 2010).

Se han realizado estudios que revelan los tractos digestivos de los animales como nichos potenciales para la metilación del mercurio especialmente en animales invertebrados terrestres contribuyendo a la toxicidad y biomagnificación en las cadenas alimentarias. (Rodriguez, R, & Jimenez, 2017)

5.1.2. Efectos tóxicos del mercurio sobre la salud de los seres vivos

El mercurio y sus compuestos se consideran contaminantes prioritarios en la Unión Europea, en la Directiva del Marco del Agua, en el Convenio Oskar y el PNUMA. La Comisión Europea en 2005 adoptó una estrategia comunitaria para reducir los niveles de mercurio en el medio ambiente y en la exposición humana. En estudios recientes se ha mejorado el conocimiento frente a las diferentes reacciones del Hg antropogénico, su ciclo biogeoquímico y las principales vías de transformación en el medio ambiente donde las

especies más afectadas son organismos acuáticos principalmente los que encabezan la cadena trófica como el tiburón. (León & Peñuela, 2011)

La toxicidad del mercurio varía de acuerdo a la forma presente en el ambiente (Orgánica o inorgánica). Llega al cuerpo humano por el consumo de alimentos principalmente pescados y mariscos o por desempeñar labores donde hay exposición al metal tales como la pesca o la minería. El mercurio afecta en gran medida el sistema digestivo, el sistema nervioso e inmunitario, los riñones, la piel, los pulmones y los ojos. (Gaioli, Amoedo, & González, 2012)

Debido a las características del Hg, se han identificado las principales fuentes de exposición y toxicidad para la salud humana:

Tabla 2
Formas químicas del mercurio y sus fuentes de exposición

Mercurio	Fuente	Ruta de Exposición	Eliminación	Toxicidad
Orgánico o metil mercurio	-Pescados -Funguicidas -Preservantes	-Digestiva -Transplacentaria -Parenteral	Heces	- Cardiovascular -SNC
Inorgánico o sales de mercurio	-Cosméticos -Ampolletas -Timerosal -Desinfectantes -Producto fotográfico	-Cutánea -Digestiva	Orina	-Piel -Pulmonar -SNC -Renal
Metálico o elemental	-Orfebrería artesanal -Termómetro -Erupciones volcánicas -Amalgamas dentales	-Inhalatoria	-Heces -Orina	-Renal -Pulmonar -SNC -Renal

Se describen las formas químicas del Hg, sus fuentes y rutas de exposición, su eliminación y toxicidad. (Valderas, y otros, 2013)

La OMS destaca los efectos del mercurio en la salud de acuerdo a la forma del mercurio, la dosis, la edad o el estado de desarrollo de la persona expuesta. El grupo más vulnerable son las embarazadas ya que los fetos son los más afectados por la exposición intrauterina especialmente al metilmercurio. La fuente de exposición se da principalmente por el consumo materno de pescados y mariscos lo que puede llegar a dañar el cerebro y el sistema nervioso del bebe en su crecimiento y desarrollo. (Gaioli, Amoedo, & González, 2012)

La consecuencia principal de la exposición al metilmercurio es la alteración neurológica afectando el pensamiento cognitivo, la capacidad de concentración, la memoria, el lenguaje y la aptitud motora y espacio visual. (Gaioli, Amoedo, & González, 2012)

Los límites tolerables de mercurio en el ser humano son $< 10 \mu\text{g/L}$ en sangre y $< 20 \mu\text{g/L}$ en orina. Sin embargo, por el desarrollo de las actividades como la minería o la pesca, hay zonas donde los habitantes superan en gran medida estos límites. (Gaioli, Amoedo, & González, 2012)

Cuando hay una exposición prolongada a los vapores de mercurio, especialmente en los mineros se genera hidrargirismo ocasionando efectos crónicos sobre el Sistema Nervioso Central (SNC) y el aparato urinario. La exposición al mercurio elemental (a la que están expuestos los mineros principalmente) puede presentar consecuencias como déficit en el desarrollo neurológico y de comportamiento, daño en la memoria y en la capacidad de atención y respuesta, afectación en la capacidad auditiva y psicomotora, inflamaciones severas de la piel y pérdida de la capacidad para distinguir colores. (Carrillo

& Astudillo, 2011)

5.2. El mercurio en la Industria Mundial

Desde la antigüedad el mercurio ha sido un metal muy atractivo por su color y su versatilidad. Su uso en civilizaciones antiguas se dio principalmente como elemento para la decoración y la cosmética. Sin embargo, con el paso de los años y con la amplitud del conocimiento de sus propiedades se masificó su uso extendiéndolo a la industria manufacturera, farmacológica, odontológica y minera. (Gaioli et al. 2012).

El nivel de toxicidad del mercurio varía de acuerdo a su forma química, concentración, duración, su vía y ventana de vulnerabilidad en el momento de la exposición. (Ortega, y otros, 2003)

En la tierra el mercurio se encuentra de forma inorgánica y este mercurio se utiliza principalmente en la elaboración de cosméticos, antisépticos, antibacterianos, diuréticos, detonadores de explosivos y pigmentos para pinturas. Los compuestos orgánicos de mercurio se forman cuando este metal se combina con el carbono dando lugar a compuestos como Etil-Hg, Dimetil-Hg y MeHg. El MeHg es la forma más tóxica del mercurio y se genera principalmente en la combinación de residuos de este metal con el agua. (Ortega JA, Ferris J, López JA, 2003).

La masificación del consumo de mercurio a nivel mundial se dio posterior al método descubierto por el español Bartolomé Medina en 1557 denominado beneficio del patio y utilizado para la amalgamación en frío de minerales de plata. (Español, 2012)

A nivel mundial, la actividad que genera mayor consumo de mercurio es la minería. Esta industria se ha convertido en una fuente de ingreso para muchos países, pero

en especial para las familias que dependen de esta actividad para su sustento y la desarrollan de forma precaria sin el conocimiento y la tecnología apropiados. La minera artesanal se considera actualmente la mayor fuente de contaminación por mercurio debido a sus emisiones atmosféricas y vertimientos a las fuentes hídricas. Lo preocupante es la masificación sin control de su operación y la falta de alternativas de sustento para las personas que dependen de esta actividad. (Español, 2012)

Acorde a las cifras reportadas en 2014 por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGC), en base a una recopilación de datos de 1990 hasta 2013, se identifica que el mayor productor de mercurio en los últimos 24 años es China con 19.705 t, seguido de España con 7.707 t, Kirguistán con 6.860 t y Argelia con 5.041 t. (Ministerio de minas y energía – Unidad de planeación minero energético y Universidad de Córdoba, 2014).

La demanda del mercurio a nivel mundial en los últimos años se ha incrementado superando la oferta elevando los precios a máximos históricos alcanzando los 3600 dólares por frasco (76 lb) en el último trimestre de 2013 y 3300 dólares en el primer trimestre de 2014. El consumo principal lo encabeza la MAPE (Minería Artesanal y de Pequeña Escala). La concentración de la fabricación de productos con mercurio en China, India, Vietnam, Taiwán y Malasya ha decrecido por la regulación que busca eliminar el consumo. (Ministerio de minas y energía – Unidad de planeación minero energético y Universidad de Córdoba, 2014)

5.2.1. Tratamiento de los residuos de mercurio a nivel mundial

En el año 2002 el Consejo de Administración del Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (PNUMA) en cooperación con miembros del Programa Interinstitucional

para la Gestión Racional de las Sustancias Químicas publicó la primera evaluación mundial sobre el mercurio y sus compuestos, a raíz de lo cual se acordó una mayor acción internacional para reducir los efectos negativos del mercurio sobre la salud y el medio ambiente. Una de las medidas derivadas de este acuerdo fue la creación en 2005 de la Asociación Mundial sobre el Mercurio del PNUMA la cual se enfoca en la reducción y control del uso del mercurio y en la Gestión de desechos con mercurio. (Santana, Medina, & Torre, 2014).

En respuesta a la preocupación para proteger el medio ambiente y la salud humana de los efectos del mercurio, se acordó en la quinta sesión del Comité Intergubernamental de Negociación sobre el mercurio en Ginebra (Suiza), el Convenio de Minamata el 19 de enero de 2013 y se adoptó el 10 de octubre de 2013. (Santana et al. 2014).

El artículo 11 del Convenio de Minamata se enfoca específicamente en los desechos de mercurio definiéndolos como sustancias u objetos que constan, contienen o están contaminados con mercurio o compuestos de mercurio en una cantidad que exceda los umbrales pertinentes definidos por la Conferencia de las Partes. Cada Parte adopta las medidas para gestionar los residuos de manera ambientalmente racional en base a las directrices del Convenio de Basilea. También se establece que las actividades de recuperación y reciclaje se destinen a usos permitidos y que no se transporten entre países excepto para su eliminación ambientalmente racional. (Santana et al. 2014).

Algunas industrias reciclan el mercurio y este es recuperado por empresas refinadoras en retortas para su reutilización, principalmente en Japón, Alemania, Dinamarca, Francia y Suiza. (Ministerio de minas y energía – Unidad de planeación

minero energético y Universidad de Córdoba, 2014)

5.3. Uso del mercurio en la industria colombiana

El mercurio ha sido utilizado en la industria colombiana en diversas actividades industriales, pero se destaca principalmente en la MAPE, donde su uso ha sido tradicional y extensivo por generaciones. La MAPE ha generado un alto impacto con los residuos de mercurio producto de la amalgamación para la obtención del oro y los cuales son vertidos a las fuentes hídricas o a la atmósfera sin ningún control ni criterio de cuidado ocupacional y ambiental. (Pantoja & Pantoja, 2016).

La MAPE al ser una actividad tan arraigada dentro de la economía nacional como base de sustento para muchas familias que habitan en zonas de violencia e ilegalidad y que están totalmente desprotegidas por el Estado sin tener otras oportunidades de ingreso, ha tenido una trascendencia dentro del contexto nacional llevando a Colombia a convertirse en uno de los mayores consumidores de mercurio a nivel mundial. (Pantoja & Pantoja, 2016).

