ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES A CAUSA DE LOS VERTIMIENTOS DE MERCURIO A LAS FUENTES HÍDRICAS EN COLOMBIA

MARÍA ISABELA CARDONA SÁNCHEZ

UNIDAD CENTRAL DEL VALLE DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TULUÁ
2021

ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES A CAUSA DE LOS VERTIMIENTOS DE MERCURIO A LAS FUENTES HÍDRICAS EN COLOMBIA

MARÍA ISABELA CARDONA SÁNCHEZ

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniera Ambiental

DIRECTORA
Ing. SANDRA PATRICIA SANTACOLOMA LONDOÑO
Magíster en Ingeniería Ambiental

UNIDAD CENTRAL DEL VALLE DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TULUÁ
2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

Nombre del presidente del jurado

_____

Jurado

_____

Jurado

DEDICATORIA

Primeramente a Dios, quien me dio la fortaleza y el entendimiento para poder culminar con éxito este trabajo, siendo siempre una guía en todo el camino, iluminando cada pensamiento y paso que di; a mis padres que me permitieron y me dieron la oportunidad de ser profesional, acompañándome en todo el proceso, dándome fuerza y compañía en los momentos difíciles de la vida, por ser un gran ejemplo de superación, humildad y fieles creyentes que todo se puede logran con esfuerzo y dedicación; a mis hermanas, por la ayuda y sus consejos para no darme por vencida y seguir cumplimiento mis objetivos, por ser un pilar en mi proceso académico y gran motivación para cumplir este sueño.

María Isabela Cardona Sánchez

AGRADECIMIENTOS

Agradecer principalmente a Dios por la vida y mi familia quienes son mi motivación a salir adelante, por darme salud para lograr mis propósitos y objetivos.

A mis padres, por ser incondicionales, un ejemplo a seguir, por enseñarme los valores que me han convertido en la persona que soy hoy, por la confianza, por siempre creer en mí y no dejarme desfallecer en el camino.

A mis hermanas por siempre estar dispuestas ayudarme en mi formación académica y personal.

Finalmente, agradecer a mi directora de trabajo de grado, Sandra Santacoloma Londoño, por su dedicación, paciencia, enseñanzas, consejos y orientaciones fundamentales, guiándome desde el inicio hasta la finalización de este trabajo.

María Isabela Cardona Sánchez

GLOSARIO

ADSORBATO: es una sustancia metálica que se adsorbe en la superficie.

ADSORBENTE: hace referencia a la superficie sobre la que sucede la adsorción, este suele ser sólido.

ADSORCIÓN: proceso mediante el cual un compuesto se retiene en la superficie de un material, este puede ser un proceso físico lo cual es reversible o químico que es irreversible.

ADVECCIÓN: es un mecanismo de transporte para algún material, sea una sustancia o un líquido, por ejemplo el transporte de contaminantes o sedimentos en un río.

AGUAS RESIDUALES: son el resultado de aguas proveniente de actividades humanas o industriales, que presentan una alteración en su calidad física y química.

ÁNODO: es un tipo de electrodo que se encuentra en una celda electroquímica, este cede los electrones en una reacción de oxidación. Regularmente se vincula al polo positivo del tránsito de la corriente eléctrica, pero no esto no es fijo.

BIOADSORCIÓN: Se presenta una captación de sustancias contaminantes, basada en la característica que algunos tipos de biomasas pueden enlazar y acumular gran variedad de contaminantes.

BIOMAGNIFICACIÓN: es la tendencia de productos químicos a propagarse en la cadena de alimentación y a aumentar su concentración a medida que asciende de nivel en la cadena.

CÁTODO: es un tipo de electrodo que se encuentra en una celda electroquímica, con una carga negativa, y en la reacción química sufre una reacción de reducción, donde su estado de oxidación se disminuye cuando le llegan electrones.

CINÉTICA QUÍMICA: parte de la química que estudia la velocidad de las reacciones químicas y hace referencia a la variación de las concentraciones de reactivos y productos con respecto al tiempo.

CONCENTRACIÓN: hace referencia a la proporción de soluto y solvente en una solución química.

CROSSLINKING O ENTRECRUZAMIENTO: es la unión entre moléculas poliméricas, mediante enlaces covalentes o iónicos.

DEGRADACIÓN: proceso que modifica las propiedades químicas de un elemento o solución, donde se disminuyen dichas propiedades en presencia de otras sustancias.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO: es un parámetro que se refiere a la cantidad de oxígeno necesario para degradar mediante oxidación química, la carga orgánica que se encuentra en el agua.

DESORCIÓN: es el proceso donde se libera el metal que se retiene en el proceso de adsorción; este elimina o remueve la materia desde un medio adsorbente, contrario a la adsorción.

DIFUSIÓN: es un proceso físico inalterable, donde partículas materiales se encajan en un medio ausente acrecentando la entropía del sistema conjunto formado por las partículas difundidas o soluto y el medio donde se difunden o disolvente.

DILUCIÓN: se refiere a la reducción de concentración de una sustancia química en una disolución, su fin es disminuir la cantidad de soluto por unidad de volumen de disolución.

DISEÑO FACTORIAL: es el estudio simultáneo de los efectos de varios factores que pueden influir en una variable respuesta.

DISPERSIÓN: es una mezcla semejante de moléculas diferentes. Se genera una fase dispersante o disolvente y moléculas dispersas o solutos.

ENCAPSULACIÓN: proceso mediante el cual se reúnen o agrupan todos los elementos que pertenecen a una misma entidad en un entorno con los mismos límites dentro de una estructura.

ESFERIFICACIÓN: técnica que da forma de esfera a un elemento líquido; las esferas tienen una consistencia externa de gel y líquida en el interior.

ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS: es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto en solución por medio de un equipo.

FACTOR: condición que afecta la variable respuesta y que está por fuera de los tratamientos que son los que controla el experimentador.

INTERVALO LINEAL: condición que tiene un método específico de análisis en el que se obtienen resultados, dentro de un intervalo específico, que son directamente proporcionales a la concentración del analito.

ISOTERMA DE ADSORCIÓN: curva que representa la relación de la carga de un elemento en el equilibrio en función del adsorbente, cuyos puntos fueron medidos a la misma temperatura en un tiempo determinado.

ISOTERMA: relación que existe entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente en equilibrio a presión y temperatura constante.

LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN: concentración más pequeña a la que el analito puede cuantificarse, cuyos procedimientos y resultados sean aceptables de acuerdo con las condiciones que se establecen en el experimento.

LÍMITE DE DETECCIÓN: es la menor concentración a la cual puede manifestarse el analito, pero no necesariamente cuantificarse bajo las condiciones experimentales determinadas.

MERCURIO: elemento químico representado en la tabla periódica por el símbolo Hg y cuyo número atómico es 80, se clasifica como un metal pesado y se encuentra en estado líquido, solo es soluble en soluciones oxidantes.

METAL PESADO: elemento químico tóxico, que afecta el comportamiento normal de los seres vivos.

QUELANTE: es una sustancia que forma compuestos de coordinación con iones metálicos.

REGENERACIÓN: es el proceso donde se devuelven las propiedades de bioadsorción al material, para su posterior reutilización.

REPRODUCIBILIDAD: es la capacidad de un experimento de ser replicado.

RESIDUO: aquel producto, material o elemento que después de haber sido producido o manipulado, el cual se le puede dar un tratamiento o desechar.

SUSTENTABLE: se refiere a un sistema o actividad que puede conservarse en el tiempo sin necesidad de extinguir los recursos naturales ni causar daños nocivos al medio ambiente.

VOLATILIZACIÓN: es el proceso que radica en cambiar un estado de la materia, pasando de sólido a gaseoso sin pasar por el estado líquido.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 3

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 20

2. JUSTIFICACIÓN 21

3. OBJETIVOS 24

3.1. OBJETIVO GENERAL 24

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 24

4. MARCO REFERENCIAL 25

4.1. MARCO HISTÓRICO 25

4.2. MARCO TEÓRICO 28

4.2.1. Contaminación por metales pesados 28

4.2.2. Mercurio (Hg) 30

4.2.2.1. Afectación del mercurio (Hg) en la Fauna 33

4.2.2.2. Afectación del mercurio (Hg) en el aire 34

4.2.2.3. Afectación del mercurio (Hg) en el suelo 35

4.2.2.4 Contaminación por mercurio en zonas específicas de Colombia 35

4.2.3. Minería 39

4.2.4. Tecnologías y técnicas ambientales utilizadas para la remoción del mercurio 40

4.2.4.1. Técnicas fisicoquímicas para recuperación de ecosistemas afectados por mercurio 40

4.2.4.1.1. Carbón activado granular (CAG) 40

4.2.4.1.2. Destilación del mercurio 40

4.2.4.1.3. Desmercurización térmica 41

4.2.4.1.4. Encapsulación del mercurio 41

4.2.4.1.5. Precipitación Química 41

4.2.4.1.6. Ósmosis Inversa (RO) 42

4.2.4.2. Técnicas de biorremediación para ecosistemas afectados por mercurio 42

4.2.4.2.1. Atenuación natural 42

4.2.4.2.3. Degradación enzimática 43

4.2.4.2.4. Remediación microbiana 44

4.2.4.2.5 Fitorremediación 44

4.3. ESTADO DEL ARTE 45

4.4. MARCO CONCEPTUAL 53

4.5. MARCO LEGAL 56

5. DISEÑO METODOLÓGICO 61

5.1. FASE INICIAL – DIAGNÓSTICO DE LOS RÍOS COLOMBIANOS AFECTADOS POR VERTIMIENTOS DE MERCURIO. 61

5.1.1. Diagnóstico previo 62

5.1.2. Recolección de información 63

5.1.3. Análisis de las zonas afectadas 64

5.2. FASE EVALUATIVA – DETERMINACIÓN DE LOS IMPACTOS Y EFECTOS SOBRE EL AMBIENTE A CAUSA DE LA CONTAMINACIÓN POR MERCURIO POR LA ACTIVIDAD MINERA 65

5.2.1. Evaluación documental de los impactos y efectos en el medio ambiente 66

5.2.2. Elaboración de matriz de identificación y valoración de impactos ambientales 66

5.2.2.1. Definición de criterios de valoración. 67

5.3. FASE PROPOSITIVA – EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS Y PRESENTACIÓN DE FICHAS TÉCNICAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES 74

5.3.1. Análisis de información 74

5.3.2. Presentación de fichas técnicas 76

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 77

6.1. FASE INICIAL - RÍOS COLOMBIANOS AFECTADOS POR VERTIMIENTOS DE MERCURIO. 77

6.1.1. Fuentes hídricas 77

6.1.2. Generación de vertimientos 85

6.1.2.1. Factores asociados a la generación de vertimientos de mercurio 85

6.1.4. Discusión y análisis 92

6.2. FASE EVALUATIVA – IMPACTOS Y EFECTOS SOBRE EL AMBIENTE A CAUSA DE LA CONTAMINACIÓN POR MERCURIO POR LA ACTIVIDAD MINERA 94

6.2.1. Impactos y efectos en el medio ambiente. 94

6.2.2. Matriz de identificación y valoración de impactos ambientales 95

6.2.3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS 99

6.3. FASE PROPOSITIVA – TECNOLOGÍAS Y PRESENTACIÓN DE FICHAS TÉCNICAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES 100

6.3.1. Análisis de información 100

6.3.2. Fichas técnicas 103

6.3.3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS 115

7. CONCLUSIONES 117

8. RECOMENDACIONES 119

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 121

ANEXOS 130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Demanda global del agua por sector para el 2040 4
Figura 2.Cinética ambiental del mercurio.....6
Figura 3. Personas intoxicadas por mercurio en 2013.....12
Figura 4. Personas intoxicadas por mercurio en 2014.....12
Figura 5. Personas intoxicadas por mercurio en 2015.....13
Figura 6. Fuentes de contaminación por metales pesados en aire, suelo, agua y planta.....30
Figura 7. Ciclo biogeoquímico del mercurio.....31
Figura 8. Departamentos afectados por los vertimientos de mercurio.....65
Figura 9. Vertimientos de mercurio al suelo y al agua (Ton/año).....90
Figura 11. Impactos identificados para los diferentes elementos del ambiente 97

LISTA DE FICHAS

Ficha 1. Tecnología Bioadsorción 104
Ficha 2. Tecnología Celda de Combustible Microbiana (CCM).....106
Ficha 3. Tecnología Fotocatálisis 107
Ficha 4. Tecnología Electrocoagulación.....108
Ficha 5. Tecnología Nanotecnología.....110
Ficha 6. Tecnología Precipitación química.....111
Ficha 7. Tecnología Filtración por membrana 112
Ficha 8. Tecnología Proceso de oxidación Fenton.....114

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Municipios contaminados por vertimientos de mercurio 36
Cuadro 2. Estudio de caso 1 45
Cuadro 3. Estudio de caso 2 46
Cuadro 4. Estudio de caso 3 47
Cuadro 5. Estudio de caso 4 47
Cuadro 6. Estudio de caso 5 49
Cuadro 7.Estudio de caso 6 50
Cuadro 8. Estudio de caso 7 52
Cuadro 9. División por zonas hidrográficas.....62
Cuadro 10. Cantidad de fuentes hídricas por área hidrográfica. 63
Cuadro 11. Títulos y solicitudes de explotación de oro por Departamentos 63
Cuadro 12. Recopilación de información sobre la contaminación de fuentes hídricas por vertimientos de mercurio 64
Cuadro 13. Actividades de un proyecto minero.....67
Cuadro 14. Criterio 1 67
Cuadro 15. Criterio 2 68
Cuadro 16. Criterio 3 68
Cuadro 17. Criterio 4 68
Cuadro 18. Criterio 5 68
Cuadro 19. Criterio 6 69
Cuadro 20. Criterio 7 69
Cuadro 21. Criterio 8 70
Cuadro 22. Criterio 9 70
Cuadro 23. Criterio 10 70
Cuadro 24. Calificación de importancia para el carácter negativo 71
Cuadro 25. Calificación de importancia para el carácter positivo.....72
Cuadro 26. Identificación de los Impactos socioambientales 73
Cuadro 27. Análisis de tecnologías.....75

Cuadro 28. Ficha técnica tecnologías ambientales.....76
Cuadro 29. Cantidad de fuentes hídricas por área hidrográfica.....78
Cuadro 30. Área hidrográfica Caribe.....78
Cuadro 31. Área hidrográfica Magdalena – Cauca 79
Cuadro 32. Área hidrográfica Orinoco.....83
Cuadro 33. Área hidrográfica Amazonas 83
Cuadro 34. Área hidrográfica Pacífico 84
Cuadro 35. Títulos y solicitudes de explotación de oro por Departamentos 87
Cuadro 36. Recopilación de información sobre la contaminación de fuentes hídricas por vertimientos de mercurio 87
Cuadro 37. Etapas y actividades de la actividad minera.....94
Cuadro 38. Matriz evaluación de los impactos socioambientales 96
Cuadro 39. Matriz Evaluación de los Impactos Socioambientales. 98
Cuadro 40. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 1. 100
Cuadro 41. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 2 101
Cuadro 42.Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 3 102
Cuadro 43. Calificación de tecnologías.....103

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 4 130
Anexo B. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 5 131
Anexo C. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 6 132
Anexo D. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 7 133
Anexo E. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 8 133
Anexo F. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 9.....134
Anexo G. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 10.....135
Anexo H. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 11 136
Anexo I. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 12.....137
Anexo J.Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 13.....138
Anexo K. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 14 139

RESUMEN

En el presente trabajo se diseñaron estrategias de prevención y mitigación de impactos ambientales a causa de los vertimientos de mercurio a las fuentes hídricas en Colombia, se inició con un diagnóstico para la identificación y cuantificación de las fuentes hídricas colombianas con su grado de afectación por vertimientos de mercurio al suelo y agua, para luego ser plasmadas en un mapa de acuerdo a las toneladas anuales vertidas; posteriormente se realizó una revisión bibliográfica donde se identificaron las diferentes actividades y etapas de un proyecto minero, y fuentes hídricas colombianas contaminadas por mercurio; de acuerdo a la recopilación se planteó la matriz de impactos ambientales teniendo en cuenta la metodología Conesa Fernández, y por último se presenta una descripción en fichas técnicas acerca de las diferentes tecnologías sustentables como estrategia de prevención y mitigación para la disminución de los impactos ambientales.