De acuerdo a la base de datos UN-Comtrade la cual es alimentada con información de la base de datos International Financial Statistics (IFS), la información para un periodo de 7 años comprendido entre 2007 y 2013, evidencia que el total de las exportaciones de mercurio registradas hacia Colombia es de 79,6 t. sobresaliendo una exportación realizada en Bélgica de 2007 de 60 t que no aparece registrada como importación en Colombia. (Ministerio de Minas y Energía-Unidad de Planeación Minero Energética y Universidad de Córdoba, 2014)

Al revisar las exportaciones de mercurio hacia Colombia, se observa que los principales exportadores son: Alemania, Argentina, Perú, España, México, Suecia, Chile, Bélgica, Australia, Brasil, Canadá, Singapur y Suiza. (Ministerio de Minas y Energía- Unidad de Planeación Minero Energetica y Universidad de Cordoba, 2014)

5.3.1. Tratamiento y disposición final de los residuos de mercurio en Colombia

Aunque aún las estadísticas y la información respecto al uso del mercurio en el país no son del todo completa y confiable, en Colombia se ha establecido legislación enfocada a la disminución del uso del mercurio y al tratamiento y disposición final adecuada de sus residuos.

Tabla 3.***Normatividad Vigente para la Disposición final de Residuos de Mercurio en Colombia***

Resolución 159 de 2015	Establece lineamientos que deben cumplir los Prestadores de Servicios de Salud de Bogotá D.C. para la eliminación de productos y dispositivos con contenido de mercurio y la sustitución por alternativas seguras y tecnológicamente no contaminantes. (Secretaría Distrital de Salud, 2015).
Resolución 1511 de 2010	<p>Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Bombillas y se adoptan otras disposiciones. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)</p> <p>El objetivo de aplicar esta resolución es que los comercializadores y productores de bombillas con tecnología fluorescente compacta, haluros, fluorescente tubular, vapor de sodio o vapor de mercurio están obligados a formular, presentar e implementar sistemas individuales o colectivos de recolección selectiva y de gestión ambiental de los residuos de las bombillas usadas. (Ministerio de Minas y Energía-Unidad de Planeación Minero Energetica y Universidad de Cordoba, 2014).</p>
Resolución 1297 de 2010	Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores y se adoptan otras disposiciones. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)
Resolución 693 de 2007	Por la cual se establecen criterios y requisitos que deben ser considerados para los Planes de Gestión de Devolución de Productos Pos consumo de plaguicidas. (Ministerio de Ambiente , Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). Vivienda y
Ley 1658 de 2013	Por medio de 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. (Agencia Nacional de Minería, 2013)

Se relaciona la legislación vigente en Colombia para la Disposición final de residuos de mercurio

5.4. Técnicas fisicoquímicas para recuperación de ecosistemas afectados por mercurio

5.4.1. Carbón activado granular

Una de las técnicas fisicoquímicas de remoción de mercurio es el uso de CAG (carbón activado granular). En el municipio de Guachetá (Colombia), se realizó un experimento para evaluar la capacidad de remoción de este sólido para el tratamiento del mercurio contenido en las aguas procedentes del drenaje de la minería. Para la efectividad de este proceso influyen las características del sólido (área superficial, tamaño del poro y capacidad de intercambio iónico). Así mismo, influye la geometría de la columna utilizada y sus condiciones (velocidad de flujo, altura de lecho del adsorbente y la naturaleza del drenaje). (Rojas, Guerrero, Vásquez, & Valencia, 2012).



Figura 3. Carbón activado granular
Tomado de (Aguamarket, 2017)

El carbón activado es un material carbonoso-poroso preparado a partir de carbón con gases y con aditivos químicos utilizados durante la carbonización como ácido fosfórico, cloruro de zinc e hidróxido de potasio con el fin de aumentar la porosidad. La

ventaja que tiene el carbón activado es su conjunto irregular de capas con espacios que constituyen la porosidad y que impide formar la estructura del grafito, aunque se someta a tratamiento térmico de 3000° C. Esta condición en el carbón activado es la que favorece la adsorción de contaminantes en el medio ambiente. (Luna, González, Gordón, & Martín, 2007)

Las propiedades adsorbentes de un carbón activado se definen por su estructura porosa y por su naturaleza química. El carbón activado tiene en su estructura átomos de carbono con valencia insaturada y grupos funcionales (principalmente de oxígeno y nitrógeno) y componentes orgánicos. El carbón activado se puede considerar hidrófobo por su poca afinidad al agua lo que lo hace útil en adsorción de gases en presencia de humedad o de especies en disolución acuosa. (Luna et al.2007)

5.4.2. Destilación del mercurio

El proceso consiste en una carga continua del material a tratar en un tambor de acero que puede tener varias bocas de entrada dependiendo del residuo a tratar. Se logra la vaporización del mercurio calentando hasta 700 ° C (normalmente 500 ° C). Posteriormente el mercurio pasa por un sistema de enfriamiento donde el mercurio se condensa sobre una camada de mercurio líquido. La recuperación y pureza del mercurio pueden alcanzar el 99.99 % y los subproductos obtenidos son enfriados para su posterior manejo. (Geymonat, 2011)

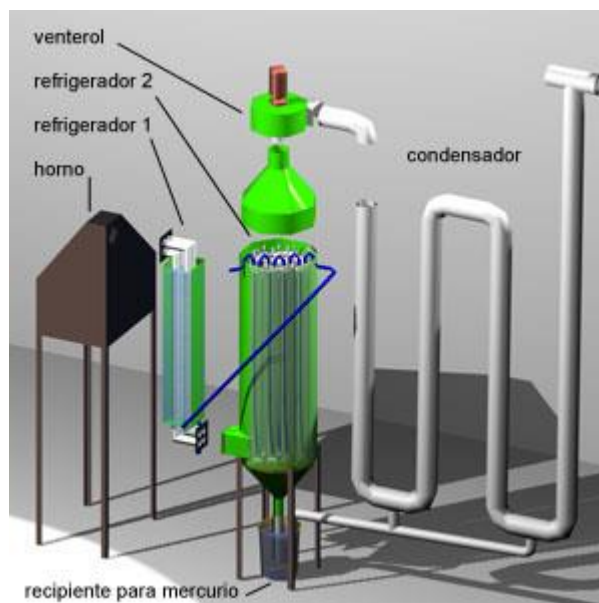


Figura 4. Destilación de mercurio. Tomado de (Hruschka, 1998)

5.4.3. Desmercurización térmica

El proceso se realiza en batch sin agitación y con una temperatura de operación aprox. de 500°C y con un vacío de -300 g/ Cm^2 . El sistema consiste en bandejas dispuestas una sobre otra dentro de un recipiente calentadas por resistencias evaporando así el mercurio y extrayéndolo al vacío y luego se realiza el proceso de condensación. (Geymonat, 2011).

5.4.4. Encapsulación del mercurio

Existen dos formas de encapsular el mercurio: la micro encapsulación que consiste en mezclar los residuos con el material antes de solidificar y la macro encapsulación donde se vierte el material sobre una cantidad de residuos utilizando como material de encapsulamiento fosfato cerámico. El objetivo del encapsulamiento es inmovilizar el residuo para evitar el contacto con agentes lixiviantes como el agua. (Berrio, Beltran, Agudelo, & Cardona, 2012)



Figura 5. Producto final estabilizado por micro encapsulación de mercurio líquido y residuos de mercurio mediante cemento polimérico de azufre. Tomado de (Centro Tecnológico del mercurio, 2016)

5.4.5. Oxidación fotocatalítica:

Consiste en destruir los contaminantes utilizando radiación solar ultravioleta y catalizadores para formar radicales hidroxilo los cuales van a hacer un efecto oxidante sobre el contaminante químico. Dentro de este proceso hay dos alternativas: La fotocatalisis heterogénea por TiO_2 (aunque existen otros fotocatalizadores el TiO_2 es el más utilizado por su mayor actividad fotocatalítica, por no ser toxico, por su estabilidad en soluciones acuosas y por su bajo costo) y la fotooxidación (Se utiliza peróxido de hidrogeno ya que en combinación con la radiación ultravioleta es un excelente purificador de agua. El peróxido de hidrogeno es un potente agente oxidante no selectivo y una fuente de radicales libres y en su descomposición genera como residuo agua y oxigeno lo que lo hace también favorable a nivel ecológico). (Garcés, Mejía, & Santamaria, 2015)

5.5. Técnicas de biorremediación para ecosistemas afectados por mercurio

A pesar de que existen técnicas fisicoquímicas de remediación, en Colombia aún no se han establecido con propiedad y de forma estricta la implementación de estas para la recuperación de los ecosistemas afectados. La biorremediación se presenta como una

gran alternativa, económica y de fácil aplicación teniendo en cuenta la baja accesibilidad en recursos para estos fines. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012).