En el diagnóstico se encontró que de las 305 fuentes hídricas que se identificaron, el 37,4% corresponde a 114 ríos contaminados, siendo el área hidrográfica Pacifico la más contaminada. Entre otros problemas se consideró la minería como la actividad productiva que mayor presión genera al recurso hídrico por medio de sus diferentes etapas y procesos, siendo la amalgamación y la separación en retorta de oro y mercurio los que más afectan el medio ambiente.

Una vez terminado el diagnóstico, se elaboró la matriz de identificación y valoración de impactos ambientales, donde se consideró que los componentes afectados son el biótico, abiótico y el socioeconómico. Finalmente se presentaron diferentes tecnologías sustentables para la mitigación y prevención de los vertimientos de mercurio en los ríos colombianos.

Palabras claves: *mercurio, minería, recurso hídrico, tecnologías, vertimientos*.

DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD:

Esta monografía es producto de una rigurosa investigación documental realizada por la autora mediante consultas de múltiples referencias bibliográficas, las cuales se presentan como fuentes de información consultadas, y da cuenta sobre el estado del conocimiento actual en cuanto a estrategias de prevención y mitigación de impactos ambientales por vertimientos de mercurio a las fuentes hídricas en Colombia.

El presente Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental de la Unidad Central del Valle del Cauca no se ha aceptado o empleado para el otorgamiento de calificación alguna, ni de título, o grado diferente al actual.

Mª Isabela Cardona S.

María Isabela Cardona Sánchez
Cód. 210161007

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental se ha convertido en un problema mundial, donde la calidad de los recursos naturales cada vez va en descenso, siendo el recurso hídrico un eje central para determinar acciones para el control, prevención y mitigación de la contaminación; hay ciertos tipos de contaminantes que generan daños muy graves como los metales pesados.

La contaminación por metales pesados y metaloides en los recursos naturales es una de las problemáticas que más comprometen la seguridad alimentaria, salud pública a nivel global y local, haciendo necesario la búsqueda de alternativas que permitan disminuir este tipo de impactos negativos sobre el medio ambiente.

Una de las actividades que más genera presión sobre sobre el recurso hídrico es la minería. En Colombia, son muchas las regiones que desarrollan minería de oro en pequeña y mediana escala, utilizando la amalgamación para separar el metal del resto del material que lo contiene, proceso en el cual las personas que desarrollan la actividad inhalan directamente los vapores producto de la quema; a este proceso también se suma que la fauna existente en los lugares donde se realiza el proceso de extracción del mineral se contamina, generando una bioacumulación en los peces y luego estos son usados para el consumo humano en diferentes poblaciones.

Por eso se hace necesario el estudio de tecnologías o alternativas que disminuyan los efectos negativos que se produce en la actividad minera, con este documento se identificaron zonas vulnerables en el territorio nacional, teniendo en cuenta los vertimientos de mercurio anuales en las fuentes hídricas. Después de identificadas las zonas, fueron plasmadas en un mapa de acuerdo a las toneladas vertidas por año; en la fase evaluativa desde la parte ambiental se identificaron cuáles son las diferentes actividades y etapas de un proyecto minero, de acuerdo a la

información recopilada y gracias a la guía minero ambiental dispuestas por el Ministerio de Minas y Energía se planteó la matriz de impactos ambientales teniendo en cuenta la metodología Conesa Fernández, y por último se presenta una descripción en fichas técnicas acerca de las diferentes tecnologías sustentables como estrategia de prevención y mitigación para la disminución de los impactos ambientales.

Se espera que la realización de este trabajo sirva como base para nuevas investigaciones y que se aborde el tema de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas por mercurio o metales pesados.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La tierra está compuesta de aproximadamente 1.386 km^3 de agua. Donde solo el 0,007% del agua existente es apta para el consumo humano. Se estima que para el 2025 cerca de 2.000 millones de personas que viven en lugares donde se presenta escasez del líquido vital, estarían por debajo del consumo promedio por persona que corresponde a 500 m^3 anuales[1].

Así mismo, el deterioro de los recursos naturales se ha convertido en un gran problema del siglo XXI, donde la pérdida de estos ha incrementado exponencialmente a causa de las diferentes actividades económicas, contaminando aproximadamente 2.000 millones de m^3 diarios, haciendo notable la crisis ambiental representada en el deterioro y agotamiento de los recursos naturales, llegando a incumplir uno de los objetivos de desarrollo planteado por la Organización de la Naciones Unidas (ONU). Este objetivo se definió así: “asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible de agua y saneamiento para todos”, para darle al agua prioridad en todos los países miembro. Se destaca que 2015 fue un año crítico para la agenda en el tema de agua y saneamiento[2].

Seguidamente la calidad de los recursos naturales cada vez va en descenso, siendo el recurso hídrico un eje central para determinar acciones para el control, prevención y mitigación de la contaminación; en la figura 1 se puede observar la demanda global de agua por sector proyectada hasta el año 2040[3].

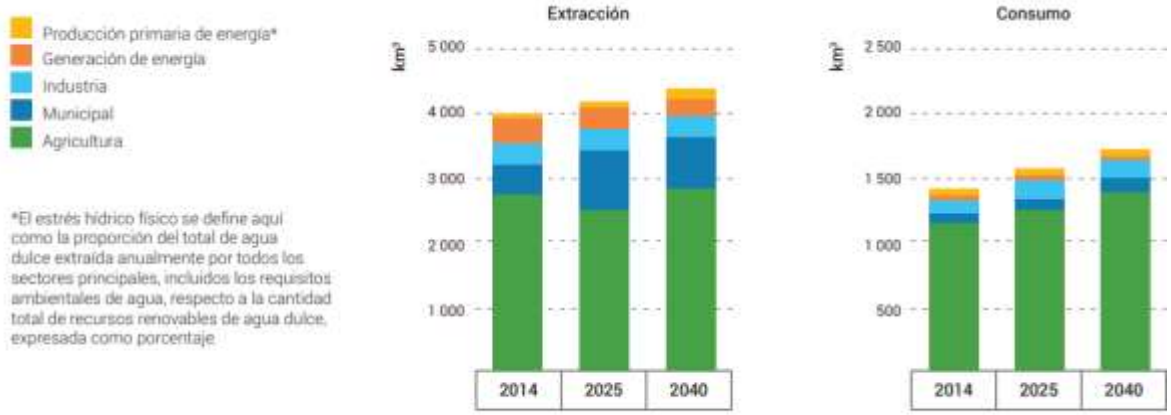
---

[1] AQUAE FUNDACION. 2020. *Principales datos del agua en el mundo.* [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: https://www.fundacionaquae.org/principales-datos-del-agua-en-el-mundo/

[2] REYES, Y. *et al*. 2016. *Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente*. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, *16*(2), 66-77. Colombia. [Citado el 1 de mayo de 2020]. Disponible en: https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447

[3] UNESCO. 2019. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos.* [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr/2019

Figura 1. Demanda global del agua por sector para el 2040



Fuente: ONU (2018ª), pág. 72, basado en datos de AQUASTAT

Los sectores que generan mayor contaminación a los recursos naturales son la minería y la industria, estos con sus vertimientos a las fuentes hídricas de plomo, mercurio, cadmio, arsénico y cromo, influyendo directamente en la salud humana y la fauna existente en el agua. Esta contaminación es generada en su gran mayoría por actividades antrópicas, una de ellas es la combustión de gasolina con plomo, generando material suspendido el cual es inhalado por los seres vivos. Por otro lado, las aguas residuales que no reciben ningún tratamiento proveniente de minas y fábricas llegan a los ríos, contaminando las aguas subterráneas, abandonando metales tóxicos en el ambiente, contaminando el suelo y acumulándose en las plantas y tejidos orgánicos[4]. La minería artesanal es considerada la mayor fuente de liberación de mercurio a nivel mundial[5].

El mercurio es considerado como contaminante prioritario en la Unión Europea, según la Directiva del Marco del Agua, también en el Convenio Ospar y el

[4] GOBIERO DE LA RIOJA. s.f. *Salud y metales pesados.* [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible : https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/calidad-aire-cambio-climatico/calidad-aire/red-biomonitarizacion-metales-pesados-rioja/salud-metales-pesados

[5] CORRALES, A. 2013. A*nálisis de la problemática socioambiental ocasionada por uso del mercurio en la minería artesanal en Colombia.* Tesis de grado especialista en Gerencia Ambiental. Colombia. Universidad Libre: Instituto de posgrados ingeniería. 122p.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente - PNUMA. De acuerdo a estudios realizados en Colombia se observó que el conocimiento frente a las diferentes reacciones del Hg antropogénico ha venido aumentando, además se identificó que en los movimientos cíclicos y las vías de transformación en el ambiente se localizan en 27 especies donde los más afectados son la fauna acuática principalmente los que están a la cabeza de la cadena trófica como el tiburón[6].

La toxicidad del metal varía de acuerdo a la forma presente en el ambiente esta puede ser orgánica o inorgánica, siendo incorporada al cuerpo humano por medio del consumo de animales acuáticos o por desempeñar labores relacionadas a la pesca o la minería. Donde se afecta el sistema digestivo, nervioso e inmunitario, los riñones, la piel, los pulmones y los ojos[7].

Además, este metal se presenta como compuestos orgánicos en diferentes formas por ejemplo: dimetilmercurio, fenilmercurio, etilmercurio y metilmercurio. Siendo el metilmercurio el de mayor presencia en el ambiente, causado por el metabolismo microbiano y los procesos abióticos[8].

Esta forma del metal puede acumularse y biomagnificarse en la cadena alimenticia por medio de los peces en concentraciones miles de veces mayores que las

---

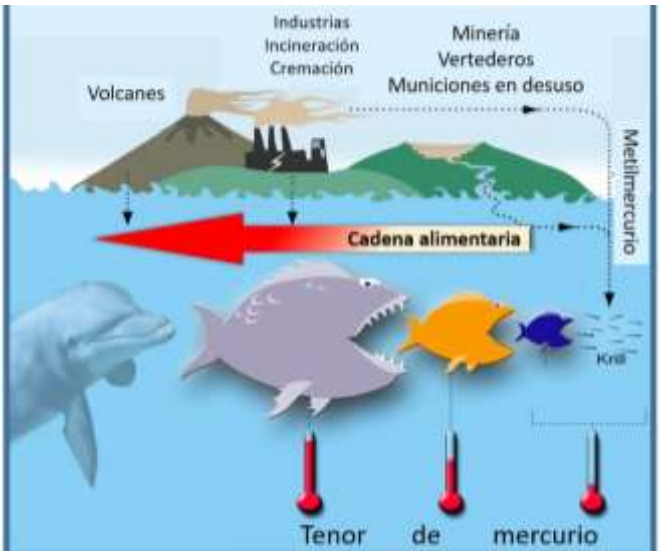
[6] LEON, D & PEÑUELA, G. 2011. *Transcendencia del metilmercurio en el ambiente, la alimentación y la salud humana, Citado por* FAJARDO, C; PINZON, C. 2018. *Impacto del Mercurio en los sistemas colombianos y las técnicas aplicables para su remediación.* Colombia. Revista: ECAMPA, Vol. 2. Número 1.

[7] GAIOLI, M., AMOEDO, D., & GONZÁLEZ, D. 2012. *Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente,* Citado por FAJARDO, C; PINZON, C. 2018. *Impacto del Mercurio en los sistemas colombianos y las técnicas aplicables para su remediación.* Colombia. Revista: ECAMPA, Vol. 2. Número 1.

[8] LINDBERG, S. et al. 2001 *Especies de mercurio metilado en muestras de gas de vertedero de desechos municipales en Florida, EE. UU*. Ambiente atmosférico 2001; 35: 4011-4015.

encontradas en las aguas donde ellos habitan, en la figura 2 se ilustra la cinética ambiental del mercurio[9].

Figura 2. Cinética ambiental del mercurio



Fuente: https://www.agroconsultoraplus.com/efluentes-caso-minamata/

La acumulación en los seres vivos se debe principalmente a la dieta, está relacionada con la enfermedad de Minamata: “una de las grandes tragedias generadas al ambiente en la historia”. Las consecuencias fueron la masiva intoxicación ocasionada por mercurio, lo que además genera un invaluable deterioro social ligado al nacimiento de niños con problemas que se reflejan en malformaciones y retardo mental o psicomotor[10].

La contaminación por metales pesados y metaloides en los recursos naturales se proyecta como una de las mayores problemáticas que comprometen la seguridad alimentaria y salud pública a nivel global y local. Así mismo, el vertimiento de metales pesados a fuentes hídricas altera el ciclo de las redes tróficas,

[9] JOHANSEN P. et al. 2007. *Acumulación humana de mercurio en Groenlandia*. Sci Total Environ 2007; 377: 173-178.
[10] GRACIA, L. 2009. *Contaminación por mercurio en humanos y peces municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia.* Rev. Fac. Nac. Salud Pública 2010; 28(2): 118-124

provocando problemas en los animales que pueden ser consumidos por el ser humano. Debido a toxicidad, causa impacto a la salud por una exposición prolongada que se transforma en alarmante bio-acumulación. Todo depende del tipo de metal, produciendo afectación que puede ir desde daños en órganos vitales hasta desarrollo de cáncer[11].

De acuerdo al Sistema de Información Ambiental- SIA, Colombia es uno de los países con mayor riqueza hídrica, y expresó que "la demanda de agua se incrementó casi el 5 % pasando de 35.987,1 millones de m^3 al año en 2012 a 37.308 millones de m^3 en 2018. El sector que más utiliza agua es el agrícola (43,1%), luego el energético (24,3%). De otro lado, en Colombia hay 391 municipios que pueden presentar desabastecimiento en temporada seca; de otro lado, los departamentos que presentan la mayor afectación por la falta de agua son: Santander, Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Magdalena, Bolívar y Cesar"[12].

Las fuentes hídricas colombianas reciben y transportan cargas contaminantes utilizadas en los diferentes procesos de los sectores económicos, que son vertidas mayormente sin algún tratamiento previo; siendo el recurso hídrico el receptor de grandes volúmenes de sedimentos cuyo origen son los procesos de erosión de origen natural o por acción del hombre. Esta contaminación se incrementa diariamente, debido al crecimiento poblacional y la actividad del hombre, viendo la necesidad de establecer monitoreos y controles constantes que permitan tomar acciones pertinentes para contrarrestar esta problemática y disminuir el impacto en procesos naturales y sociales, especialmente en la salud humana.[13]

---

[11] REYES, Y. et al. Op cit.

[12] PAZ, J*. 2019. Calidad, abastecimiento y saneamiento: los grandes retos del agua en Colombia*. MONGABAY. [En línea]. Colombia. [Citado el 30 de abril de 2020]. Disponible en: https://es.mongabay.com/2019/03/colombia-estudio-nacional-agua-ideam/

[13] SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL COLOMBIANO. s.f*. Calidad del Agua*. [En línea]. Colombia [Citado el 19 de abril de 2020]. Disponible en: http://www.siac.gov.co/calidadagua

Por otra parte, en Colombia se han venido ejecutando investigaciones desde los años 70. Primero se inició con identificar las concentraciones de metales pesados en aguas y sedimentos; luego en peces y recientemente en vegetación acuática y en los trabajadores de las minas que extraen oro, así como en pescadores que aprovechan el recurso pesquero en las aguas de los diferentes ríos[14].

El mercurio se incorpora en las cadenas tróficas se presenta en su forma como metilmercurio porque es el más volátil y a temperatura ambiente se sublima para después incorporarse a la atmósfera como vapor[15].

En cuanto al medio acuático, el metilmercurio obstaculiza la cadena trófica por la facilidad que tiene para traspasar las membranas celulares y ser absorbido por el organismo, lo cual genera afectaciones en el sistema nervioso debido a su toxicidad. Debido a mantenerse presente en el ambiente, por su capacidad de bioacumulación y magnificación en la cadena trófica repetidamente desde el zooplancton hasta el depredador que encabeza la cadena[16].

De acuerdo a un estudio realizado en la zona de playa de Riohacha se identificó "que los más afectados por la minería son los ecosistemas acuáticos y por tal razón, las comunidades humanas se ven afectadas directamente porque se alimentan de peces provenientes de dichos ecosistemas". En esta investigación se evaluaron los niveles de concentración de diferentes metales pesados en donde

---

[14] MANCERA, N y ALVAREZ, R. 2006. *Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio en peces dulceacuícolas de Colombia*. En: Acta biol. Colombia. Vol. 11. No 1. p. 4.

[15] DOADRIO, A. 2004. *Ecotoxicología y acción toxicológica del mercurio. Real Academia Nacional de Farmacia*. [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: http://www.analesranf.com/index.php/aranf/article/view/254/283

[16] KEHRIG, H. et al. 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. [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/pdf/revbiolmar/v52n2/art04.pdf

se confirmaron niveles que causan efectos agudos en aguas marinas y estuarinas para preservación a nivel nacional[17].

El mercurio y la minería

Una de las actividades que en la actualidad está generando mucha presión sobre el recurso hídrico es la minería. El 72% de las minas del país corresponden a pequeña minería en la cual se destaca el papel de la mujer y de los grupos étnicos; de esta pequeña minería, aproximadamente el 66% es ilegal, siendo este último el que más causa impacto al recurso hídrico.

Respecto a las minas ilegales, se ha establecido que alrededor del 39% llevan más de 10 años de explotación minera, y debido a esta condición, se consideran como minería tradicional no legalizada, en la cual el papel de la mujer es destacado al igual que los grupos étnicos en la pequeña minera[18].

El uso del mercurio debe tener un tratamiento especial, debido a los graves efectos que, como ya se ha mencionado, puede generar su presencia, contacto e ingesta; sin embargo, gran parte de las actividades que lo emplean son ilegales y no implementan la gestión de sus residuos de forma adecuada. Se ha establecido que por cada gramo de oro se usan siete gramos de mercurio lo cual ya es una situación preocupante y si a esto se suma que en Colombia se producen 58 toneladas de oro anuales, y que el 86% es ilegal, el escenario se torna alarmante. La solución no es prohibir su uso sino acompañar al medio millón de mineros en

[17] DORIA A.; DELUQUE V. 2015. *Niveles y distribución de metales pesados en el agua de la zona de playa de Riohacha, La Guajira, Colombia*. Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 6(1), 123 - 131. [Citado el 12 de septiembre de 2020] Disponible en: https://doi.org/10.22490/21456453.1268

[18] GÜIZA, L. 2013. *LA PEQUEÑA MINERÍA EN COLOMBIA: UNA ACTIVIDAD NO TAN PEQUEÑA.* DYNA, [S.l.], v. 80, n. 181, p. 109-117. ISSN 2346-2183. [En línea]. Colombia. [Citado el 29 de abril de 2020]. Disponible en: https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/35819

su transición a la formalidad, soportados en políticas claras con respecto al adecuado uso y disposición final[19].

Entidades como la Unidad de Planeación Minero Energética en 2012, reveló que en Colombia se utilizaron entre 130 y 460 toneladas de mercurio en la minería de oro. Esto representa una elevada exposición, lo que se convierte en una amenaza directa a la salud afectando aproximadamente entre diez y quince millones de personas que trabajan en la extracción de oro, en países de África, Asia y Sudamérica. Según los cálculos de la evaluación mundial sobre el mercurio realizado por el PNUMA en 2013, se encuentran actualmente alrededor de tres millones de mujeres y niños trabajan en esta actividad. Considerando a Colombia como la tercera fuente de emisión de mercurio después de China e Indonesia.[20]

Por otra parte, el mayor problema de la minería aluvial frente al uso del mercurio es que no se puede garantizar su recuperación tras el "lavado" del oro, ya que además el líquido se volatiliza en vapores o queda en suspensión en el agua. El Hg es un elemento que no se puede eliminar fácilmente del medio ambiente, este circula en la atmósfera, agua y tierra, viajando largas distancias desde la fuente de emisión, lo que facilita su migración por las diferentes cadenas tróficas, donde se acumulan y biomagnifican al transformarse en mercurio orgánico, y es ahí donde se generan efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente[21].

De acuerdo a datos suministrados por el Sistema de Información Minero Colombiano – SIMCO para el año 2016, Bolívar se instauró como el cuarto

---

[19] GAVIRIA, S. 2016. *También tenemos que hacer la paz con la naturaleza porque el mercurio sigue causando estragos*, DNP. [En línea]. Colombia. [Citado el 15 de abril de 2020]. Disponible en: https://www.dnp.gov.co/Paginas/%E2%80%9CTambi%C3%A9n-tenemos-que-hacer-la-paz-con-la-naturaleza-porque-el-mercurio-sigue-causando-estragos%E2%80%9D-Sim%C3%B3n-Gaviria-Mu%C3%B1oz.aspx

[20] GAVIRIA. Op cit.

[21] MINISTERIO DE SALUD. 2018. *Evaluación del grado de contaminación por mercurio y otras sustancias toxicas, y su afectación en la salud humana en las poblaciones de la cuenca del río Atrato, como consecuencias de las actividades de minería*. Bogotá. p. 10

departamento con mayor producción de oro (4.084,01 kg) y en 2017 San Martín de Loba fue el sexto municipio en cuanto a la producción del mineral (104,08 kg). Para el año 2015 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo expresó que este tipo de minería representa el 0,1% de la producción anual de oro. En la minería aurífera de Colombia se emplea mercurio metálico, el cual ha propiciado impactos en el suelo, la vegetación y la contaminación del agua.[22]

El Sistema Nacional de Vigilancia en Salud Pública - SIVIGILA del Instituto Nacional de Salud - INS, por medio de sus informes determinó que para los años 2013 y 2015, se presentaron 1.126 casos en Colombia que evidencian la intoxicación por mercurio, en 59 municipios de 18 departamentos del país; los departamentos más afectados a causa de la minería fueron: 312 casos (Antioquia), 218 casos (Chocó), 206 casos (Córdoba), 167 casos (Bolívar) y 143 casos (Sucre).

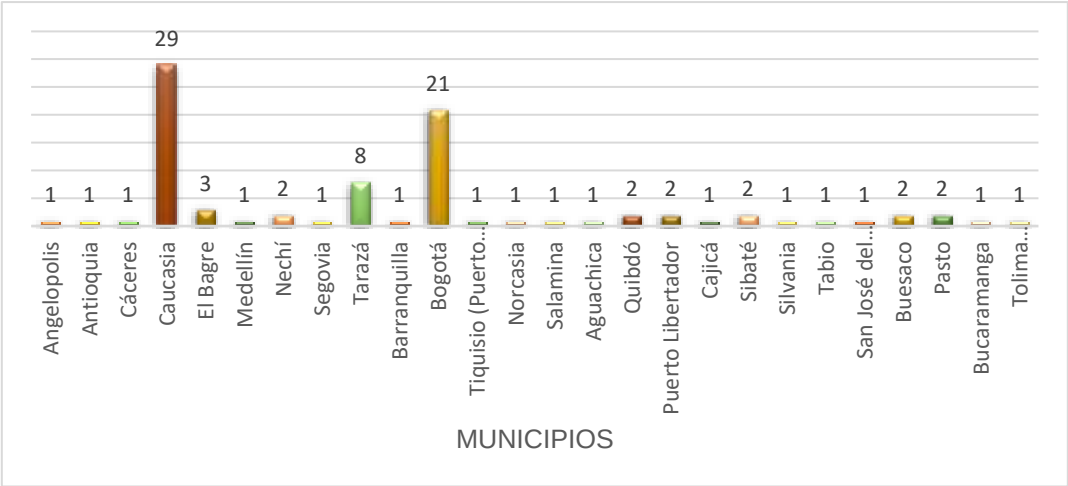
Los 12 municipios con más reportes entre 2013 y 2015 fueron: “Córdoba con 138, Caucasia con 95, El Bagre con 75, Montelíbano con 64, Guarando con 62, Arenal con 61, Quibdó con 60, Río Quito con 58, Cantón de San Pablo con 55, Tiquisio con 54, San Martín de Loba con 48 y Istmina con 40. Esta información puede presentar sub-registros porque en ellos únicamente se incluyen las atenciones hospitalarias por eventos de intoxicación. En cuanto al registro, el 60% de los municipios con minería ilegal presentan casos de intoxicación por este metal”. En las figuras 3, 4 y 5 se ilustran los 1.126 casos de intoxicación por mercurio en Colombia entre 2013 y 2015[23].

---

[22] ROCHA-ROMAN, L. et at. 2018. *IMPACT OF GOLD MINING ASSOCIATED WITH MERCURY CONTAMINATION IN SURFACE SOIL OF SAN MARTIN DE LOBA, SOUTH OF BOLIVAR (COLOMBIA)*. *Rev. Int. Contam. Ambient* [online]. vol.34, n.1 [citado el 12 de mayo de 2020], pp.93-102. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-

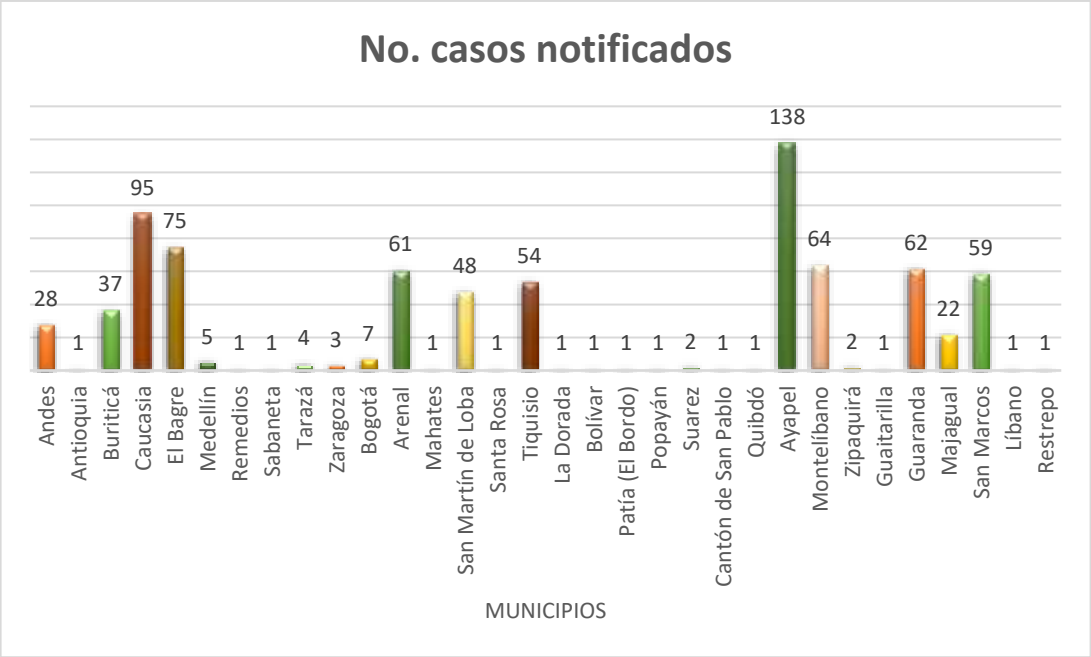
[23] GARCIA, C. et al. 2017. *Convenio de Minamata. Así actúa Colombia frente al mercurio*. Cali, Colombia: WWF-Colombia. 63 pág.