La biorremediación es un proceso mediante el cual se utilizan organismos para la recuperación de las condiciones naturales de ecosistemas afectados por contaminantes. Se pueden utilizar bacterias (biorremediación), hongos (micorremediación) o plantas (fitorremediación). La biorremediación consiste principalmente en la estimulación de microorganismos nativos para que actúen degradando el contaminante a compuestos menos tóxicos en un proceso de mineralización que conlleva la formación de biomasa y dióxido de carbono. En algunos ecosistemas la degradación se da en el ambiente mediante la atenuación natural o biodegradación intrínseca. Sin embargo, cuando la degradación se da lentamente, se requiere la aplicación de la bioestimulación identificando el factor limitante del ambiente para suministrarlo al medio y así favorecer la acción de los microorganismos. (Benitez, 2017)

5.5.1. Atenuación natural

Es un método que consiste en reducir las concentraciones de un contaminante en el ambiente mediante procesos biológicos propios del ecosistema (la biodegradación es uno de los procesos principales de la atenuación natural en el suelo donde los microorganismos actúan para cambiar la química del mismo), reacciones químicas como la transformación abiótica, el intercambio iónico y la complejación o por medio de procesos físicos como dispersión, dilución, difusión, volatilización, advección y sorción/desorción. (Corona & Iturbe, 2005)

Los resultados en un proceso de atenuación natural dependen de la presencia o

ausencia de los microorganismos degradadores apropiados, del nivel de nutrientes, de la biodisponibilidad de contaminantes y del oxígeno disuelto. (Gómez, Gaviria, & Cardona, 2009)

5.5.2. Bioestimulación

En este proceso se estimula la actividad natural de los microorganismos en el suelo por medio de la circulación de soluciones con nutrientes y oxígeno u otro aceptor de electrones. (Gómez et al.2009)

5.5.3. Bioaumentación

La bioaumentación es la adición de microorganismos nativos, externos o genéticamente modificados al medio debido a la baja densidad de los microorganismos nativos o a la falta de capacidad metabólica para la degradación. (Benitez, 2017)

La bioaumentación en un suelo contaminado se puede determinar caracterizando las poblaciones de microorganismos y evaluando cuáles de ellos son aptos para colonizar y degradar los contaminantes. (Gómez et al.2009)

5.5.4. Biosorción

La biosorción también se presenta como una alternativa viable para la remoción del mercurio del ambiente. La biosorción consiste en una alternativa tecnológica utilizando procesos de separación con biomateriales como algas marinas, o desechos provenientes de la producción industrial, de procesos biológicos o de la agricultura. En este proceso la calidad del material adsorbente se considera de acuerdo a la capacidad que tiene el sorbato de atraer y retener el metal en una forma inmovilizada. (Borja, Garcia, Yipmantin, Guzmán, & Maldonado, 2015)

En cuanto a los metales pesados, la biosorción se da por medio de microorganismos utilizando biomasa viva o muerta para retirar o inmovilizar iones metálicos de un medio sólido o líquido a través de mecanismos físicos y químicos como la adsorción y el intercambio iónico. La biosorción involucra una fase sólida o biosorbente (membranas o paredes celulares) y una fase líquida o solvente (casi siempre es agua) en la cual están las especies metálicas a ser bioadsorbidas. (Mejía, 2006)

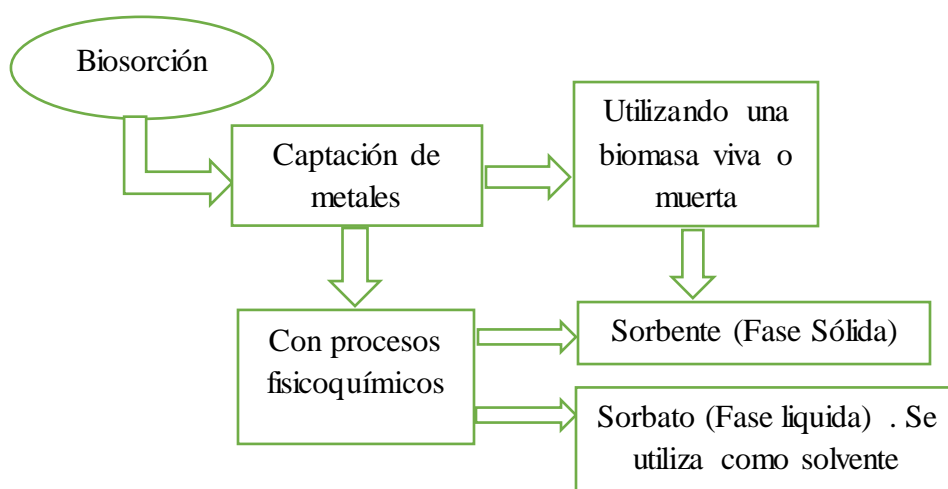


Figura 6. Proceso de biosorción
Tomado de (Mejía, 2006)

5.6. Técnicas de biorremediación

La biorremediación es un proceso mediante el cual se utilizan organismos para la recuperación de las condiciones naturales de ecosistemas afectados por contaminantes. Se pueden utilizar bacterias (biorremediación), hongos (micorremediación) o plantas (fitorremediación). La biorremediación consiste principalmente en la estimulación de microorganismos nativos para que actúen degradando el contaminante a compuestos menos tóxicos en un proceso de mineralización que conlleva la formación de biomasa y dióxido de carbono. En algunos ambientes la degradación se da en el ambiente mediante la

atenuación natural o biodegradación intrínseca. Sin embargo, cuando la degradación se da lentamente, se requiere la aplicación de métodos como la bioestimulación (identificación del factor limitante del ambiente y suministrarlo al medio para favorecer la acción de los microorganismos) o la bioaumentación (Adición de microorganismos nativos, externos o genéticamente modificados al medio debido a la baja densidad de los microorganismos nativos o a la falta de capacidad metabólica para la degradación). (Benitez, 2017)

5.6.1. Degradación enzimática

Es una aplicación de la biotecnología que consiste en la producción de enzimas en bacterias modificadas genéticamente. Estas enzimas se emplean en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. (Di Paola & Vicién)

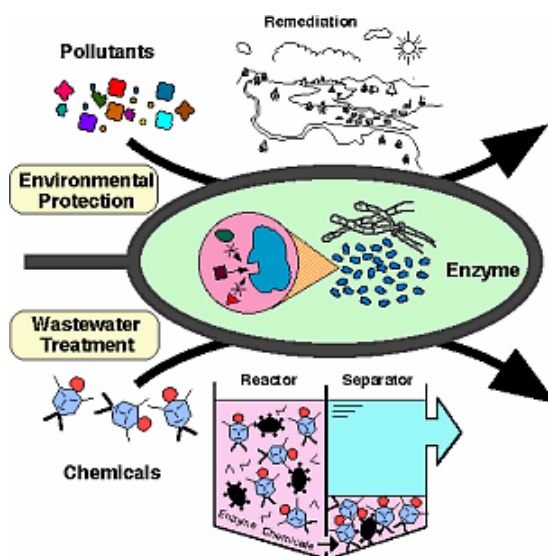


Figura 7. Degradación enzimática. Tomado de (Tejedor, 2008)

5.6.2. Remediación microbiana

Este proceso consiste en la aplicación en el sitio contaminado de microorganismos nativos o importados de otros ecosistemas para ser inoculados. Se evalúan las condiciones

y capacidades del microorganismo y acorde a eso se bioestimula el medio con nutrientes como nitrógeno y fosforo para acelerar el proceso. (Di Paola & Vicién)

5.6.3. Fitorremediación

La fitorremediación es una aplicación natural in situ o ex situ que permite el uso de plantas o de microorganismos asociados a ellas para absorber, estabilizar, acumular o volatilizar contaminantes como metales pesados, metales radiactivos, compuestos orgánicos o hidrocarburos. La planta suele absorber los contaminantes en la raíz. Las tecnologías de fitorremediación se basan principalmente en los mecanismos fisiológicos básicos como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición. (Delgadillo, González, Prieto, Villagómez, & Acevedo, 2011)

Tabla 4
Mecanismos de fitorremediación

Contaminantes	Proceso	Mecanismo
Orgánicos e inorgánicos	Fito estabilización	Complejación
Inorgánicos	Fito extracción	Hiperacumulación
Orgánicos e inorgánicos	Fito volatilización	Volatilización a través de las hojas
Orgánicos e inorgánicos	Fito inmovilización	Acumulación en la rizosfera
Orgánicos	Fito degradación	Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes
Orgánicos e inorgánicos	Rizo filtración	Uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua

Se exponen los tipos de contaminantes, su proceso de fitorremediación y su mecanismo asociado

La fitorremediación tiene como ventajas la reducción de entrada de contaminantes al medio ambiente mediante la reducción de la filtración a las aguas subterráneas y la recuperación de los metales extraídos por las plantas para un posterior reciclaje y utilización. (Agudelo, Macias, & Suárez, 2005)

Puede representar un riesgo potencial para la cadena alimenticia por el consumo de las plantas contaminadas si no se le da un tratamiento adecuado y posterior a la biomasa cosechada. (Agudelo, Macias, & Suárez, 2005)

6. Resultados y discusión

Al realizar la revisión bibliográfica del tema del mercurio y el impacto producido hacia el medio ambiente por el uso de este elemento contaminante principalmente en la industria minera, se evidencia la importancia ambiental que demanda el estudio y la aplicación de técnicas para su remoción en las zonas afectadas.

6.1. Principales especies de fauna y flora afectadas

Se han evidenciado los efectos nocivos del mercurio principalmente en organismos acuáticos que son los más propensos a la bioacumulación del metal. Sin embargo, no se ha estudiado a fondo la toxicidad y biogeoquímica del Hg en los hábitats del suelo, debido a que en el sistema terrestre es menor la concentración de referencia y la bioconcentración. (Rayhan, Krishnan, Naidu, Andrews, & Megharaj, 2017)

En algunas investigaciones se ha concluido que los microorganismos son más susceptibles a los metales pesados que las plantas y los animales y por ende su actividad microbiana se ve alterada afectando los ciclos biogeoquímicos y la disponibilidad de nutrientes para las plantas mediante la inhibición de la respiración del suelo, las

actividades enzimáticas, la nitrificación y la disminución de la diversidad microbiana.