Figura 3. Personas intoxicadas por mercurio en 2013



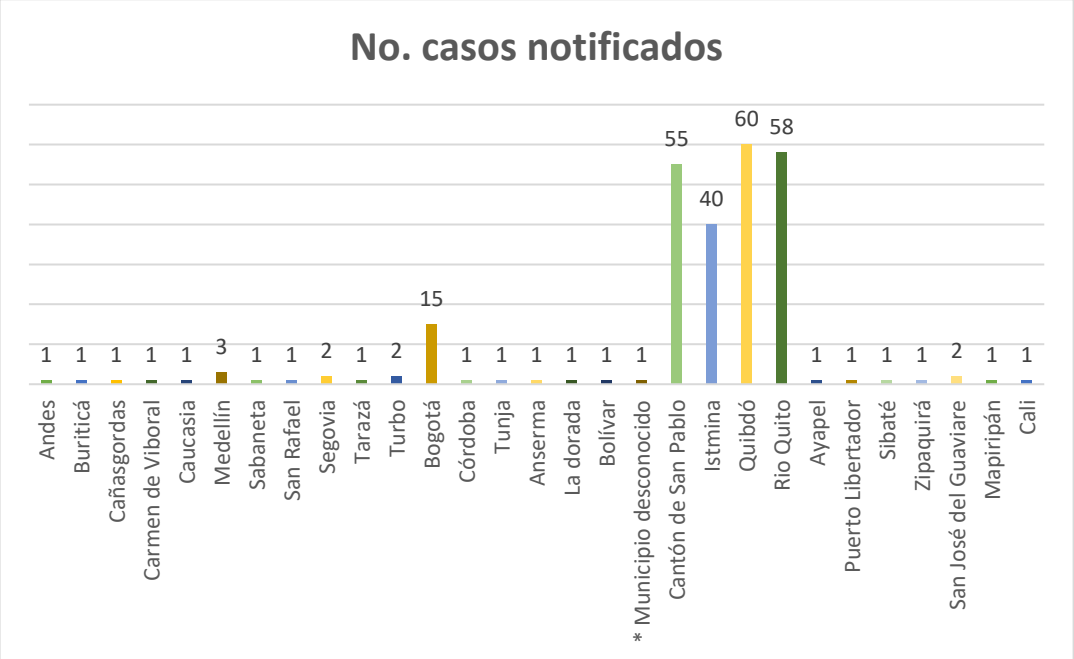
Fuente: Departamento Nacional de Planeación. 2014

Figura 4. Personas intoxicadas por mercurio en 2014



Fuente: Departamento Nacional de Planeación. 2016

Figura 5. Personas intoxicadas por mercurio en 2015



Fuente: Departamento Nacional de Planeación. 2016

En Colombia para los últimos seis años la producción de oro promedio fue de 58 toneladas. Siendo Antioquia, Chocó, Bolívar, Nariño, Cauca, Caldas, Valle del Cauca, Córdoba, Guainía y Tolima los productores del 92%. Cerca de, el 83% de la minería es de aluvión y el 17% restante es de filón[24].

Los problemas que enfrenta el país en torno a esta actividad, de forma general, son numerosos y disímiles. El Censo Minero departamental generado entre 2010 y 2011 por el Ministerio de Minas y Energía indicó que: “el 63% de las actividades mineras del país trabajan sin el cumplimiento de los requisitos legales; esto quiere decir, sin título minero o bajo su amparo y sin instrumento ambiental aprobado. Particularmente, el censo evidenció que, de 4.133 unidades de producción minera de oro (UPM), el 86,7% (3.584) labora sin el correspondiente título minero (ilegales) y tan solo el 13,3% (549 UPM) lo hace de manera legal. Asimismo,

[24] GAVIRIA. Op. cit.

mostró que, en los departamentos productores, el rango alcanza el 83% de actividades que incumplen los requisitos legales. Debido a esto, desde el comienzo de la actividad, el estado de informalidad no le permite a los mineros realizar su trabajo amparado por la institucionalidad y poder recibir los patrocinios de ella, y por esto, termina acostumbrándose a la informalidad”[25].

La minería ilegal con el pasar de los años, ha sido el generador del conflicto y de las economías informales en varios lugares del país. Para los años 2010 y 2014 se pudo establecer que, cerca del 38% de los municipios que presentan conflicto, poseen actividades asociadas a la minería ilegal, los cuales están centrados en Antioquia, Cauca, Norte de Santander y Chocó[26].

Según datos del Departamento Nacional de Planeación - DNP con datos del INS comunicó que para el año 2016: “1.150 fuentes hídricas colombianas atraviesan municipios donde está presente la minería ilegal de oro. De este valor, 232 fuentes hídricas están en municipios en los que se registraron casos de intoxicación con mercurio”[26].

En países como Colombia se ha identificado información referente a la contaminación por el mercurio, lo cual ha determinado que los estudios epidemiológicos son escasos. En estos se incluyen mediciones del metal en humanos y en lugares como la cuenca del río Cauca y del Magdalena, pero no hay mucho con relación a los impactos causados. Algunos casos severos de exposición a este metal en Colombia se han reportado en el departamento de Antioquia en el municipio de Segovia; en esta zona urbana se indicó que la media

[25] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. CENSO MINERO DEPARTAMENTAL 2010- 2011. [Citado el 23 de octubre de 2020Disponible: https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/CensoMinero.pdf/093cec57-05e8-416b-8e0c5e4f7c1d6820
[26] GAVIRIA. Op. cit.

de mercurio elemental alcanzó 1,26 µg/m^3 en el aire, valor muy por encima de lo recomendado internacionalmente[27].

De acuerdo con un estándar peruano por medio del Decreto Supremo 002-2008 MINAM el cual aprueba los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, establece como límite 1 partes de mercurio por mil millones de partes de agua potable (1 ppb) para agua que puede ser potabilizado previa desinfección. En comparación, la EPA de los EE. UU. ha establecido un límite de 2 partes de mercurio por mil millones de partes de agua potable (2 ppm o ppb)[28].

En Estados Unidos la Administración de Alimentos y Drogas (FDA) estableció que el nivel máximo permisible de Hg es 1ppm en mariscos. Por otro lado, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU. (OSHA, por sus siglas en inglés) estableció como límite de 0,1 mg/m^3 de aire para el aire del trabajo y 0,05 mg/m^3 para vapor de mercurio metálico en 8 horas diarias y 40 horas semanales de trabajo”[29].

Para el caso de Colombia se aplica la resolución 0631 de 2015 donde para el sector: “Actividades de minería en el artículo 10 se refiere a los parámetros fisicoquímicos que se deben analizar y sus valores máximos permitidos en vertimientos de aguas residuales no domésticas (ARnD) a cuerpos de aguas superficiales provenientes de actividades mineras, establece que el valor máximo admisible para el mercurio (Hg) es 0,002 mg/L”[30].

---

[27] ROCHA-ROMAN, L. et al. Op. cit., p 2

[28] REPUBLICA DEL PERÚ. 2008. DECRETO SUPREMO N° 002-2008-MINAM. Aprueban los estándares nacionales de calidad ambiental para agua. [En línea]. PERÚ. [Citado el 3 de noviembre de 2020] Disponible en: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_002-2008-minam.pdf

[29] MINISTERIO DE SALUD. Op cit., p 18

[30] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO. 2015. *Resolución 0631 de 2015..* [En línea]. Colombia. [Citado el 3 de noviembre de 2020] Disponible en: *https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf*

Un estudio realizado en Colombia recalcó la detección de hidrocefalia derivada de la exposición crónica a mercurio elemental. “El estudio fue realizado en una persona de 50 años, lo cual presentó en los últimos tres meses antes del diagnóstico, episodios de dolor de cabeza fuerte, disminución de la visión, poca fuerza muscular para desarrollar acción motriz, anorexia, dolor en los músculos, síntomas neuro-psiquiátricos y fatiga. Así mismo, en investigaciones recientes de la Universidad de Cartagena han encontrado daño neurológico específicamente en ensayos de coordinación muscular. Además, un trabajo realizado en mineros de El Bagre (Antioquia), con edades que oscilan de 20 y 45 años, encontró varios tipos de alteraciones, incluyendo cambios emocionales y neurológicos”[31].

Por otra parte, el departamento de Chocó es considerado uno de los más ricos en metales preciosos de Colombia. En la época colonial, este fue foco de explotación minera de oro, mediante el uso de mercurio para lograr la amalgamación. “Empresas como The British Anglo Colombian Gold y US Granger Mining Company han sido generadoras de la gran contaminación en todo el departamento durante los siglos XIX y XX. Pero el deterioro se incrementó a inicios del 1980 con la explotación de aluvión, utilizando maquinaria amarilla como retroexcavadoras y bulldozers, la cual se extendió en todo el departamento, al pasar de extraer 3,1 toneladas de oro en el año 1990 a 27,9 toneladas en el año 2011 según información del Banco de la República y el DANE en el 2015. El 90% del oro extraído en el Chocó se origina en operaciones a “cielo abierto” o aluvial ilegal, el cual requiere la remoción de tierra, su posterior lavado con recursos hídricos que provienen del río y finaliza haciendo amalgamación con Hg líquido”[32].

[31] OLIVERO VERBEL, J. s.f. *Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana.* [En línea]. Colombia. [Citado el 2 de mayo de 2020] Disponible en: http://concienciaciudadana.org/wp-content/uploads/2017/06/Efectos-de-la-Miner%C3%ADa-en-Colombia-sobre-la-Salud-Humana-Jes%C3%BAs-Olivero-Verbel.pdf
[32] MINISTERIO DE SALUD. Op cit., p 6

Además, en el 2016 el Ministerio de Salud y Protección Social - MSPS el INS y la Universidad de Córdoba, mediante el desarrollo de un estudio bajo el convenio interadministrativo 407 de 2016, este consistió en la identificación de los efectos que se producen en la salud por exposición a mercurio en los departamentos y zonas priorizados por la presencia de minería aurífera y los impactos que genera; específicamente es en el departamento del Chocó donde se presentan estos hallazgos.

"El estudio incluyó 1.096 individuos de 11 municipios; el tiempo de exposición promedio al mercurio en sus trabajos fue 18 años. De los municipios que se estudiaron en los que se encontró una media total superior a los niveles admisibles para expuestos ambientales en los análisis de sangre, orina y cabello fueron: Medio San Juan, Tadó, Acandí, Riosucio, Carmen del Darién, Quibdó y Río Quito, respecto al límite ambiental establecido. Con respecto al límite admisible para expuestos ocupacionales, 519 personas (47,3 %) se clasificaron como individuo intoxicado por mercurio según el INS. Las personas fueron remitidas a sus lugares de atención médica, para ser conducidas a la ruta de atención en salud del MSPS-INS, y poder determinar el tratamiento médico requerido."[33].

El sector minero se considera un gran foco de contaminación, comprometiendo directamente la salud de la población causando enfermedades como cáncer, deterioro de órganos, alteraciones en el sistema nervioso, malformaciones en los fetos, intoxicación severas e incluso muerte. Todo esto se asocia directamente con la producción de residuos de la industria minera, y el uso del mercurio[34].

---

[33] MINISTERIO DE SALUD. *Op cit*., p 7

[34] MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. 2019. *Evaluación de los efectos en salud de la población vulnerable del territorio colectivo aires de Garrapatero, cuenca del río Cauca y microcuenca del río Teta Mazamorrero, expuesta a vertimientos contaminantes por explotación minera*. [En línea]. Colombia. [Citado el 3 de mayo de 2020]. Disponible en: https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_2_protocolo_de_estudio_de_la_propuesta.pdf

Para el departamento del Valle del Cauca, la concentración en el agua del río Cali es 2,5 veces el valor de la concentración permitida. Además, se encontró que los niveles de mercurio alcanzan concentraciones hasta 0,007 mg/L, en la cuenca alta del río Felidia (Cali), superando siete veces el umbral de 0,001 mg/L permitido para vertimientos de minería en cuerpos de agua según la Resolución 0631 de 2015[35].

Así mismo, en Buenaventura existen minas de oro, platino, carbón mineral, cobre, manganeso, diatomita y tierras refractarias; donde se constituye la reserva minera más grande de Colombia. Para esta zona se ha publicado poca información relacionada con estudios que comprueben la presencia de mercurio en ecosistemas costeros del Pacífico colombiano. Un informe del Centro de Control de Contaminación del Pacífico (CCP) indica que se han reportado niveles de mercurio en aguas de la Bahía de Buenaventura entre 0,05 - 0,85 ppb). En consecuencia, es importante evaluar las concentraciones de mercurio total en peces, agua y sedimentos de la bahía de Buenaventura y así conocer la calidad ambiental del ecosistema y los posibles riesgos indirectos sobre la población de la zona[36].

Debido a esta problemática, se han generado acciones que pretenden proteger las fuentes hídricas y la salud de las personas; un ejemplo de esto es el Convenio de Minamata de 2013 cuyo fin es: “proteger la salud humana y el ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y sus componentes”. Este fue aprobado por el Congreso de la Republica, correspondiente a la Ley 1892 de 2018 “por medio de la cual se aprueba el Convenio de Minamata sobre el

---

[35] OBSERVATORIO DE CONFLICTOS MINEROS DE AMÉRICA LATINA. 2018. *El preocupante hallazgo de mercurio en las aguas del río Cali.* [En línea]. Colombia. [Citado el 4 de mayo de 2020]. Disponible en: https://www.ocmal.org/el-preocupante-hallazgo-de-mercurio-en-las-aguas-del-rio-cali/

[36] DUQUE, G., COGUA, P. 2016. *Mercurio en peces de la bahía de Buenaventura.* Ingenium, 10(29) 11-17. [En línea]. Colombia. [Citado el 23 de abril de 2020]. Disponible en: https://repository.usc.edu.co/bitstream/20.500.12421/794/1/MERCUR~1.PDF

mercurio, el cual se hizo en Japón, específicamente Kuamoto en octubre de 2013." El Convenio impulsa los países a proteger mejor a las personas expuestas a los riesgos que tiene el contacto con el mercurio y enfatiza la necesidad de prestar servicios sanitarios adecuados para las personas que puedan verse afectadas por la exposición al mercurio[37].

[37] CANCILLERÍA DE COLOMBIA. *Convenio de Minamata sobre el mercurio*. [En línea]. Colombia 2017. [Citado el 1 de mayo de 2020]. Disponible en: https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2019/C-275-19.htm

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Con base en el problema anteriormente expuesto, se plantea la siguiente pregunta problematizadora.

¿Cómo prevenir y mitigar los impactos ambientales generados por los vertimientos de mercurio en las fuentes hídricas en Colombia?

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la contaminación a fuentes hídricas por metales pesados genera graves efectos a la salud, lo más común son problemas en el sistema nervioso central; la alteración y modificación de la red hídrica, debido principalmente a la actividad minera. Los entables mineros no solo afectan la zona donde es vertido, sino también aquellas ubicadas aguas abajo, llegando a zonas de intervención agrícola, de pesca y a fuentes de abastecimiento.

Debido a lo anteriormente mencionado, es de gran importancia focalizar las fuentes hídricas colombianas más afectadas y promover el uso de tecnologías que a lo largo del desarrollo tecnológico y científico han aparecido para disminuir la contaminación a causa de metales pesados, protegiendo la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones de mercurio.

En la industria colombiana el mercurio es utilizado en diversos sectores productivos, destacado la minería, esta es la actividad que genera el mayor impacto con los residuos que se generan producto de procesos como la amalgamación, esta es la etapa donde se extrae el oro, y los sobrantes son vertidos al agua y suspendidos en la atmosfera sin ningún tratamiento previo, ni control en pro del cuidado personal de las personas que realizan la actividad ni del medio ambiente.[38].