(Rayhan et al.2017)

En el caso de las plantas terrestres, las formas de mercurio inorgánico son más disponibles para ser absorbidas por la raíz alterando la permeabilidad de la membrana celular, la actividad mitocondrial y la sustitución de cationes esenciales. (Rayhan et al.2017)

También se han realizado estudios para identificar en diferentes organismos de la cadena trófica la metilación del mercurio por bacterias intestinales donde se encontró ausencia en los microbiomas gastrointestinales de mamíferos como humanos, bovinos, porcinos, perros, pandas gigantes y renos llevando a concluir un bajo riesgo de producción endógena de MeHg en vertebrados terrestres. Sin embargo, se identificó en la microbioma intestinal de artrópodos como cucarachas, escarabajos y termitas lo que puede ser una base para la exposición y acumulación de MeHg en cadenas tróficas terrestres. (Rodriguez, R, & Jimenez, 2017)

6.2. Ejemplos de afectación en la salud humana

Los efectos del Hg en la salud humana empezaron a ser estudiados a raíz del accidente ocurrido en la Bahía de Minamata en Japón. A partir de este suceso, se identificaron los efectos agudos y crónicos específicamente del MeHg que es la forma más toxica del Hg. Se realizaron estudios en las poblaciones aledañas a la zona afectada encontrando efectos neurológicos y acumulación en cabello por encima de los niveles tolerables. Adicionalmente, se evidenciaron los efectos a largo plazo principalmente por

envenenamiento dietético en poblaciones que llevaban más de 20 años consumiendo pescado contaminado. (Santos & De Oliveira, 2018)

Otro caso relevante a nivel mundial se dio en Irak entre 1971 y 1972, donde se utilizó el mercurio como fungicida y se dio una intoxicación masiva por el consumo de pan fabricado con los granos fumigados con productos organomercuriales. (León & Peñuela, 2011)

En un estudio realizado en la Amazonia Brasileña, se utilizó el cabello como un biomarcador de exposición a Hg evidenciando que en estudios similares anteriores los hallazgos en la población cercana a ríos importantes como Negro, Tapajós y Madeira, se encontraron niveles promedio de Hg de $6\mu\text{g g}^{-1}$. En este estudio se evidencio la exposición a largo plazo de la población amazónica. (Santos & De Oliveira, 2018)

En la región de los Andes del Norte de Perú específicamente en la región de Cajamarca, se ubica la mina de Yanacocha, considerada la mina de oro más grande de América Latina. En el año 2000 un camión operado por la transportadora RANSA y que transportaba mercurio metálico produjo un derrame de 151 kg de este elemento afectando a más de un millar de personas que se vieron expuestas a la absorción del vapor de mercurio. (Arana, 2009)

Posterior a ocho años de ocurrido el suceso en la mina de Yanacocha, la población siguió manifestando síntomas como temblor corporal, insomnio, irritabilidad de carácter, dolores articulares, sarpullido, hemorragia nasal, desmayos, ceguera, dolores renales, dolor de cabeza, dolor lumbar y cambios en el sistema neuromuscular. La autoridad de salud competente no hizo una intervención eficaz y la empresa minera reporto en el 2001 que la

problemática de salud por contaminación con mercurio era un tema superado. (Arana, 2009)

En un estudio realizado sobre los efectos de la minería a pequeña escala en las localidades del Cantón Ponce Enríquez, Provincia de Azuay (Ecuador) se evidencio que tras la evaporización de la amalgama por calentamiento se da la inhalación de vapores de mercurio por parte de los mineros y de personas cercanas al proceso. Los vapores emitidos durante la separación térmica de la amalgama exceden las normas internacionales para los patrones de salud y seguridad en distancias menores a un metro del punto de generación, en distancias superiores disminuye la concentración. La absorción de estos vapores trae como consecuencia daños a nivel neurológico y renal. (Carrillo & Astudillo, 2011)

En las zonas de minería aurífera de Madre de Dios (Perú), el mercurio se ha convertido en un problema de salud pública por los vertimientos hacia la Cuenca del Río Madre de Dios o Madeiras los cuales tienen como desembocadura final el Río Amazonas. Considerando la producción de oro de la región de Madre de Dios, se estima que se han liberado anualmente de 10 a 12 toneladas de mercurio metálico al medio ambiente trayendo consecuencias para la salud pública por el consumo de organismos afectados en la cadena trófica. (Osores, Grández, & Fernández, 2010)

En Colombia también se han evidenciado situaciones de riesgo para la salud humana derivadas del uso del mercurio.

En el departamento del Chocó, el río Condoto que es uno de los principales afluentes del río San Juan ha recibido vertimientos de mercurio provenientes de las explotaciones mineras, estimados entre 200 y 1000 kg/año alcanzando niveles detectables

directamente en el río y en algunas especies de peces. Es de consideración ya que adicional al daño ambiental, la salud de la población ribereña se ve afectada ya que el río es la fuente abastecedora del acueducto de Condoto lo que aumenta el riesgo de exposición de la población. (Sánchez & Cañón, 2010)

En una zona cercana a Puerto Inírida (Guainía) entre octubre de 1998 y enero de 1999, se realizó un estudio con población voluntaria que tuviera en común ser residentes de la zona, tener relación con labores de minería aurífera y haber incluido en su dieta pescado y agua de la zona de estudio durante los 5 años previos. Se tomaron muestras de cabello y sangre encontrando concentraciones de 2,8 y 89, 2 $\mu\text{g/g}$ en cabello y de 6,9 y 168 $\mu\text{g/l}$ en sangre evidenciando que solo el 4.6 % de los individuos tenían concentraciones de mercurio por debajo de los límites máximos permisibles. Adicionalmente la población manifestó tener síntomas como pérdida de peso, cansancio físico, disminución de la memoria y la productividad, temblor e insomnio. (Idrovo, y otros, 2001)

En el municipio de San Marcos en el sur del departamento de Sucre se realizó un estudio exploratorio-descriptivo donde se seleccionaron 20 personas representativas de la población para tomarles muestras de cabello. Adicionalmente se tomaron muestras de arroz crudo y se evaluaron los niveles de mercurio total y metilmercurio mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica por vapor frío obteniendo como resultados que el arroz que se comercializa de forma suelta (arroz blanco de San Marcos) fue el único que tuvo una mínima concentración de mercurio total de 0,021 $\mu\text{g/g}$ y solo el 5% de la muestra poblacional excedió la dosis de referencia de ingestión de Hg (0,1 $\mu\text{g/kg}$ de peso corporal/día establecido por la EPA). Sin embargo, es importante el monitoreo

constante para prevenir la contaminación por arroz o consumo de otros alimentos.

(Argumedo, Consuegra, Vidal, & Marrugo, 2013)

6.3. Ecosistemas principales afectados en el mundo por el uso del mercurio

El mercurio ha dejado huellas irreversibles en los ecosistemas debido a su uso indebido o al mal manejo de sus residuos tras el uso en actividades industriales. Uno de los casos más relevantes en la historia es la tragedia ambiental ocurrida en la Bahía de Minamata (Japón) debido al vertimiento de residuos con compuestos de mercurio y otros contaminantes por parte de la empresa productora de petroquímicos y plásticos *Chisso Corporation* que terminaron contaminando el ecosistema y la fuente de alimentación de la población aledaña cuya dieta se basaba en el consumo del pescado. (Invemar, 2012)

En un estudio se evidencio que los patrones mundiales de emisión del mercurio ubican la mayoría de fuentes atmosféricas de emisión de este metal en áreas costeras densamente pobladas. Dentro de estos países con mayor densidad poblacional hay países muy pobres como Bangladesh y Nigeria y países con grandes economías como China. Las zonas costeras están en alto riesgo de exposición directa e indirecta al mercurio principalmente porque el vínculo entre las cuencas hidrográficas y los planes de gestión ambiental no están bien desarrollados en los países tropicales y subtropicales afectando especies acuáticas principalmente las de consumo humano como los mariscos. (Costa, y otros, 2012)

El problema principal en las zonas tropicales radica en su biodiversidad ya que albergan diferentes biomas y ecosistemas como playas, manglares y humedales. Se puede dar como consecuencia por mercurio en estas regiones interfiera con las redes tróficas

tropicales costeras y la pérdida de la biodiversidad afectando la conservación de especies de fauna y flora y la salud humana. (Costa, y otros, 2012)

6.4. Ejemplos de ecosistemas colombianos afectados por el uso del mercurio

En Colombia, el uso del mercurio ha sido bastante perjudicial afectando ecosistemas sensibles y de vital importancia para la preservación de especies de fauna y flora.

Durante el 2016 se produjeron 42 toneladas de oro en Colombia de los cuales solamente el 12,4 % del mineral se considera legal. El excedente del metal extraído proviene de los más de 300 municipios del país en los que se extrae el metal sin ningún control por parte del estado según cifras proporcionadas por Santiago Ángel presidente de la Asociación Colombiana de Minería (Semana Sostenible y Mongabay Latinoamérica, 2016).

No existen cifras actualizadas acerca de la entrada de mercurio a Colombia. Los últimos datos reportados son de Investigaciones contratadas por el Ministerio de Medio Ambiente en 2010 y 2012. La Universidad de Antioquia dice que en 2009 entraron al país 352 toneladas de mercurio y las Naciones Unidas dicen que en ese mismo año ingresaron 130 toneladas, dato que se acerca más al Informe presentado en 2013 por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) que dice que se importaron 150 toneladas en ese año. (Semana Sostenible y Mongabay Latinoamérica, 2016). El hecho de que no haya unanimidad en la información reportada por las diferentes entidades frente a la cantidad de mercurio que ingresa al país (a pesar de que se considera como una sustancia altamente tóxica y de efectos adversos para la salud y el medio ambiente) y que no se mantengan

datos actualizados año a año, evidencia que no se están aplicando los controles en las actividades industriales y de explotación en las cuales este elemento es utilizado. Si no hay controles en la fuente de ingreso, se hace aún más difícil controlar los vertimientos y las emisiones que se hacen de los residuos generados por el uso del mercurio y así dar un seguimiento al aumento o disminución del consumo de este metal en el país.

Lo más preocupante de la importación de mercurio, es que una gran parte va a parar a los ríos del Norte del Cauca, departamento que produce apenas el 3,7 % de oro y tiene el 4,1 % de las minas a nivel nacional. Sin embargo, es el tercer departamento que más consume mercurio después de Antioquia y Bolívar. El mayor impacto se genera teniendo en cuenta que en los municipios de Buenos Aires y Suarez (Cauca) para la extracción de 1 gramo de oro se utilizan 14 gramos de mercurio. El metal ha generado un impacto significativo en este departamento contaminando las fuentes hídricas destinadas al consumo humano lo cual se evidencio en los muestreos realizados en el Rio Ovejas demostrando que hay concentraciones de mercurio que exceden entre 50 y 1000 veces los límites permitidos por las normas colombianas , lo cual afecta considerablemente el ecosistema acuático presentando mortandad de peces y la salud de los habitantes evidenciada en casos de malformaciones, problemas de riñón y daños cerebrales, entre otros. (Semana Sostenible y Mongabay Latinoamérica, 2016).

Otro de los casos más representativos en el país se dio en la bahía de Cartagena donde funciono la planta de soda caustica ALCO Ltda. Desde 1973 hasta 1977, donde el mercurio se utilizaba en el cambio del proceso electrolítico eliminando sus emisiones al

medio acuático generando una alta concentración de metilmercurio fácilmente biocacumulable en el ecosistema. (Invemar, 2012)

La región de La Mojana en Antioquia es reconocida por ser uno de las más biodiversos del país, pero así mismo uno de las más afectadas por la concentración de metales pesados, especialmente el mercurio. Las fuentes hídricas son las principales receptoras de los residuos generados por la explotación de carbón, ferróníquel y oro. En el municipio de la Mojana se encuentran los brazos de los ríos San Jorge, Cauca y Magdalena extendiéndose desde Ayapel hasta el pie de monte de la Sierra Nevada de Santa Marta. Al realizar el muestreo y posterior análisis en el Laboratorio del Grupo de Investigación en Gestión y modelación ambiental GAIA de la Universidad de Antioquia, se determinó que se superan los límites permisibles en muestras de arroz, sedimentos y cabello humano (Corantioquia y Gaia-Universidad de Antioquia, 2008)

En el Distrito Minero de San Martín de Loba (San Martín de Loba y Barranco de Loba-Mina Santa Cruz) ubicado al sur del departamento de Bolívar, la actividad minera ha generado focos de contaminación en los entables de amalgamación y en los sitios donde se realiza quema de amalgamas de oro superando los niveles máximos permisibles (200 ng/m³). Esta contaminación se dispersa a zonas no contaminadas afectando ecosistemas y trayendo efectos adversos a la salud humana y al medio ambiente. (Olivero et al. 2014)

6.5. Disposición actual de los residuos de mercurio

A pesar de la legislación actual existente en Colombia para la disposición de residuos de mercurio en Colombia (Ver tabla 2.) La situación actual evidencia el mal

manejo y la disposición inadecuada afectando las fuentes hídricas, el suelo y la calidad atmosférica.

A pesar de que en el país se han instaurado normas para una minería responsable, los controles de las instituciones son bastante deficientes. En el año 2010 se reportaron 1997 títulos para la explotación de metales, de los cuales solo 194 tenían licencia ambiental lo que hace aún más negligente el control que se da a la actividad minera y a los residuos que genera. Adicionalmente, las licencias ambientales concedidas solo son requeridas durante la etapa de explotación sin el debido respeto a las zonas de biodiversidad y sin la mitigación de los impactos generados durante y posterior al proceso. (Ministerio de Minas y Energía-Unidad de Planeación Minero Energetica y Universidad de Cordoba, 2014)

6.6. Ejemplos de remediación fisicoquímica de mercurio

En una planta de energía de carbón en Corea, se realizó un proceso con carbón activado para la remoción de mercurio. Se utilizó un filtro híbrido con inyección de Carbón Activado en polvo (PAC) mejorando la eficiencia de captura del mercurio elemental. Cuando se aumentó la tasa de inyección de PAC de 0 a 20 mg / m³, la fracción de especiación del mercurio elemental disminuyó de 85.19 % a 3.76 % a la entrada del filtro híbrido permitiendo una mejor captura del mercurio. (Jang, y otros, 2018)

En el proceso de desorción térmica se ha estudiado la eliminación de mercurio en suelos contaminados empleando energía solar como fuente de calor. Este proceso se basa en el incremento de la presión de vapor y temperatura de contaminantes orgánicos e inorgánicos como el mercurio para lograr así su volatilización. Normalmente se hace con

hornos convencionales, pero es un proceso bastante costoso y por tal motivo se ve la posibilidad de hacerlo con un horno solar de baja-media temperatura que genera menos costo y es más amigable con el medio ambiente. (Navarro, Mendoza, & Cañadas, 2007)

Se utilizó la fotocatalisis de mercurio en un experimento realizado para el tratamiento de mercurio y cromo en los desechos líquidos de los laboratorios del Centro de Investigaciones Ambientales (CIA) y de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ISA). La radiación ultravioleta es la más efectiva para la degradación de los compuestos de mercurio y cromo dependiendo de la radiación absorbida y de los fotosensibilizadores que suelen ser compuestos inorgánicos como Fe^{3+} , nitratos, nitritos, TiO_2 , ZnO u orgánicos como los ácidos húmicos los cuales absorben la radiación ultravioleta y producen especies reactivas como el radical Hidroxilo (HO^{\cdot}) o el anión superóxido ($O_2^{\cdot-}$). (Franco, Ortíz, Mejía, Restrepo, & Peñuela, 2001)

6.7. Ejemplos de biorremediación de mercurio

A nivel mundial se han implementado estrategias para minimizar el consumo del mercurio, pero así mismo se requiere la aplicación de procesos para recuperar los ecosistemas ya afectados. Se han realizado diversos proyectos enfocados a este objetivo partiendo de la biorremediación como la mejor alternativa.

En la costa de Odisha (India), se realizó un experimento aislando *Bacillus Thuringiensis* PW-05 encontrando que resiste 50 ppm de Hg como $HgCl_2$ y compuestos de Cadmio, Zinc y Plomo así como antibióticos como la amoxicilina y la ampicilina. En esta bacteria se encontró el operón mer común a la mayoría de bacterias resistentes al mercurio y la espectroscopia de absorción atómica reveló que puede volatilizar más del 90

% del mercurio inorgánico y puede desempeñar esta función bajo diversos parámetros ambientales como pH (7 a 8), temperatura (25 ° C a 40 ° C) y Salinidad (5 a 25 ppt) teniendo gran potencial para la remoción del mercurio. (Dash, Neelam, & Surajit, 2014)

Otra alternativa plantea el uso de la ingeniería genética para integrar genes en las bacterias con el fin de optimizar su resistencia y metabolización del mercurio ya que algunas bacterias naturales o endémicas pueden modificar la molécula original del contaminante y producir metil mercurio perdiendo eficiencia en la remoción. En el experimento planteado se modificaron bacterias con polifosfato quinasa y metalotioneina proporcionando una resistencia de 80 a 120 ppm. La remoción de mercurio realizada por estas bacterias fue tan eficiente que soporto el crecimiento de las bacterias no transformadas. (Ruiz, Alvarez, González, & Torres, 2011).

En Marruecos realizaron un experimento en base a la cinética de biosorción utilizando la biomasa de algas frescas recolectadas en la costa Atlántica marroquí en la región de Casablanca. El alga utilizada específicamente fue *Ulva lactuca* y el proceso consistió en el pretratamiento de las algas lavándolas para eliminarles sales y materias extrañas, secándolas al aire y haciéndoles un posterior lavado con 0.3 N H₂SO₄ y agua destilada y posterior secado a 50 ° C. Al hacer las soluciones de 100 mg de biomasa seca con 100 ml de solución de metal, comprobaron que la biomasa protonada es más eficiente que la nativa debido al pretratamiento que se da eliminando impurezas que pueden intervenir en el proceso. (Zeroual, y otros, 2003)

En el proceso con cinética de biosorción también comprobaron la influencia del pH, ya que a valores más altos de pH la concentración de mercurio disminuye en un

tiempo más corto lo que también puede estar relacionado con los grupos funcionales de las células de las algas y la química de solución del metal. (Zeroual, y otros, 2003)

Aunque es poca la investigación y aplicación que se ha realizado en Colombia frente a las técnicas de biorremediación y a su beneficio para ecosistemas afectados por la contaminación con metales pesados, algunos proyectos desarrollados demuestran el potencial y la eficiencia de la biorremediación en el tratamiento y remoción de contaminantes como el mercurio.

Se identificaron casos de aplicación de procesos de biorremediación realizados con el fin de determinar la eficiencia y aplicabilidad de estos procesos en el país.

En el municipio de Unión Panamericana en el departamento de Choco, se realizó un experimento con la técnica del lombricompostaje para la descontaminación de suelos afectados por mercurio. Los resultados arrojaron un porcentaje de remoción del 65 % de mercurio en una mezcla de Compost contaminado con Hg al 100 % + lombrices (*Eisenia foetida*) lo que evidencio que el uso de la lombriz roja californiana y el compostaje son una alternativa viable de descontaminación. (Mosquera, 2016).

En un proyecto realizado en la Cuenca Alta del río Bogotá, a la altura de los municipios de Villa pinzón y Chocontá, se obtuvieron muestras suministradas por la profesora Ángela María Jaramillo Londoño del grupo de Investigación de Sostenibilidad Ambiental de la Universidad de ciencias Ambientales y Aplicadas UDCA. En las muestras procesadas se identificaron 10 hongos tolerantes al mercurio en medio acuoso capaces de remover o captar el mercurio del 55 % al 60 % pudiendo aumentar si se optimizan las condiciones de PH, Selectividad y bioabsorbentes. En este proyecto se concluyó la

viabilidad de la biorremediación por su economía frente a técnicas fisicoquímicas existentes que requieren agentes químicos e infraestructura menor mientras en este proceso solo se debe asegurar el medio adecuado para el crecimiento de los hongos para que puedan actuar como medio filtrante en la remoción del mercurio. (Vera, 2016)