Es por ello, que esta investigación se desarrolla con el propósito de realizar un diagnóstico y presentar diferentes tecnologías que contribuyan a la solución de la problemática socio ambiental que se genera por el vertimiento de mercurio en las

[38] 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. [En línea] [Citado el 30 de noviembre de 2020] Disponible en: http://www.scielo.org.co/pdf/rfce/v24n2/v24n2a09.pdf

fuentes hídricas, para que se genere un ambiente sano para los seres vivos y se minimice el impacto antrópico hacia el entorno natural.

Con este documento se logrará la identificación de zonas vulnerables en el territorio nacional, estableciendo el grado de contaminación al que se encuentran expuestas las fuentes hídricas; esto es esencial para el diseño de programas, implementación de estrategias efectivas y fortalecimiento institucional con las Corporaciones Autónomas Regionales, teniendo en cuenta que estas juegan un papel importante en el cuidado, protección y conservación de los recursos naturales, en la prevención y mitigación de los impactos ambientales.

Económicamente, basta pensar en el costo de las tecnologías sustentables que pueden resultar de bajo costo y se recupera gran parte del área afectada, dentro de estas tecnologías se encuentran las fisicoquímicas, como la utilización de carbón activado granular, la desmercurizacion térmica y algunas técnicas de biorremediación donde se utilizan bacterias (biorremediación), hongos (microrremediación) y plantas (fitorremediación). Incluso Colombia, por su localización geográfica y las especiales condiciones del territorio por su gran número de vertientes, variedad de lagos, cantidad de ríos, su gran biodiversidad y extensas zonas marinas y continentales, se ve en la necesidad de establecer acciones de preservación y la puesta en marcha de alternativas para la disminución de los riesgos que se puedan presentar.

Además, se busca dar cumplimiento a la Ley 1892 de 2018 que se refiere al Convenio de Minamata sobre el mercurio que pretende priorizar la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y sus compuestos, también a la Resolución 0631 de 2015 “que establece valores límites máximos permisibles de los parámetros de interés para vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado”.

En síntesis, este documento pretende que, mediante la formulación de estrategias de prevención y mitigación de impactos ambientales a causa de los vertimientos de mercurio a las fuentes hídricas en Colombia, se brinden soluciones para la descontaminación de las fuentes hídricas y disminuir los problemas de salud en las personas que de alguna u otra forma incorporan el mercurio (Hg) en su organismo.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Formular estrategias de prevención y mitigación de impactos ambientales a causa de los vertimientos de mercurio a las fuentes hídricas en Colombia.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un diagnóstico de las fuentes hídricas afectadas por vertimientos de mercurio en Colombia.

- Determinar los impactos y efectos sobre el ambiente a causa de la contaminación por mercurio referente a la actividad minera en Colombia.

- Evaluar tecnologías sustentables para la disminución de impactos ambientales causados por el mercurio en las fuentes hídricas colombianas

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. MARCO HISTÓRICO

El mercurio se encuentra presente en las fuentes hídricas por medio de actividades productivas que generan residuos, un ejemplo es la minería, la industria química, metalúrgica, entre otras. En la naturaleza, se encuentra en procesos geológicos como la meteorización, la erosión, la lixiviación y la actividad volcánica[39].

En la cultura popular, la intoxicación por mercurio ha sido relacionada con el Sombrerero Loco, un personaje del libro "*Las aventuras de Alicia en el país de las maravillas*". En el siglo XIX, en Inglaterra los obreros de la industria de sombreros presentaban frecuentemente afectaciones neurológicas tales como depresión, temblores, irritabilidad, dificultad en el habla y timidez. Por lo cual se estableció que al estar expuestos a Nitrato de mercurio, que es compuesto químico usado en esa época para confeccionar sombreros de fieltro, era la causa de esos síntomas. Se cree que los trabajadores intoxicados dieron origen a la expresión <<mad as a hatter>> [más loco que un sombrerero] y de ahí se inspiró el personaje del Sombrerero Loco"[40].

La exhibición de trabajadores al mercurio no ha sido un problema antiguo; En la actualidad es un problema vigente para trabajadores de industrias como la minera con la extracción y refinación de oro, plata, plomo, cobre y níquel; la producción de cloro-álcali, la fabricación de termómetros, lámparas fluorescentes y baterías y en el campo de la odontología. Siendo la minería la actividad donde se presenta la

[39] CORPORACIONES AUTONOMAS REGIONALES; CORPORACION DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y AUTORIDADES AMBIENTALES URBANAS. 2018. *Plan de acción sectorial del mercurio*. [En línea]. Colombia. [Citado el 21 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/PLAN_NACIONAL_AMBIENTAL_MERCURIO.pdf

[40] WEINBERG, J.2007. *Introducción a la contaminación por mercurio para las ONG*. IPEN. p. 14

mayor exposición, donde el uso del mercurio puede ser controlado o no controlado en lo absoluto y como resultado de esto, los mineros y quiénes los rodean pueden estar altamente expuestos[41].

En consecuencia, la presencia de metales pesados y sustancias orgánicas complejas, entre otras en las fuentes hídricas, se consideran las causantes de algunas situaciones de impactos negativos sobre los ecosistemas acuáticos y la salud pública en general[42].

Un caso en particular y muy sonado fue el ocurrido en la Bahía de Minamata en Japón, este lugar siempre fue poblado por aldeas pesqueras, con el paso de la industrialización la empresa química Chisso, se instaló cerca de esta bahía, y utilizaba Sulfato de mercurio y Cloruro de mercurio como catalizadores en la producción de acetaldehído y de cloruro de vinilo. Los vertimientos de la planta eran descargados en la fuente hídrica mencionada anteriormente y contenían mercurio inorgánico y metilmercurio. El metilmercurio se bioacumuló en los peces y mariscos de la bahía y en la gente local que comía pescado y mariscos. El resultado de esta contaminación fue un tipo de envenenamiento por mercurio que actualmente se conoce como la: “enfermedad de Minamata”[43].

“Luego en abril de 1956 una joven habitante de Tsukinoura (Minamata) fue internada en el Hospital por incapacidad para comer y hablar y quejándose de un severo adormecimiento de sus extremidades. Debido a la gravedad, las directivas del hospital informaron de un caso grave de desorden cerebral de origen

[41] WEINBERG. *Op. cit*., p. 14
[42] LUNA, K. 2019. GESTIÓN DE RIESGO QUÍMICO Y ELABORACIÓN DEL MANUAL DE MANEJO SEGURO DE CLORO GAS PARA LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LA CIUDAD DE IBARRA EMAPA-I. Tesis de grado Ingeniero Industrial. Ecuador: Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. 106 p.
[43] WEINBERG. *Op. cit.,* p. 22-23

desconocido Tsukinoura al Centro de Salud de Minamata. Esta notificación es la prueba oficial de la Enfermedad de Minamata”[44].

Esta enfermedad es un grave padecimiento, de carácter definitivo y comúnmente mortal debido a los elevados niveles de metilmercurio. “Entre los años 1956 y 1959 se estableció la relación con la exposición tóxica prenatal debido a las altas dosis de metilmercurio en los peces y mariscos consumidos. Pasaron alrededor de 50 años hasta lograr consenso científico sobre los mecanismos de la enfermedad, la relación causa/efecto y la vulnerabilidad del sistema nervioso en desarrollo y a partir de este conocimiento, se aplicaron medidas de intervención para contrarrestar de la fuente de contaminación. Para el año 2009 se identificaron 2.271 víctimas y más de 10.000 afectados. Durante la 54° ceremonia que conmemora lo sucedido en Minamata, el Primer Ministro japonés ofreció disculpas por no haber intervenido de manera oportuna la situación, y se comprometió con la creación de un convenio internacional para prevenir el envenenamiento por Hg y propuso llamarlo “Convenio de Minamata2”[45].

Los principales síntomas se manifiestan en trastornos sensoriales, ataxia, contracción concéntrica del campo visual, y desordenes auditivos. Por ejemplo, si una madre es expuesta a altos niveles de metilmercurio durante su embarazo, el bebé puede sufrir de la Enfermedad de Minamata fetal. Esta no solamente es un tipo de daño a la salud provocado por la contaminación ambiental, sino que también causó problemas importantes a la naturaleza y la sociedad local en general en las zonas afectadas por la contaminación[46].

---

[44] MINISTERIO DEL AMBIENTE DE JAPÓN. 2013. *Enseñanzas de la Enfermedad de Minamata y el Manejo del Mercurio en Japón. [Citado el 21 de octubre de 2020]. Recuperado de: https://www.env.go.jp/chemi/tmms/pr-m/mat01/es_full.pdf*

[45] IPEN. *s.f.* Enfermedad de Minamata. [Citado el 20 de octubre de 202] Recuperado de: https://ipen.org/sites/default/files/documents/Numero%20Once%20Enfermedad%20de%20Minamata.pdf

[46] IPEN. *Op. cit*.

En Colombia, gran parte de la bahía de Cartagena se contaminó con mercurio por los vertimientos de la empresa Álcalis de Colombia desde 1971, para el año 1993 esta fue cerrada, según los estudios de Pilar Cogua de la Universidad Nacional de Colombia, y aún existe presencia de dicho metal en este cuerpo de agua[47].

Además, algunas fuentes de agua en el Departamento de Bolívar se han afectado por el mercurio usado en la minería, y en localidades de ese departamento como Achí, La Raya y Montecristo se detectaron niveles de mercurio en el organismo humano más altos que los permitidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos; esta situación ha causado que en algunos de esos sitios existan muchos niños con labio leporino y retardo mental además de otros problemas que se originan por consumir pescado contaminado con mercurio[48].

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. Contaminación por metales pesados

La presencia de metales en el ambiente se da por vía antropogénica y natural y se movilizan entre el agua, el aire y el suelo. Estos son persistentes y una vez que ingresan en los organismos acuáticos, se transforman a través de procesos biogeoquímicos y se intercambian en varias especies con características físico-químicas distintas con tamaños que van desde material particulado (>0,45 µm), coloidal (1 nm-0,45 µm) y especies disueltas (=1 nm)[49].

Las partículas coloidales y particuladas, de carácter orgánico e inorgánico juegan un papel clave en la coagulación, la sedimentación y adsorción, que influyen en

[47] INNOVA. 2017. *La historia del desastre de Minamata.* [Citado el 23 de octubre de 2020]. Recuperado de: https://www.innovaambiental.com.co/la-historia-del-desastre-en-minamata/
[48] *Ibíd.*
[49] MARTORELL J.J. 2010. *Biodisponibilidad de metales pesados en dos ecosistemas acuáticos de la costa Suratlántica andaluza afectados por Contaminación difusa.* Tesis Doctoral Universidad de Cádiz.

los tiempos de residencia y en el transporte de los metales trazas. La ingesta de alimentos y la inhalación de sus vapores, son dos de las causas más sobresalientes de contaminación[50].

De acuerdo a la tabla periódica los metales pesados son considerados como elementos químicos con alta densidad (mayor a 4 g/cm^3), masa y peso atómico por encima de 20 y son tóxicos en concentraciones pequeñas. Algunos de estos elementos son el Aluminio, Berilio, Cobre, Hierro, Manganeso, cadmio, mercurio, plomo, entre otros[51].

Actualmente uno de los mayores problemas a nivel ambiental es la contaminación de las fuentes hídricas del mundo por metales pesados, ya que es debido a la toxicidad que presentan los metales pesados en el agua de los ríos, que son considerados como un serio problema para los habitantes de las poblaciones que se abastecen de dichos ríos en especial si se considera que el incremento en la concentración de estos metales en las fuentes hídricas procede de las diversas actividades antropogénicas, elevando además los efectos potencialmente nocivos sobre los diferentes sistemas ecológicos y el ambiente, los cuales son el soporte de la vida humana lo cual acarrea serios problemas a nivel económico tanto a nivel local como nacional debido al aumento en los costos de los tratamientos médicos y una disminución en la productividad de los habitantes de la zona[52] [53].

La generación de efectos tóxicos varían de acuerdo al tipo de metal, concentración y en algunos casos de la edad de la población exhibida. En estudios realizados se evaluó la contaminación de metales pesados en alimentos como la carne y leche,

---

[50] REYES, Y. et al. *Op. cit.*

[51] LONDOÑO, L. et al. 2016. *Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal," Biotecnología* en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial, vol. 14, no. 2, p. 145.

[52] CONTRERAS, J. et al. 2004. *Determinación de metales pesados en aguas y sedimentos del río Haina.* Cienc. Soc., vol.29, no. 1, pp. 38–71.

[53] CARTAYA, O. et al 2008. *Cinética De Adsorción De Iones Cobre (II) Por Una Mezcla De Oligogalacturónidos*. Rev. Iberoam. Polímero Vol. Iberoam. Polim, vol. 9, no. 95, pp. 473–479

y se encontraron residuos de cadmio, mercurio, plomo y arsénico[54]. La fuente de contaminación y su incorporación en la cadena alimenticia se ilustra en la gráfica de la figura 6.

Figura 6. Fuentes de contaminación por metales pesados en aire, suelo, agua y planta

Fuente: REYES, Y. et al. 2016

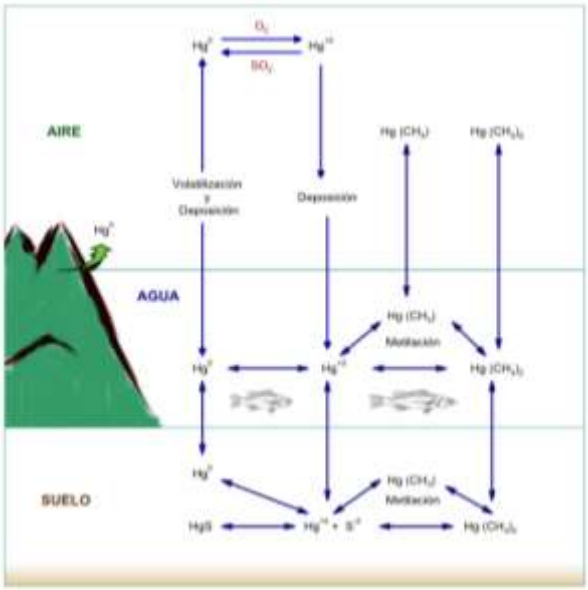
4.2.2. Mercurio (Hg)

Elemento natural cuyo símbolo químico es (Hg). Esta abreviatura viene de la palabra griega *hydrargyrum*, que significa plata líquida[55]. Además, es el único elemento metálico líquido a una temperatura ambiente. Tiene un brillo similar a la plata y cuando se encuentra a 25°C posee una densidad de 13,456 g/ml. A los 20°C la presión de vapor es de 0,00212 mm Hg, lo que ocasiona que un recipiente abierto con mercurio metálico y expuesto en un ambiente cerrado, se desprenda vapor suficiente para inundar la atmósfera y superar los límites máximos seguros

[54] REYES, Y. et al. *Op. cit.*
[55] WEINBERG. *Op. cit.,* p. 9

de exposición ocupacional[56]. En la figura 7 se presenta el ciclo biogeoquímico del mercurio.