6.8. Comparativo entre las técnicas fisicoquímicas y la biorremediación para la remoción de mercurio

Tabla 5.
Técnicas Fisicoquímicas para la remoción de mercurio

Técnica	Forma del Hg	Mecanismo
Solidificación y estabilización	Hg elemental y aceite contaminado	Reducir la movilidad del mercurio para convertirlo en una forma menos soluble (Khandaker, y otros, 2017)
Amalgamación	Hg elemental	Disolución en otros metales para formar una aleación semisólida (Khandaker, y otros, 2017)
Lavado de suelo	Hg elemental	Se lava el suelo contaminado con una solución y se extrae el solvente (Khandaker, y otros, 2017)
Extracción acida/lixiviación química	Hg elemental	Se realiza una extracción por floculación utilizando ácido (Khandaker, y otros, 2017)
Tratamiento térmico	Hg elemental	Se realiza un calentamiento, luego una condensación y por último una amalgamación (Khandaker, y otros, 2017)
Vitrificación	Hg elemental	Se inmoviliza el producto final vitrificado por un tratamiento a alta temperatura (Khandaker, y otros, 2017)
Precipitación	Hg inorgánico	Se realiza una transformación del Hg disuelto en precipitados insolubles (Khandaker, y otros, 2017)
Adsorción	Hg inorgánico	Se reduce la concentración en la superficie de un sorbente (Khandaker, y otros, 2017)
Filtración por membrana	Hg inorgánico	Se realiza una precipitación por filtración utilizando una membrana semipermeable (Khandaker, y otros, 2017)

Se exponen algunas de las técnicas fisicoquímicas para la remoción de mercurio

Tabla 6.
Técnicas de biorremediación de mercurio

Técnica	Forma del Hg	Mecanismo
Fitorremediación	Hg inorgánico	Acumulación, estabilización y absorción en las diferentes partes de una planta (Khandaker, y otros, 2017)
Remediación microbiana	Hg orgánico e inorgánico	Transformación por medio de la actividad microbiana de una forma tóxica a una forma elemental menos tóxica (Khandaker, y otros, 2017)
Biosorción	Hg orgánico e inorgánico	Absorción de mercurio utilizando material biológico como algas, hongos, biomasa (Khandaker, y otros, 2017)

Se exponen las técnicas para la biorremediación de mercurio

Tabla 7.
Comparativo de ejemplos de remediación de mercurio

Ejemplos fisicoquímicos	Ejemplos de biorremediación
<p>En un experimento realizado con carbón activado se utilizó un filtro híbrido (HF) con inyección de Carbón Activado en Polvo (PAC) para capturar mercurio y partículas finas. La tasa de inyección de PAC se aumentó de 0 a 20 mg/m³ obteniendo una disminución en la fracción de especiación del mercurio elemental de 85.19% a 3.76% mientras que en el mercurio particulado aumentó de 1.31 % a 94.04 % demostrando la eficiencia del HF en la captura y conversión del mercurio elemental a particulado. (Jang, y otros, 2018)</p> <p>La adsorción del mercurio elemental depende de las características físicas de los poros del carbono y de su tamaño y distribución. (Jang, y otros, 2018)</p>	<p>Un método de biorremediación basado en el uso de bacterias transgénicas plantea que estas se utilicen como un filtro ya que el mercurio sería secuestrado por los agentes secuestrantes presentes en las bacterias transgénicas para su posterior recuperación. (Ruiz, Alvarez, González, & Torres, 2011)</p> <p>La transformación bacteriana se da con vectores mejorados transcripcional y traduccional diseñados para expresar metalotioneina y polifosfato quinasa con una resistencia de 80µM y 120 µM respectivamente. (Ruiz, Alvarez, González, & Torres, 2011)</p> <p>La ventaja que presenta ese método es que se puede mejorar la resistencia y efectividad de remoción del mercurio por</p>

<p>La ventaja del carbón activado es que se puede preparar con elementos naturales como la caña o especies vegetales preferiblemente renovables en periodos cortos, mediante un proceso de activación química. Esto permite obtener adsorbentes de bajo costo y a veces con mayor eficiencia de remoción que el carbón activo comercial en función de su estructura porosa y el contenido total de grupos funcionales oxigenados ácidos o polarizarles de la superficie para favorecer la adsorción de la especie metálica. (Basso, Cerella, & Cukierman, 2001)</p>	<p>parte de las bacterias y que el mercurio se pueda recuperar para un posterior uso. Este método tiene como desventaja el costo generado en la fase experimental para elegir el microorganismo adecuado y transformarlo acorde a la necesidad y el costo de la implementación y seguimiento del proceso para verificar tiempos y calidad de la remoción con el fin de optimizarla.</p>
<p>En un proceso de desorción térmica se utiliza el calor para provocar la volatilización del mercurio incrementando la presión de vapor con la temperatura. Generalmente es un proceso muy costoso por los hornos requeridos y por la cantidad de energía consumida. (Navarro, Mendoza, & Cañadas, 2007)</p>	<p>En un experimento realizado con hongos se obtuvieron 10 hongos tolerantes al mercurio en medio acuoso, sin embargo, 4 de ellos no resistieron la carga contaminantes de $3\mu\text{Hg/l}$ quedando solo 6 diferentes cepas de hongos con capacidad para remover o captar el mercurio entre el 55% y 60 %. (Vera, 2016)</p>
<p>Se ha propuesto realizar el mismo proceso con energía solar con el fin de reducir costos y hacerlo más amigable con el medio ambiente. (Navarro, Mendoza, & Cañadas, 2007)</p>	<p>Los hongos son una alternativa viable de remoción de mercurio teniendo en cuenta las condiciones del ambiente como nutrientes, pH, tasa de crecimiento y luz solar. (Vera, 2016)</p>
<p>El proceso ya sea con energía solar o con energía de otras fuentes, es de alto costo por la infraestructura requerida, el consumo de energía y la volatilización producida que genera emisiones contaminantes a la atmósfera lo cual generaría un costo adicional si se implementa un proceso para el control de esas emisiones</p>	<p>Es una alternativa natural y de fácil aplicación debido a que los hongos pueden estar presentes en el medio ambiente afectado. El único costo representativo se daría en los reactivos para la experimentación y evaluación del proceso. (Vera, 2016)</p>

<p>En el distrito minero de Vetas-California (Departamento de Santander Colombia) se implementó un sistema para la destilación de amalgamas provenientes de la actividad minera (Contreras & Pinzón, 2001)</p> <p>El proceso de amalgamación se realiza en cilindros metálicos rotatorios con diámetros entre 30 y 60 cm y longitudes entre 50 y 80 cm que se accionan hidráulica o eléctricamente y donde se adiciona concentrados de mineral, agua, mercurio, aditivos(cal, sal) y medios amalgamadores (bolas o barras) obteniendo como producto amalgamas o colas. (Contreras & Pinzón, 2001)</p> <p>Se requiere de inversión para el montaje de la infraestructura lo que aumenta los costos y es peligroso para la salud humana y el medio ambiente ya que este proceso en su mayoría se realiza de forma artesanal y casera sin prevención.</p>	<p>En un proyecto desarrollado en el Municipio de la Unión Panamericana (Departamento del Chocó), teniendo como base experimentos diferentes (Mosquera, 2016) :</p> <ul style="list-style-type: none"> -T1: Suelo contaminado con Hg (100%)+lombrices (<i>Eisenia foetida</i>) -T2: Suelo contaminado con Hg (50%) + compost no contaminado(50%)+ lombrices (<i>Eisenia foetida</i>) -T3: Compost contaminado con Hg(100%)+ lombrices (<i>Eisenia foetida</i>) <p>Se determinó del % de remoción de mercurio así:</p> <p>T1: 28% , T2: 43% y T3:65%</p> <p>El factor dominante en la remoción se dio por la presencia de materia orgánica, ya que aunque el compost estuviera contaminado no afecto el crecimiento de la lombriz y esta pudo ser eficiente en la remoción del mercurio. (Mosquera, 2016)</p> <p>El proceso se da de forma natural, no requiere inversión en infraestructura y es de fácil aplicación y beneficio para el medio ambiente porque no genera otros residuos</p>
--	--

Se realiza comparación con ejemplos de las técnicas fisicoquímicas y de biorremediación

6.9. Ventajas de la biorremediación versus las técnicas fisicoquímicas

Al realizar la comparación de los métodos fisicoquímicos y las técnicas de biorremediación para la remoción de mercurio se evidencia que la biorremediación trae más beneficios al medio ambiente ya que el tratamiento se puede realizar in situ con microorganismos nativos del ecosistema que pueden contribuir a la remoción del contaminante mediante la bioestimulación o la bioaumentación.

Al ser una técnica natural, la biorremediación no deja residuos perjudiciales para el medio ambiente como si sucede con las técnicas fisicoquímicas que pueden dejar residuos de los químicos utilizados en el proceso.

Por otro lado, al ser un proceso in situ la biorremediación es beneficiosa al permitir el ahorro en costos de transporte del contaminante o de maquinaria e infraestructura necesaria para su remoción.

Los procesos biológicos representan un avance hacia tecnologías más limpias siempre y cuando se superen los percances medio ambientales que puedan afectar el proceso y disminuir la conversión o mineralización de contaminantes. (Dussán, Vives, Sarria, & Sánchez, 2009)

La desventaja que se evidencia frente al tratamiento de los desechos de mercurio principalmente en los países de ALC (Acuerdo de Libre Comercio), es la falta de una normativa específica para la gestión de estos residuos y la limitación en cuanto a tecnología para el tratamiento y descontaminación. Por otro lado, los costos influyen en la adquisición de las tecnologías adecuadas y en la adecuación de los vertederos para evitar depositarlos con otros residuos. (Santana et al. 2014).

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

- Al evaluar el impacto generado por el uso del mercurio en la Industria Nacional y en actividades de explotación como la minería frente al tratamiento que se da a sus residuos se evidencia una gran falencia ya que no existen procesos regulados para la disposición final de los mismos. La legislación colombiana es muy deficiente frente al tema aunque esta situación se deriva de una problemática mundial debido a que no se había considerado la peligrosidad del mercurio, sus efectos adversos en el medio ambiente y en la salud humana y la importancia de manipular adecuadamente sus residuos hasta que se estableció el acuerdo de Minamata que tiene como objetivo priorizar la atención sobre el mercurio como un contaminante de fácil expansión y bioacumulación en el ambiente y del cual se derivan situaciones de riesgo.

- Se hace difícil suprimir el uso del mercurio principalmente en comunidades que le han dado un uso tradicional y que lo utilizan a diario en procesos que son vitales para su fuente de sustento desconociendo las consecuencias inmediatas y a futuro por una continua exposición. Aunque en algunas comunidades los síntomas por contaminación con mercurio son evidentes, aun así, los habitantes no han discontinuado su uso y siguen vertiendo residuos de mercurio a las fuentes hídricas, la atmósfera y el suelo.