Figura 7. Ciclo biogeoquímico del mercurio



Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Año 2012

El hecho de que estos metales se encuentren en los diversos ecosistemas es de preocuparse, dado que muchos seres vivos dependen del adecuado equilibrio en su lugar de alimentación o de vivienda, el cómo llegan dichos metales a los distintos ecosistemas varía según el tipo de actividad que se desarrolla por el hombre, por ejemplo el cromo que es un compuesto ampliamente usado en la industria en áreas como el revestimiento plástico, galvanoplastia de metales para resistencia de la corrosión, curtido y acabado de cueros, en pigmentos y para conservantes de madera[57], otro tipo de metales

[56] CANO, S. 2012. *Contaminación con mercurio por la actividad minera*. En: Biomédica, INS. Bogotá, D.C. Vol. 32. No 3. p. 1

[57] MOHAN, D. et al. 2006. *Trivalent chromium removal from wastewater using low cost activated carbon derived from agricultural waste material and activated carbon fabric cloth*," J. Hazard. Mater., vol. 135, no. 1–3, pp. 280–295

como el cadmio son usados en la industria para la fabricación de baterías de níquel-cadmio, agentes anticorrosivos y pigmentos[58].

Se han identificado seis fuentes de contaminación por mercurio: "la deposición atmosférica, erosión, descargas humanas, materiales agrícolas, minería y las descargas industriales y de combustión. Como tal, en las aguas subterráneas naturales y aguas superficiales el contenido de este metal está por debajo de 0,5 µg/L, sin embargo en aguas residuales descargadas cerca de depósitos minerales locales y otros sitios contaminados la concentración de mercurio es mucho mayor"[59].

Este elemento se encuentra en combustibles fósiles, minerales metálicos y otros minerales. Por ejemplo, cuando es quemado el carbón, gran parte de su contenido genera un contacto con el ambiente. Además, cada vez que la población genera y utiliza mercurio de forma intencional, se volatiliza en la atmósfera. Actualmente, su mayor uso intencional corresponde a la minería artesanal y de pequeña escala. Al mismo tiempo los componentes de mercurio en ocasiones se usan como catalizadores o alimentadores en la fabricación de productos químicos y en otros procesos industriales[60].

Para el caso de la minería, el mercurio es utilizado para apartar y extraer el oro de las rocas o piedras en las que se localiza, fijándose al oro lo cual genera una amalgama que agiliza la separación de la roca, arena u otro material. Luego se genera calor a la amalgama para que se evapore el mercurio y quede el oro. De

---

[58] AL HAMOUZ, O. et al. 2017. *Removal of cadmium ions from wastewater by dithiocarbamate functionalized pyrrole based terpolymers,* Sep. Purif. Technol., vol. 177, pp. 101–109

[59] Wu, C. et al. 2016. *Removal of trace-amount mercury from wastewater by forward osmosis.* J. Water Process Eng., vol. 14, pp.108–116.

[60] WEINBERG. *Op. cit.,* p. 10

ahí surge que la minería artesanal es, por sí sola, la mayor fuente de liberación intencional de mercurio del mundo[61].

Pese a que el mayor efecto negativo de la exhibición al metal no solo se presenta en los vapores del mismo durante el proceso de amalgamación, este también surge al realizar el aclarado del oro donde es liberado una parte del mercurio en el agua que no se recupera y es de esta forma, llega el mercurio a la atmósfera, ríos y suelo donde, según su forma química puede ser metilado, convirtiéndolo en metilmercurio, (MeHg). El metilmercurio es una forma de mercurio que se acumula en las aguas, es una de las formas más tóxicas del metal y se forma cuando las bacterias reaccionan con el mercurio en agua, tierra o plantas penetrando fácilmente las membranas celulares, además, posee la capacidad de biomagnificarse en la cadena trófica acuática donde están los peces que se alimentan de otros y son consumidos por la población, con lo que se origina un riesgo de que aparezcan efectos nocivos en la salud, debido a la exposición crónica al metilmercurio de los que consumen el pescado contaminado[62].

Además, el mercurio se ha posicionado como uno de los metales con altos índices contaminación, generando efectos sobre la salud pública, debido a que las personas o poblaciones expuestas a niveles pequeños pueden presentar alteraciones en las funciones del sistema nervioso central, el cual es muy sensible al metilmercurio, con consecuencias neurofisiológicas particularmente en el desarrollo de los fetos y en los niños pequeños[63].

4.2.2.1. Afectación del mercurio (Hg) en la Fauna

El Hg se biomagnifica casi totalmente por los peces en forma de (MeHg),que es una sustancia altamente tóxica y que se fija fácilmente en los tejidos musculares y

[61] CANO. *Op. cit.*, p. 2
[62] MINISTERIO DE SALUD. *Op. cit.*
[63] MANCERA, N. *Op. cit.* p. 2

adiposos, para transportar el metal en las cadenas alimentarias acuáticas que terminan siendo consumidas por el hombre. Este normalmente es acumulado en sedimentos al fondo de los ríos, donde los microorganismos que habitan y lo convierten a la forma orgánica (MeHg), siendo absorbido y fijado por la biota que vive en los sedimentos. [64].

De acuerdo a un informe de la EPA, se ha identificado metilmercurio en águilas, nutrias y panteras en el estado de la Florida siendo estos, animales en vía de extinción, los análisis encontrados en el informe proponen que algunas especies de la fauna silvestre que se hallan altamente expuestas, están siendo afectadas por (MeHg). Los efectos de la exposición al metilmercurio pueden incluir la muerte, reducción de la fertilidad, crecimiento tardío, desarrollo y pautas de conducta anormales afectando la supervivencia. Además, los niveles de metilmercurio encontrados pueden alterar el sistema endocrino de los peces y esto puede causar un impacto negativo en su desarrollo y reproducción[65].

4.2.2.2. Afectación del mercurio (Hg) en el aire

El límite máximo permisible de mercurio inorgánico en el aire según la resolución 2254 de 2017 “es de 1 µg/m^3 para un tiempo de exposición anual”. No obstante, el valor máximo permisible de mercurio fluctúa en cada región dependiendo del uso del mercurio en actividades industriales o mineras. Se estima que la minería de aluvión en Buenaventura libera hacia la atmosfera, hacia el suelo y hacia el agua 15,5 gramos de mercurio por cada gramo de oro recuperado. En el año 2011 se estimó que en el departamento la producción de 200,6 kg de oro había generado una emisión hacia la atmósfera y una liberación hacia el suelo y el agua de 1.505,3 kg de mercurio. En promedio, la emisión atmosférica y liberación a suelo y

[64] MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. 2015. *Evaluación de riesgo de mercurio en peces de aguas continentales en Colombia*. Bogotá, D.C. p. 10
[65] WEINBERG. *Op. cit*., p. 20-21

agua de mercurio es de 7,05 gramos de mercurio por cada gramo de oro recuperado[66].

4.2.2.3. Afectación del mercurio (Hg) en el suelo

En diversos estudios se han reportado niveles del elemento en suelo superficial por diferentes fuentes tales como la industria y la minería. Siendo las actividades producidas por el hombre las que provocan mayor contaminación. Muchos factores ambientales interfirieren en el proceso de adsorción/desorción del mercurio, entre ellos especiación de Hg, pH del suelo, iones cloruro, contenido de materia orgánica, forma y contenido de coloides en el suelo, u iones inorgánicos competitivos. Las principales fuentes naturales de mercurio en el suelo y en los ambientes acuáticos son el cinabrio (HgS) y mercurio elemental (Hg°). Dependiendo de las condiciones redox, el Hg inorgánico puede aparecer en varios estados: Hg_2^{2+}, Hg° y Hg^{2+}. Los dos últimos se encuentran normalmente en el suelo[67].

4.2.2.4 Contaminación por mercurio en zonas específicas de Colombia

De acuerdo al estudio al INS en un estudio realizado en 2015, sobre el mercurio en peces de aguas continentales en Colombia, “se evidencia contaminación por Hg en peces provenientes de zonas dedicadas a la minería de oro. Los vertimientos informales, botaderos a cielo abierto, de escorias minerales, explotaciones auríferas ilegales y rellenos sanitarios clausurados son las zonas con mayor contaminación y se reportan concentraciones hasta de 4.500 ppm de Hg, los municipios más afectados se encuentran en el cuadro 1.

[66] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Resolución 2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.*
[67] ROCHA-ROMAN, L. et al. *Op. cit*., p 3

Cuadro 1. Municipios contaminados por vertimientos de mercurio

ZONA	MUNICIPIOS
Bajo Cauca y Norte de Antioquia	Remedios, Segovia, Bagre, Zaragoza, Cáceres y Caucasia.
Sur de Bolívar	San Pablo y San Martin de Loba
Sur de Córdoba	Monte Líbano, Ayapel
Santander	Vetas y California
Cauca	El Tambo y Suarez
Occidente de Nariño	Distrito la Llanada, Guachavez, Sotomayor, Samaniego y Barbacoas
Valle del Cauca	Ginebra y Zaragoza

Fuente: Ministerio de Salud y Protección Social.

Se conoce sobre la presencia de elevadas concentraciones de Hg en la fauna acuática de los embalses del país y en zonas de inundación y sedimentación como: la Depresión Momposina, la Mojana, desembocaduras de ríos Patía, San Juan y Atrato. En cuanto a zonas de producción industrial las afectaciones se presentan en el sector de Mamonal en Cartagena por una planta de cloroálcali, en el corregimiento de Samaria del municipio de Filadelfia, una mina clausurada de Hg y en La Calera en una planta de cemento clausurada”[68].

Guillermo Duque y Pilar Cogua, investigadores de la Universidad Nacional de Palmira, afirmaron que se encontraron altas concentraciones de mercurio en cinco especies de peces de consumo masivo en la Bahía de Buenaventura. Los resultados del estudio realizado en el año 2009 indicaron que la mayor concentración de mercurio se encontró en el pez ronco, con un valor de 0,62 µg/g de músculo. Le sigue la mojarra con 0,36 µg/g y la corvina con 0,21 µg/g”. Las otras especies con acumulación de mercurio son la lisa y el ñato. Estas especies

[68] MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. *Op. cit*., p. 19

representan un riesgo para el consumo humano debido a que sobrepasan el límite permitido por la OMS de 0,2 µg/g[69].

De acuerdo al estudio realizado en el corregimiento de Zaragoza – Buenaventura para cuantificar la bioacumulación de mercurio en larvas de anuros. Las muestras las recolectaron en dos puntos cercanos al río Dagua y en el corregimiento de Pianguita durante 6 meses. Las especies de anuros analizadas fueron *Lithobates vaillanti (Ranidae), Rhinella margaritifera, R. marina (Bufonidae), Hypsiboas rosenbergi y Smillisca phaeota (Hylidae*). Los resultados obtenidos indicaron que "las concentraciones de mercurio encontradas en la zona (…) en promedio fueron de 0,1569 (± 0,007) µg/g en los renacuajos y de 0,0609 (± 0,001) µg/g en los sedimentos correspondientes"[70].

El problema de contaminación con mercurio en el rio Amazonas se considera bastante grave, esto se debe a la producción de oro y petróleo. La minería del oro es considerada una actividad de bastante importancia en la economía de los países amazónicos como Colombia, Brasil, Guyana, Perú y Surinam. Estos producen 400 toneladas métricas de oro por año, lo que representa casi el 10% de la demanda mundial de oro. Lo que representa una cifra cercana a 12 mil millones de dólares anuales. En el proceso de extracción del oro, sea legal o ilegal, es imprescindible, la utilización de Hg; en una operación eficiente, se requiere de un kilogramo de mercurio para aglutinar un kilogramo de oro, mientras que, en una ilegal, pueden llegar a utilizarse 50 unidades de mercurio por una sola unidad de

[69]DUQUE, G Y COGUA, P. 2015. *Impactos ambientales generados por el uso de mercurio en la minería aurífera ilegal. Caso de estudio: Valle del Cauca*. Universidad del Valle. [En línea]. Santiago de Cali. [Citado el 23 de abril de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/282219805_Impactos_ambientales_generados_por_el_uso_del_mercurio_en_la_mineria_aurifera_ilegal_Caso_de_estudio_Valle_del_Cauca

[70] ACOSTA, D. *Op. cit*

oro. Donde se estima que la operación ilegal constituye el 15 % de la producción de la región[71].

Las emisiones de mercurio que provienen de la MAPE en el Amazonas representan casi un 71%; excediendo las 200 toneladas métricas cada año[72]. La producción de estas emisiones, también son difundidas por la fauna que vive en el río. Es el caso del pez Bagre dorado, que es una especie única en esta región, migra a lo largo de todos los países amazónicos; consumiendo presas contaminadas y siendo multiplicador de la contaminación. Los pescadores llevan estos pescados a los mercados y así se aumenta el espectro de peligro para humanos, debido a su consumo.[73].

La práctica de minería aurífera ilegal en el Valle del Cauca coloca en manifiesto el conflicto del uso del suelo como área de explotación. En el corregimiento de Zaragoza (Buenaventura), la "remoción de grandes volúmenes de capa vegetal y material orgánico ha provocado resecamientos en zonas aledañas. (…) Como consecuencia de lo anterior se ha disminuido la productividad agrícola y los rendimientos agropecuarios"; lo anterior se evidenció en la destrucción de "áreas de inundación y vegas de cultivo de pan coger". El muestreo realizado por el IDEAM durante el período 2007 – 2011 permitió determinar que entre los tributarios del río Cauca, el Canal Navarro (Cali), Cerrito (El Cerrito) y Guachal (Palmira) presentaron valores de alarma por alta concentración de mercurio en sus sedimentos. Igual resultado obtuvieron en tramos del río Cauca analizados en los municipios de Candelaria, Yumbo y Yotoco. En el 2011, la mayor carga de mercurio presente en sedimentos se encontró en Juanchito – Candelaria con 3,2

---

[71] REPORTE DE LA WWF. 2018. *Ríos Sanos, Gente Sana. Abordando la crisis del mercurio en la Amazonía.* [En línea] [Citado el 3 de mayo de 2020]. Disponible en: http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/wwf___rios_sanos_gente_san a_3.pdf

[72] ARCTIC MONITORING AND ASSESSMENT PROGRAMME, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. 2013. *Technical background report for the global mercury assessment.*

[73] REPORTE DE LA WWF. *Op cit*.

kg/día. Muy probablemente, el aumento de las cargas de sedimentos en el rio Dagua, producto de la explotación minera aurífera, haya generado impactos en la Bahía de Buenaventura[74].

4.2.3. Minería

Las dinámicas globales actuales obedecen al modelo capitalista de producción a gran escala, que se refiere a la acumulación, derroche y despojo. Este modelo, soportado en el necesario consumo de productos, bienes y servicios que se ha ido extendiendo con el auge de la tecnología, el crecimiento poblacional y las necesidades que crea el sistema productivo. Todos estos productos requieren de diversos recursos naturales para su producción, y para lograr satisfacer la demanda se ha recurrido a la explotación de múltiples territorios llevando a una destrucción sin precedentes[75].

La Convención de Minamata sobre el mercurio es sus comienzos se planteó como una iniciativa de la ONU con el fin de disminuir la contaminación global por el metal, en esta reunión se logró definir la MAPE como la extracción de oro llevada a cabo por población que cuentan con limitado capital de inversión y producción. Por lo general, la MAPE se manifiesta como una actividad informal donde los trabajadores no están documentados, ni regulados por las autoridades competentes. Como resultado de ello, a menudo trabajan ilegalmente en tierras privadas o protegidas. Estas operaciones a pequeña escala hacen uso limitado de herramientas mecánicas y mejores prácticas modernas, lo que conduce a una baja productividad, pobre calidad de la producción, estándares mínimos de seguridad, y un bajo cumplimiento de los estándares de protección ambiental[76].

---

[74] ACOSTA. *Op cit*., p 5
[75] LA ROTTA, A; TORRES, M. 2017. *Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá.* RIO DE JANEIRO, V. 41, N. 112, P. 77-91, JAN-MAR 2017
[76] WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2016. *Environmental and occupational health hazards associated with artisanal and small-scale gold mining*.

Siendo las operaciones a pequeña escala las responsables del 15 % de la producción aurífera en los países amazónicos, y el sector podría estar empleando a alrededor de 1,5 millones de individuos. Preferentemente, los mineros son miembros de comunidades rurales y de bajos ingresos que buscan medios de vida confiables para sí mismos y sus familias. Pese a los riesgos que existen, los miembros de las comunidades asentadas allí se sienten atraídos hacia este trabajo debido a la expectativa de generar mayores ingresos de lo que otras industrias locales podrían ofrecerles.[77]

4.2.4. Tecnologías y técnicas ambientales utilizadas para la remoción del mercurio

4.2.4.1. Técnicas fisicoquímicas para recuperación de ecosistemas afectados por mercurio

4.2.4.1.1. Carbón activado granular (CAG)

El CAG es una de las técnicas fisicoquímicas de remoción de metales pesados más utilizadas actualmente. Para hacer eficiente este proceso deben tenerse en cuenta las características del sólido como son: tamaño del poro, capacidad de intercambio iónico y área superficial. Además, influyen la geometría de la columna utilizada, altura de lecho del adsorbente, velocidad de flujo y la naturaleza del drenaje)[78].

4.2.4.1.2. Destilación del mercurio

Consiste en cargar de manera continua el material a tratar en un tambor de acero que de acuerdo con el residuo a tratar, puede tener varias bocas de entrada. Lo que se hace es la vaporización del mercurio calentando hasta 700°C y posteriormente el Hg va al sistema de enfriamiento para condensar sobre una

[77] REPORTE DE LA WWF. *Op cit.*
[78] ROJAS, H. et al. 2012. *Aplicación del modelo de Bohart y Adams en la remoción de mercurio de drenajes de minería por adsorción con carbón activado*. Información tecnológica. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000300004&script=sci_arttext

camada de mercurio líquido. Su recuperación el 99,99 % y se enfrían los subproductos obtenidos para su posterior manejo[79].

4.2.4.1.3. Desmercurización térmica

Este proceso se efectúa en "*batch"* sin generar agitación y con una temperatura aproximada de 500°C y con un vacío de 300 g/cm^2. Consiste en utilizar bandejas dentro de un recipiente las cuales son calentadas para evaporar el mercurio, extraerlo al vacío y luego se condensa[67].

4.2.4.1.4. Encapsulación del mercurio

El objetivo de esta tecnología es inmovilizar el residuo para evitar el contacto con agentes lixiviantes como el agua. Se presenta de dos formas: <<la microencapsulación y la macroencapsulación>>, la primera se trata de una mezcla de despojos con el material antes de hacer la solidificación y en la segunda, se vierte el material sobre los residuos utilizando fosfato cerámico como material de encapsulamiento.[80].

4.2.4.1.5. Precipitación Química

En este proceso se realiza el aumento del pH en las aguas residuales mediante la añadidura de productos químicos alcalinos. En el cual el medio alcalino generado precipita los metales pesados como hidróxidos que a su vez son separados de la

---

[79] GEYMONAT, E. 2011. *Manejo Racional de Productos con mercurio*. Disponible en: http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/Tratamientot%C3%A9rmico-para-la-recuperaci%C3%B3n-de-mercurio-Diciembre-2011.pdf

[80] BERRIO, L. et al. 2012. *Sistemas De Tratamiento Para Residuos Líquidos Generados En Laboratorios De Análisis Químico.* Gestión y Ambiente, 15(3), 113- 124. Recuperado de: https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36285/43153

disolución[81]. Aquí se genera una gran cantidad de lodos, por lo que aumenta el costo del tratamiento, y no hace tan rentable su aplicación[82].

4.2.4.1.6. Ósmosis Inversa (RO)

En los sistemas de descontaminación de agua, se aplica presión hidrostática a la disolución concentrada para disminuir la presión osmótica, de manera que los compuestos son retenidos por la membrana y el agua pasa a través de ésta. Aquí se utiliza una membrana densa, normalmente de acetato de celulosa o de poliamidas aromáticas, cuyo espesor debe ser relativamente elevado para que soporte las elevadas presiones a las que es sometida[83]. Esta técnica puede remover hasta un 99,5%[84].

4.2.4.2. Técnicas de biorremediación para ecosistemas afectados por mercurio

La biorremediación es una gran alternativa, económica y de fácil aplicación teniendo en cuenta la baja accesibilidad en recursos para estos fines. Se utilizan organismos para la recuperación de las condiciones naturales de ecosistemas afectados por contaminantes.[85].

4.2.4.2.1. Atenuación natural

---

[81] SRIVASTAVA, S., & GOYAL, P. 2010. *Novel biomaterials: decontamination of toxic metals from wastewater: Springer Science & Business* Media.

[82] BUSTAMANTE, E. 2011. *Adsorción de metales pesados en residuos de café modificados químicamente*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en http://eprints.uanl.mx/*2323/1/1080223849.pdf*

[83] IZQUIERDO, M. 2010. *Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso*

[84] TOVAR, C.et al. 2012. *Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión.* Ingenium, 6(14), 11-21.

[85] BENITEZ, Y. 2017. *Estado del arte en métodos 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. Disponible en: http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1785/Yeison%20Javier%20Benitez%20Caicedo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Se utiliza para detener la propagación de la contaminación por derrames químicos, reduciendo la concentración y carga contaminante en sitios afectados. Algunos procesos que se incluyen en esta técnica son: la degradación biológica, volatilización, dispersión, dilución, degradación radioactiva y sorción de los contaminantes en la materia orgánica y minerales de arcilla del suelo[86].

Se logra una disminución en la concentración del contaminante presente en el ambiente, mediante procesos biológicos propios del ecosistema, reacciones químicas por ejemplo: transformación abiótica, intercambio iónico y complejación o por medio de procesos físicos como dispersión, dilución, difusión, volatilización, advección y sorción/desorción[87].

4.2.4.2.2. Biosorción

Interactúan microorganismos utilizando biomasa sea viva o muerta, con el fin de retirar o inmovilizar iones metálicos en un medio sólido o líquido a través de mecanismos físicos y químicos como la adsorción y el intercambio iónico.[88].

4.2.4.2.3. Degradación enzimática

Consiste en la producción de enzimas en bacterias modificadas genéticamente. Las cuales son empleadas en el sitio contaminado con el fin de degradar contaminantes[89].

---

[86] MULLIGAN, CN & YONG & RN. 2004. *Natural attenuation of contaminated soils*. Environmental International, vol 30. pp. 587-601.

[87] CORONA, L., & ITURBE, R. 2005. *Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos*. Redalyc, 119-126. Disponible en: http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2005.06n2.008

[88] 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/

[89] DI PAOLA, M., & VICIÉN, C. (S.F.). *Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación.* Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/262935161_Biorremediacion_vinculaciones_entre_investigacion_desarrollo_y_legislacion

4.2.4.2.4. Remediación microbiana

Aplicación de microorganismos inoculados, evaluando sus condiciones y capacidades y acorde al resultado se estimula el medio con nutrientes como nitrógeno y fosforo para agilizar el proceso[90].

4.2.4.2.5 Fitorremediación

Es una aplicación natural *in situ* o *ex situ*, donde se usan plantas o microorganismos para absorber, estabilizar, acumular o volatilizar contaminantes como metales pesados, metales radiactivos, compuestos orgánicos o hidrocarburos.[91].

---

[90] *Ibid*.

[91] DELGADILLO, A. et al. 2011. *Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación*. Tropical an subtropical agroecosystems. Recuperado: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870- 04622011000200002&script=sci_arttext#t3

4.3. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presentan algunos casos de estudio e investigaciones relacionadas al uso de tecnologías y técnicas para la descontaminación del mercurio; algunos impactos generados en los ecosistemas por su vertimiento y uso.

Cuadro 2. Estudio de caso 1

TITULO DE ESTUDIO: DETERMINACIÓN DE MERCURIO EN TEJIDOS VEGETALES POR MICROPIXE: APLICACIÓN AL ESTUDIO DE LA HIPERACUMULACIÓN POR *SPIRODELA INTERMEDIA (Lemnaceae).*		
AUTORES: • Emmanuel M. de la Fournière • Nahuel A. Vega • Nahuel A. Müller • Ramón A. Pizarro • Mario E. Debray	**AÑO:** 2019	**PAÍS DE ORIGEN:** Argentina
OBJETIVOS:		
Utilizar un microorganismo acuático (*Spirodela intermedia)*, para remover Hg^{2+} en agua mineral, en condiciones de laboratorio por mapeo barriendo con una micro sonda nuclear.		
DESCRIPCION:		
En este estudio se utilizaron concentraciones de Hg^{2+} de 1 y 10 mg/L, en un tiempo de menos 2 de semanas. Donde se analizaron los parámetros del proceso como: tasa de captación, factores de bioconcentración (BCfis) de mercurio en frondes, raíces y factores de translocación (Tfis), estos son calculados a partir de cuantificaciones de microPIXE por medio de un acelerador Tandar de Buenos Aires.		
RESULTADOS:		
El Hg^{2+} se concentra rápidamente en las raíces de *S. intermedia*. Cuando esta es expuesta a 10 mg.L de solución de Hg^{2+}, en las primeras 12 h el contenido de la planta es de aproximadamente 2 mg/g. Durante las próximas 84 horas aumenta casi tres veces y luego disminuye drásticamente, lo que indica que, para este contenido, el mercurio se vuelve altamente tóxico para la planta. Para una concentración externa de 1 mg/L, la absorción máxima de mercurio es mayor que la encontrada para las plantas colocadas en 10 mg/L medio y se observa una zona de saturación a partir de las 96 h, lo que sugiere que este nivel de mercurio aún se tolera.		
CONCLUSIONES		
• La fitorremediación de Hg^{2+} acuoso por la macrófita autóctona flotante *Spirodela* intermedia es una alternativa conveniente. Para una concentración inicial de Hg^{2+} en el rango de 1-10 mg/L, las plantas se comportan como hiperacumuladores y alcanzan la máxima bioconcentración en solo 96 h. Expuestas a una concentración inicial de 10 mg/L, las plantas deben recolectarse al cuarto día para evitar fugas de Hg por intoxicación. • Se encontró que la distribución de Hg^{2+} en hojas es más heterogénea que en		

raíces. El mapeo simultáneo de varios elementos se puede utilizar para explorar los mecanismos fisiológicos que permiten que estas plantas acumulen y en algunos casos hiperacumulen Hg^{2+}

Fuente: De la Fournière, E.; et al. 2019

Cuadro 3. Estudio de caso 2

TITULO DE ESTUDIO: IMPACTO DEL MERCURIO EN LOS ECOSISTEMAS COLOMBIANOS Y LAS TÉCNICAS APLICABLES PARA SU BIORREMEDIACIÓN		
AUTOR: Claudia Patricia Pinzón Carlos Andrés Fajardo Gómez	**AÑO:** 2018	**PAÍS DE ORIGEN:** Colombia
OBJETIVOS:		
• Realizar una revisión bibliográfica del impacto que ha tenido el uso del mercurio en los ecosistemas colombianos.		
DESCRIPCION:		
Se realizó una revisión documental acerca del impacto generado por el Hg en diversos ecosistemas en Colombia, relacionados con la disminución de especies nativas de flora y fauna, y de la calidad del agua, aire y suelo del lugar. Hacer una comparación de las técnicas fisicoquímicas con las técnicas de biorremediación.		
RESULTADOS:		
Los efectos tóxicos del mercurio sobre la salud de los seres vivos, afectando en gran medida el sistema digestivo, nervioso e inmunitario, riñones, piel, pulmones y ojos. En cuanto a su bioacumulación y transporte en la cadena trófica se presenta en dos formas (orgánicas e inorgánicas). En las especies inorgánicas se encuentran compuestos como el metilmercurio y fenilmercurio. En la fauna acuática el metilmercurio genera mayor obstrucción en la cadena trófica debido a la facilidad que tiene de atravesar las membranas celulares. En las técnicas fisicoquímicas para la recuperación de ecosistemas afectados por mercurio se encuentran: carbón activado granular, destilación del mercurio, desmercurización térmica, encapsulación del mercurio; las técnicas de biorremediación se encuentran: atenuación natural, bioestimulación, bioaumentación, biosorción, degradación enzimática, remediación microbiana y fitorremediación.		
CONCLUSIONES		
• Se concluyó que el impacto generado por mercurio está relacionado con la falta de regulación en temas normativos para la disposición de los residuos generados por algunas actividades productivas, lo que hace difícil el tratamiento y por ende disminuir la contaminación en los ecosistemas afectados. Además se consideraron diferentes alternativas que permiten la disminución del mercurio en el medio ambiente.		

Fuente: Fajardo, C; Pinzón, C. 2018

Cuadro 4. Estudio de caso 3

TITULO DE ESTUDIO: BIORREMEDIACIÓN DE MERCURIO Y NÍQUEL POR BACTERIAS ENDÓFITAS DE MACRÓFITAS ACUÁTICAS		
AUTORES: • María Paulina Torres Pérez • Deimer Vitola Romero • Alexander Pérez Cordero	**AÑO:** 2019	**PAÍS DE ORIGEN:** Colombia
OBJETIVOS:		
Identificar población de bacterias que se encuentran en las raíces de macrófitas, y su respectiva tolerancia a metales pesados como níquel y mercurio.		
DESCRIPCION:		
Se seleccionaron afluentes ubicados en los departamentos de Sucre y Cordoba para analizar la contaminación de Hg y Ni, a escala de laboratorio, donde se recolectaron 10 especies de plantas para aplicar la conocida tecnología de fitorremediación.		
RESULTADOS:		
Entre las especies recolectadas se identifcaron las que presentaron una mejor toletancia, esas fueron: *Neptunia oleracea Lour, Eichhornia crassipes (Mart.) Solms y Paspalum repens Bergius.* En el caso de la especie *Paspalum repens Bergius* tolero una concentración de 400 mg/L de Hg.		
CONCLUSIONES		
Las 3 especies identificados presentaron una alta capacidad de tolerar diversas concentración de Hg, obteniendo porcentajes de remoción entre un 82% hasta 84%. Por este motivo, se propone asistir procesos de fitorremediación con estas especies.		