- Las técnicas fisicoquímicas pueden ser útiles para la recuperación del mercurio ya sea para almacenamiento o un posterior uso pero no son eficientes en la

eliminación de este contaminante. Por tal motivo, no se pueden considerar como técnicas de remediación 100 % eficientes.

- En Colombia se han desarrollado proyectos investigativos basados en procesos de biorremediación, con el fin de evaluar la recuperación de ecosistemas afectados por la contaminación con mercurio y así encontrar estrategias aplicables que sean económicas, eficientes y amigables con el medio ambiente. En estos procesos se han dado resultados interesantes basados en la remoción microbiana, el lombricompostaje y la micorremediación.

- La falta y unanidad de información actualizada acerca del ingreso, uso y disposición final del mercurio en cada una de las actividades industriales y de explotación en las cuales es utilizado hace que el control sobre los residuos generados sea deficiente. Sumado a esto, parte de la industria minera opera sin licencias lo que implica que no hay exigencia en planes de manejo ambiental ni de mitigación de impactos incluyendo los derivados por el uso del mercurio trayendo consecuencias al medio ambiente y la salud humana.

- Otro aspecto relevante frente a la disposición inadecuada de los residuos derivados del uso del mercurio es la falta de información y capacitación a las personas que se involucran directamente con este metal y que no saben cómo protegerse de la exposición directa y como disponer los residuos sin afectar las fuentes hídricas, el suelo, la atmósfera o su propia salud por el no uso de elementos de protección.

- Adicional al tema de los residuos sin disposición final adecuada, se suma el alto costo de las tecnologías necesarias para realizar los tratamientos, motivo por el

cual se ha retrasado la implementación de estrategias de recuperación del metal por cuestión económica. La adecuación de sitios para el tratamiento de estos residuos también es un asunto de gran influencia por la inversión que requiere y por lo que implica el minimizar al máximo los sub residuos que se puedan generar de los procesos.

- Ante la falta de recursos económicos para la implementación de altas tecnologías, la alternativa más viable para la recuperación de ecosistemas afectados es la biorremediación que se da como resultado de un proceso natural derivado de la adaptación de diversas especies a ciertos contaminantes. La biorremediación permite que los organismos endémicos o previamente adecuados al ecosistema realicen la remoción sin dejar efectos secundarios que puedan llegar a ser más perjudiciales que el suceso inicial.

- Con la investigación y estrategia adecuada se pueden determinar las especies idóneas para la recuperación de un ecosistema contaminado teniendo en cuenta la capacidad de metabolización y eliminación de la sustancia y el tiempo requerido para la realización del proceso.

7.2. Recomendaciones

Ante la problemática causada por el uso del mercurio a nivel mundial, se hace prioritario implementar de forma racional y comprometida las estrategias para mitigar el impacto del mercurio en la salud de las personas y las afectaciones que puede tener en especies de fauna y flora gracias a su facilidad para bioacumularse y biomagnificarse en la cadena trófica.

Aunque la minería es una actividad tradicional y rudimentaria en varias comunidades se hace indispensable la realización de capacitaciones para concientizar sobre la peligrosidad del mercurio y la huella que deja de forma inmediata y como se acrecienta con el paso del tiempo. Es importante que las personas tengan un concepto claro de la capacidad del metal y la forma en la que pueden contribuir a eliminar efectos negativos. Por otro lado, se pueden gestionar proyectos para sustituir la actividad minera por otras actividades más amigables con el medio ambiente y con la calidad de vida de las personas.

En cuanto a las técnicas fisicoquímicas, son alternativas viables desde el punto de vista técnico, pero son limitantes en cuanto a costo. Sería importante evaluar las alternativas de biorremediación teniendo en cuenta que son procesos in situ que no interfieren con la calidad del ecosistema generando efectos secundarios. Se puede realizar mayor investigación y desarrollo de proyectos para ir descubriendo cada vez más alternativas.

8. Bibliografía

- Agencia Nacional de Minería. (2013). *Agencia Nacional de Minería*. Recuperado de <https://www.anm.gov.co/?q=content/ley-1658-de-2013>
- Aguamarket. (2017). *Aguamarket*. Recuperado de <http://www.aguamarket.com/productos/productos.asp?producto=969>
- Agudelo, L., Macias, K., & Suárez, A. (2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de Investigación*, 57-60. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/695/69520110.pdf>
- Arana, M. (2009). El caso de derrame de mercurio en Choropampa y los daños a la salud en la población rural expuesta. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 26. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342009000100019
- Argumedo, M., Consuegra, A., Vidal, J., & Marrugo, J. (2013). Exposición a mercurio en habitantes del municipio de San Marcos (Departamento de Sucre) debida a la ingesta de arroz (*Oryza Sativa*) contaminado. *Revista de Salud Pública*. Recuperado de <https://www.scielosp.org/article/rsap/2013.v15n6/903-915/>
- Basso, M., Cerella, E., & Cukierman, A. (2001). Tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados mediante carbones activados Recuperados de un precursor renovable. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, 1-6. Recuperado de <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2001/2001-t009-a001.pdf>
- Benitez, Y. (2017). *Estado del arte en metodos biotecnológicos potenciales a ser empleados para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con mercurio, proveniente de la minería aurífera (Tesis de pregrado)*. Universidad Católica de Manizales, Manizales. Recuperado de <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1785/Yeison%20Javier%20Benitez%20Caicedo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Berrio, L., Beltran, O., Agudelo, E., & Cardona, S. (2012). Sistemas de tratamiento para residuos líquidos generados en laboratorios de análisis químico. *bdigital*. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36285/43153>

- Borja, N., Garcia, V., Yipmantin, A., Guzmán, E., & Maldonado, H. (2015). Estudio de la cinética de biosorción en plomo (II) en Alga *Ascophyllum Nodosum*. *Revista Sociedad Química de Perú*. Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v81n3/a03v81n3.pdf>
- Calao, C., & Marrugo, J. (2015). Efectos genotóxicos asociados a metales pesados en una población humana de la región de La Mojana, Colombia, 2013. *Biomédica*. Recuperado de Biomedica: <http://www.scielo.org.co/pdf/bio/v35nspe/v35nspea15.pdf>
- Carrillo, G., & Astudillo, A. (2011). Evaluación de las emisiones de vapor mercurial en procesos de amalgamado artesanal: Caso Cantón Ponce Enriquez, Provincia del Azuay. *Revista científica Maskana*. Recuperado de <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/384/330>
- Centro Tecnológico del mercurio. (2016). *Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente-Gobierno de España*. Recuperado de http://www.mapama.gob.es/en/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/mercurio/Papel_Espana_mercurio_ctndm.aspx
- Contreras, R., & Pinzón, J. (2001). *Propuesta del manejo integrado del mercurio en el proceso de amalgamación en Vetas-California (Departamento de Santander, Colombia)*. Recuperado de http://www.gama-peru.org/jornada-hg/contreras_pinzon.pdf
- Corantioquia y Gaia-Universidad de Antioquia. (Diciembre de 2008). *Niveles de mercurio en sedimento, agua y tejido vivo "buchón, arroz, peces y cabello" en los humedales de La Mojana Sucreña*. Recuperado de http://www.corantioquia.gov.co/sitios/ExtranetCorantioquia/ciadoc/AGUA/GA_CN_8127_2008.pdf
- Corona, L., & Iturbe, R. (2005). Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos. *Redalyc*, 119-126. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/404/40460203/>
- Costa, M., Landing, W., Kehrig, H., Barletta, M., Holmes, C., Barrocas, P., . . . Malm, O. (2012). Mercury in tropical and subtropical coastal environments. *Environmental Research*, 119, 88-100. Recuperado de Environmental Research: <https://www.sciencedirect.com/>
- Dash, I., Neelam, M., & Surajit, D. (2014). Characterization and potential application in mercury bioremediation of highly mercury-resistant marine bacterium *Bacillus thuringiensis* PW-05. *Environmental Science and Pollution Research*, 2642-2653.

- Recuperado de Environmental Science and Pollution Research:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-013-2206-8#citeas>
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, J., & Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación . *Tropical and subtropical agroecosystems*. Recuperado de Tropical and subtropical ecosystems: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci_arttext#t3
- Di Paola, M., & Vicién, C. (s.f.). *Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Carmen_Vicien/publication/261986733_Documento_de_Trabajo_52010_Octubre_Biorremediacion_vinculaciones_entre_investigacion_desarrollo_y_legislacion/links/0c9605361519b68791000000.pdf
- Doadrio, A. (2004). *Ecotoxicología y acción toxicológica del mercurio*. Real Academia Nacional de Farmacia. Recuperado de <http://www.analesranf.com/index.php/aranf/article/view/254/283>
- Dussán, J., Vives, M., Sarria, V., & Sánchez, O. (2009). Aproximaciones biológicas y fisicoquímicas en el tratamiento de contaminantes: un resumen del aporte de la Universidad de los Andes. *Revista de Ingeniería*. Recuperado de <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/233/231>
- Escuela de Química. (2016). *Universidad Nacional Heredia Costa Rica*. Recuperado de <https://www.una.ac.cr/#>
- Español, S. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomedica Instituto Nacional de Salud*. Recuperado de <https://www.revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/1437/1561>
- Franco, A., Ortíz, N., Mejía, G., Restrepo, G., & Peñuela, G. (2001). Fotocatálisis de Hg²⁺ y Cr⁶⁺ en aguas residuales. *Revista Facultad de Ingeniería*, 7-13. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000111&pid=S1909-0455201200010000800016&lng=e
- Gaioli, M., Amoedo, D., & González, D. (Junio de 2012). *Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente*. Archivos argentinos de pediatría. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0325-00752012000300017
- Garcés, L., Mejía, E., & Santamaria, J. (2015). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. Recuperado de

<http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol11n1/083-92%20La%20fotocat%C3%A1lisis%20como%20alternativa%20para%20el%20tratamiento.pdf>

- Geymonat, E. (Diciembre de 2011). *Manejo Racional de Productos con mercurio*. Recuperado de <http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/Tratamiento-t%C3%A9rmico-para-la-recuperaci%C3%B3n-de-mercurio-Diciembre-2011.pdf>
- Gómez, W., Gaviria, J., & Cardona, S. (2009). Evaluación de la bioestimulación frente a la atenuación natural y la bioaumentación en un suelo contaminado con una mezcla de gasolina-diesel. *Revista Dyna, Universidad Nacional de Colombia*, 1-11. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/13471/14378>
- Hruschka, F. (1998). *AIQSA*. Recuperado de http://www.hruschka.com/pmsc/manual/moa_5_4_3_2_3_2.html
- Idrovo, Á., Manotas, L., Villamil, G., Ortiz, J., Silva, E., Romero, S., & Azcárate, C. (2001). Niveles de mercurio y percepción del riesgo en una población minera aurífera del Guainía (Orinoquía Colombiana). *Biomedica*. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1728-59172010000400016&script=sci_arttext&tlng=en
- Invemar. (Diciembre de 2012). *Informe del estado de los ambientes y recursos marino y costeros en Colombia año 2011*. Recuperado de Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR: http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/IER_2011.pdf
- Jang, H.-N., Ki Back, S., Sung, J.-H., Suk Kang, Y., Jurng, J., & Chil Seo, Y. (2018). The simultaneous capture of mercury and fine particles by hybrid filter with powder activated carbon injection. *Environmental Pollution*, 237, 531-540. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749117337260>
- Kehrig, H., Baptista, G., Benedetto, A., Almeida, M., Rezende, C., Siciliano, S., . . . Moreira, I. (2017). Biomagnificación de mercurio en la cadena trófica del Delfín Moteado del Atlántico (*Stenella frontalis*), usando el isótopo estable de nitrógeno como marcador ecológico. *Revista de Biología Marina y oceanografía*, 233-244. Recuperado de *Revista de Biología Marina y Oceanografía*: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/revbiolmar/v52n2/art04.pdf>
- Khandaker, R., Mezbaul, B., Maurizio, L., Kannan, K., Stuart, A., Ravi, N., & Mallavarapu, M. (2017). Bioremediation of mercury: not properly exploited in

- contaminated soils. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 963-976.
Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00253-016-8079-2>
- León, D., & Peñuela, G. (2011). Trascendencia del metilmercurio en el ambiente, la alimentación y la salud humana. *Producción + Limpia*. Recuperado de <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/135/69>
- Luna, D., González, A., Gordón, M., & Martín, N. (2007 de Febrero de 2007). *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco*. Universidad Autónoma de México. Recuperado de http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n64ne/carbon_v2.pdf
- Martínez, J., & Uribe, A. (2015). *El mercurio y la contaminación por actividad extractiva*. Recuperado de <http://journal.ean.edu.co/index.php/Revistao/article/viewFile/1250/1215>
- Mejía, G. (2006). Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/3214/321428096010/>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (19 de Abril de 2007). *IGAC*. Recuperado de http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/Resolucion%20693%20de%202007.pdf
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (08 de Julio de 2010). *Alcaldía Bogotá*. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40019>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (05 de Agosto de 2010). *Minambiente*. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Programa_posconsumo_existente/RESOLUCION_1511_BOMBILLAS.pdf
- Ministerio de Minas y Energía-Unidad de Planeación Minero Energética y Universidad de Córdoba. (Noviembre de 2014). *Estudio de la cadena del mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro*. Recuperado de https://www.mesadedialogopermanente.org/wp-content/uploads/2015/07/Cadena_Mercurio-Tomo-I-Prod-1-2-3-y-4.pdf
- Mosquera, T. (2016). *Eficiencia del Lombricompostaje en la biorremediación de suelos degradados por la minería a cielo abierto en el municipio de Unión Panamericana, Departamento del Chocó (Tesis de Maestría)*. Universidad de Manizales, Manizales. Recuperado de

http://ridum.umanizales.edu.co:8080/jspui/bitstream/6789/2929/1/Mosquera%20_%20C%C3%B3rdoba_Tatiana%20_%202016.pdf

Navarro, A., Mendoza, J., & Cañadas, I. (Octubre de 2007). *Desorción térmica solar de suelos mineros e industriales contaminados por mercurio*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Andres_Navarro4/publication/259458289_Desorcion_termica_solar_de_suelos_mineros_e_industriales_contaminados_por_mercurio/links/0c96052bc0b101e296000000/Desorcion-termica-solar-de-suelos-mineros-e-industriales-contamina

Olivero, J., Young, F., & Caballero, K. (2014). Contaminación por mercurio en aire del Distrito Minero de San Martín de Loba en el Departamento de Bolívar, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Recuperado de Revista Internacional de Contaminación Ambiental: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992014000100001&script=sci_arttext&tlng=en

Ortega, F., López, A., Marco, M., Garcia, C., Canovas, C. O., & Lorente, O. (2003). Hospitales Sostenibles (II). Mercurio: Exposición pediátrica. Efectos adversos en la salud humana y medidas preventivas. *Revista Española de Pediatría*, 274-291. Recuperado de <http://pehsu.org/az/pdf/mercury.pdf>

Osores, F., Grández, A., & Fernández, J. (2010). Mercurio y Salud en Madre de Díos, Perú. *Acta Médica Peruana*. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1728-59172010000400016&script=sci_arttext&tlng=en

Pantoja, F., & Pantoja, S. (2016). Problemas y desafíos de la minería de oro artesanal y en pequeña escala en Colombia. *Revista de la facultad de ciencias económicas: Investigación y reflexión*. Recuperado de Universidad de Nariño: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfce/v24n2/v24n2a09.pdf>

Rayhan, K., Krishnan, K., Naidu, R., Andrews, S., & Megharaj, M. (March de 2017). Mercury Toxicity to terrestrial biota. *Ecological Indicators*, 74, 451-462. Recuperado de Ecological Indicators: <https://www.sciencedirect.com/>

Rodriguez, D., R, M., & Jimenez, M. (January de 2017). is gastrointestinal microbiota relevant for endogenous mercury metilation in terrestrial animals. *Enviromental Research*, 152, 454-461. Recuperado de Enviromental Research: <https://www.sciencedirect.com/>

Rojas, H., Guerrero, D., Vásquez, O., & Valencia, J. (2012). Aplicación del modelo de Bohart y Adams en la remoción de mercurio de drenajes de minería por adsorción

- con carbón activado. *Información tecnológica*. Recuperado de Información Tecnológica: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000300004&script=sci_arttext
- Rowlatt, J. (23 de Diciembre de 2013). El mercurio, un metal bello pero fatal. *BBC Mundo*. Recuperado de http://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/12/131207_mercurio_contaminacion_peligros_oro_az_finde
- Ruiz, O., Alvarez, D., González, G., & Torres, C. (2011). Characterization of mercury bioremediation by transgenic bacteria expressing metallothionein and polyphosphate kinase. *BMC Biotechnology*. Recuperado de <https://bmcbiotechnol.biomedcentral.com/articles/10.1186/1472-6750-11-82>
- Sacristán, E. (2017). *Diario de ciencias*. Recuperado de <http://www.diariodeciencias.com.ar/mercurio-el-peligro-en-el-pescado-metodo-de-fluorescencia-para-su-deteccion-mercurio-en-embarazadas/>
- Sánchez, D., & Cañón, J. (2010). Análisis documental del efecto de vertimiento domésticos y mineros en la calidad del agua del río Condoto(Chocó, Colombia). *Redalyc*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/html/1694/169419996009/>
- Sánchez, 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 Centro interdisciplinario de Ciencias Marinas: <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/16358/1/escobars2.pdf>
- Santana, V., Medina, G., & Torre, A. (Abril de 2014). *El Convenio de Minamata sobre el mercurio y su implementación en la región de América Latina y El Caribe*. Centro Coordinador Convenio de Basilea . Recuperado de http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2014/05/Informe_Convenio-Minamata.pdf
- Santos, N., & De Oliveira, M. (2018). Hair as a Biomarker of Long Term Mercury Exposure in Brazilian Amazon: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(3), 3. Recuperado de <http://www.mdpi.com/1660-4601/15/3/500/htm>
- Secretaria Distrital de Salud. (05 de Marzo de 2015). *Alcaldía Bogotá*. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=61279>
- Semana Sostenible y Mongabay Latinoamérica. (2016). *Veneno en la Sangre*. Recuperado de <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/multimedia/mercurio-en-colombia-veneno-en-la-sangre/37266>

- Sotomayor, V. (2017). *Revista Encontro*. Recuperado de <https://www.revistaencontro.com.br/canal/atualidades/2017/06/camara-aprova-restricao-ao-uso-de-mercurio-que-consta-na-convencao-de.html>
- Tejedor, M. (2008). *Facultad de Química, Universidad de Alcalá*. Recuperado de http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica_ambiental/docencia.htm#materiales
- Valderas, J., Mejias, M., Riquelme, J., Aedo, K., Aros, S., & Barrera, F. (2013). Intoxicación familiar por mercurio elemental. Caso clínico. *Revista Chilena de Pediatría*, 72-79. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0370-41062013000100009&script=sci_arttext
- Vera, J. (2016). *Remoción de mercurio en aguas contaminadas mediante microorganismos tolerantes, una aproximación a la biorremediación microbiana (Tesis de pregrado)*. Universidad Santo Tomas, Bogotá. Recuperado de <http://repository.usta.edu.co/handle/11634/2952>
- Weinberg, J. (2007). *Introducción a la Contaminación por mercurio para las ONG*. Recuperado de http://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_mercury_booklet-es.pdf
- Zeroual, Y., Moutaouakkil, A., Zohra, F., Talbi, M., Ung, P., Lee, K., & Blaghen, M. (December de 2003). Biosorption of mercury from aqueous solution by *Ulva lactuca* biomass. *Bioresource Technology*, 90, 349-351. Recuperado de *Bioresource Technology*: <https://www.sciencedirect.com/>