Fuente: Torres, M.; et al. 2019

Cuadro 5. Estudio de caso 4

TITULO DE ESTUDIO: APLICACIÓN DEL MODELO DE BOHART Y ADAMS EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO DE MINERÍA POR ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO		
AUTORES: • Hugo A. Rojas • Diana C. Guerrero • Olga Y. Vásquez • Jesús S. Valencia	**AÑO:** 2012	**PAÍS DE ORIGEN:** Colombia
OBJETIVOS:		
• Aplicar el modelo de Bohart y Adams a diferentes minas de carbón en el municipio de Guachetá en Colombia, simulando a escala de laboratorio condiciones reales de vertido de los drenajes.		
DESCRIPCION:		
Se analizaron diferentes drenajes de minas de carbón y se simularon en el laboratorio las condiciones reales de vertido de los drenajes. Determinadas las condiciones de funcionamiento óptimo de la columna, se realizó un análisis detallado de curvas de		

ruptura, a través del modelo de Bohart y Adams, para determinar la vida útil del material adsorbente y la efectividad del método para la remoción del ion metálico. Se estableció que el tiempo de ruptura es de 20 min y que la columna con el mejor rendimiento tiene 1,7 cm de diámetro y 2 cm de altura del lecho, bajo las condiciones de estudio

RESULTADOS:

Caracterización del carbón activado

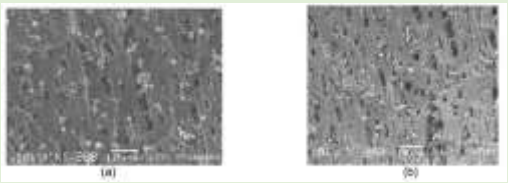
El análisis textural del carbón activado granular, antes y después del proceso de adsorción de iones mercurio en disoluciones modelo. Se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de textura del carbón activado.

GAC	Área superficial Langmuir (m^2 g^{-1})	Volumen de poro (cm^3 g^{-1})	Tamaño de poro (Å)
Sin usar	553	0,00468	0,424
5 ppm Hg^{2+}	552	0,00466	0,413
10 ppm Hg^{2+}	552	0,00466	0,412

Las micrografías antes y después del proceso de adsorción (Figuras **1**(a) y 1(b), permiten observar que al menos a este nivel de magnificación (tamaño micrométrico) el proceso de remoción de iones mercurio no modifica de manera significativa la superficie del material adsorbente.

Fig. 1: Micrografías carbón activado. (a) Micrografía antes del proceso de adsorción. (b) Micrografía después del proceso de adsorción



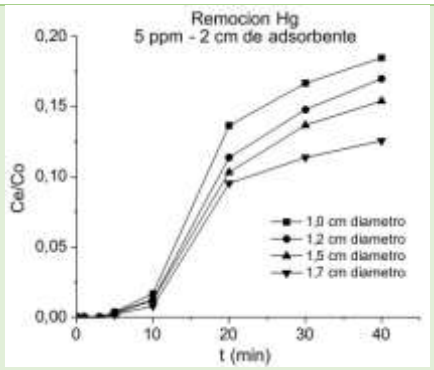
Caracterización de los drenajes de minería

Se analizaron las aguas de drenaje pertenecientes a 9 minas de carbón. Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: pH, contenido de cloruros, acidez, alcalinidad, sulfatos, conductividad, contenido de Na, Mg, Ca, Al, Fe, Mn, Zn, Cd, K y Pb. Evidenciando una variación en el pH

Tabla 3. Presencia de mercurio en aguas de drenaje de mineros minería del carbón

Drenaje	Hg (mg L^{-1})x10^{-4}
Efluente aledaño	4,0
Carbocuality	11
El roble	4,0
El rubí del callejón	4,0

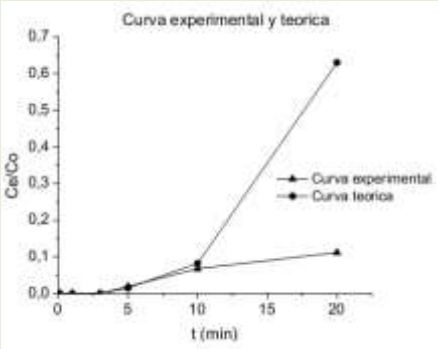
Fig. 2: Curvas de ruptura para la remoción de mercurio en disoluciones de 5 ppm.



Aplicación del modelo Bohart y Adams

Este modelo se utiliza para evaluar el comportamiento del carbón activado frente a los drenajes de minería permitiendo evidenciar que el uso de columnas de lecho fijo empleando carbón activado como adsorbente.

Fig. 3: Curva de ruptura modelada para el proceso de remoción de iones mercurio en disolución acuosa, sobre carbón activado



CONCLUSIONES

En este trabajo se determinó que el carbón activado granular, es un sólido adecuado para los procesos de remoción de iones Hg^{2+} presentes en aguas de drenajes de minería de carbón en el municipio de Guachetá.

Fuente: Rojas, H. et al. 2012

Cuadro 6. Estudio de caso 5

TITULO DE ESTUDIO: ANÁLISIS DOCUMENTAL DEL EFECTO DE VERTIMIENTOS DOMÉSTICOS Y MINERO EN LA CALIDAD DEL AGUA DEL RIO CONDOTO (CHOCÓ, COLOMBIA)		
AUTORES: • Didier E. Sánchez Arriaga • Julio E. Cañón Barriga	**AÑO:** 2010	**PAÍS DE ORIGEN:** Colombia
OBJETIVOS:		

Analizar los vertimientos de minería y de los alcantarillados de poblaciones urbanas y rurales que descargan sus aguas directamente al río y realizar un estimativo de su aporte de caudal y carga contaminante (SST y Hg) al río Condoto.
DESCRIPCION:
Se realizó una revisión teniendo en cuenta varias entidades que han desarrollado proyectos, estudios e investigaciones relacionados con el río Condoto o sus afluentes; para para identificar las principales causas o actividades que han originado el deterioro del río. Para la recolección de información relacionada con temas legales en cuanto a la preservación del recurso hídrico del río Condoto se consultaron fuentes como CODECHOCO a nivel departamental, e INGEOMINAS a través de su página de internet.
RESULTADOS:
En total se identificaron 24 minas existentes en el 2008, estas presentaron un caudal promedio de 773 y 946 L/s, lo que representa 81700 m^3/día. Debido a la ilegalidad de la minería, la captación de estas actividades de extracción de metales preciosos en su gran mayoría no cuenta con permisos ambientales como concesión de aguas y tasas por usos. Se estima que las actividades mineras descargan sin tratamiento previo entre 658 y 854 L/s de aguas residuales al río Condoto, lo que representa 69.466 m^3/día de agua contaminante. **Vertimiento de mercurio** Se genera un vertimiento de 0,2 y 1 ton Hg/año, generando graves impactos ambientales debido a tu toxicidad y capacidad de bioacumularse en los organismos de muchas especies de que luego consumen los humanos, generando efectos crónicos a la salud que pueden llegar a causar la muerte.
CONCLUSIONES
• La minería se considera como una de las actividades principales en la zona, lo cual influye a la contaminación de las fuentes hídricas y ocasionan problemas de sedimentación, aumento de la turbiedad, cambios en las características hidráulicas y geomorfológicos, afectación de la vida acuática, etc. • Se presenta poca información del tema en esta zona, lo cual se hace de suma importancia la recolección de datos y revisar constantemente los niveles de mercurio que pueden ser medidos en campo y, por lo tanto, son susceptibles de corroboración cuantitativa por parte de las autoridades ambientales. • Es necesario que las actividades mineras que vierten sus aguas al río Condoto implementen estrategias y alternativas para disminuir e porcentaje de contaminación a tan importante afluente.

Fuente: Sánchez, D; Cañón, Julio. 2010

Cuadro 7.Estudio de caso 6

TITULO DE ESTUDIO: CONSIDERACIONES AMBIENTALES POR EL USO DE MERCURIO EN MINERÍA AURÍFERA EN EL MUNICIPIO DE EL BAGRE, ANTIOQUIA: ESTRATEGIAS DE PRODUCCIÓN LIMPIA

AUTORES: • Mayra M. Luna Arcila • Emilio J. Soto Hoyos	**AÑO:** 2016	**PAÍS DE ORIGEN:** Colombia
OBJETIVOS:		
Identificar cuáles son las implicaciones ambientales que genera el uso de mercurio en la minería en el municipio de El Bagre, Antioquia		
DESCRIPCION:		
Evaluar las implicaciones ambientales generadas por el uso de mercurio en minería, determinando del contenido de Hg en el los recursos naturales, realizar un balance másico; identificar y evaluar los impactos ocasionados al medio. De igual forma, se promover estrategias de producción limpia que buscan mitigar los posibles impactos ambientales y efectos a la salud.		
RESULTADOS:		

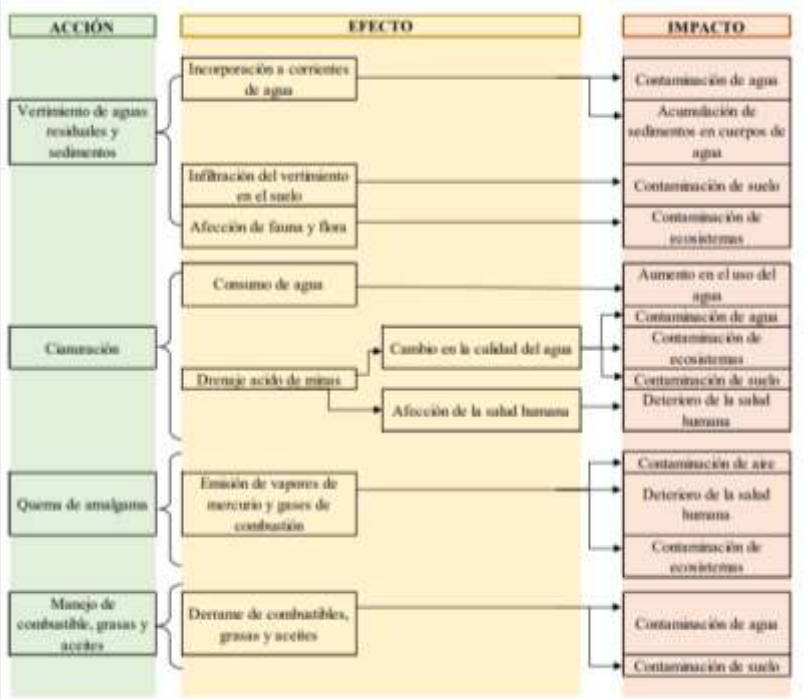


Gráfico 4. Proceso de beneficio actual en la minería de filón

CONCLUSIONES

- El recurso natural que mayor afectación presenta es el hídrico, seguido por el suelo y por último el aire.
- Las concentraciones obtenidas superan el umbral, el valor obtenido fue hasta 1,76 µg/ y la normatividad colombiana permite (1 µg L-1).
- Estos resultados generan mayor preocupación, debido a la alta contaminación especialmente en los cuerpos de agua superficiales involucrados en las operaciones de las minas.

Fuente: Luna, A; Soto, E. 2010

Cuadro 8. Estudio de caso 7

TÍTULO DE ESTUDIO: BIORREMEDIACIÓN EN AGUAS RESIDUALES CONTAMINADAS CON CIANURO Y MERCURIO GENERADAS EN EL PROCESO DE LA MINERÍA AURÍFERA EN COLOMBIA, A PARTIR DE UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA ENTRE LOS AÑOS 2008 -2018		
AUTORES: • Mónica Isabel Cartagena David	**AÑO:** 2019	**PAÍS DE ORIGEN:** Colombia
OBJETIVOS:		
Establecer alternativas de biorremediación en aguas residuales contaminadas con CN- y Hg generadas en procesos de minería.		
DESCRIPCION:		
Algunos metales pesados han sido útiles en los procesos de explotación minera para la obtención del oro, dejando consecuencias en los ecosistemas residuos perjudiciales en los afluentes más cercanos; se espera que por medio de diferentes procesos de biorremediación se puedan disminuir estos graves impactos. Se realizó una revisión de documentos para identificar cuales alternativas se han desarrollado para la disminuir de la concentración del Hg en aguas contaminadas.		
RESULTADOS:		

Mediante la investigación se encontraron procesos utilizados para el tratamiento de estas aguas, donde se incluye el uso de algunas bacterias, (*seudomonas, cianobacterias*) y especies de plantas, [lenteja de agua (*Lemna minor*), Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) y Elodea (*Elodea canadienses*)], que cuentan con una alta eficiencia para remover el mercurio, y degradar el cianuro, Es de resaltar la aplicación de la biorremediación en la descontaminación de diversos ambientes contaminados por las actividades productivas.
CONCLUSIONES
• Los métodos utilizados actualmente, son físicos y químicos, logrando reducir la contaminación de los recursos hídricos. • Se halló en la literatura revisada, dos métodos biorremediadores, uno de ellos la biorremediación microbiana, esta utiliza las bacterias, hongos y microrganismos, y la fitorremediación, que es el método que utiliza las plantas para el proceso remediador.

Fuente: Cartagena, M. 2019

4.4. MARCO CONCEPTUAL

Para la compresión de este documento se hace necesario que el lector tenga claridad y pueda relacionar los temas o conceptos que se mencionan en el desarrollo del proyecto.

El agua se considera un recurso vital y complemento esencial para todo lo que existe en el mundo, pero cada vez más el agotamiento y contaminación de este se hace evidente, debido al crecimiento poblacional, las actividades productivas y la falta de control a través de las entidades gubernamentales.

En cuanto a las actividades o sectores que generan mayor presión al recurso hídrico se encuentra la minería, el sector minero se ha convertido en una actividad generadora de conflictos sociales, ambientales, económicos y culturales en algunas regiones de Colombia.

La actividad minera se genera tanto a cielo abierto como subterránea, de manera legal e ilegal, y los lugares donde se desarrolla se encuentran ecosistemas estratégicos para la conservación ambiental, como ríos, zonas de inundación, selvas, páramos, bosques, humedales, nacimiento de aguas y de recargas de

acuíferos, ocasionando la pérdida de estas zonas de importancia ambiental afectando la vida de la población, donde se incluyen las comunidades negras, indígenas, colonos, campesinos, entre otros.

Para el proceso de extracción del mineral se requieren aproximadamente por cada gramo de oro siete gramos de mercurio; además, en países como Colombia aún se realiza minería ilegal, donde no se poseen títulos ni se realizan otorgamientos de licenciamiento ambiental, lo cual hace que no se cuente con documentación de los estudios de impacto ambiental (EIA).

Al mismo tiempo, la contaminación de las fuentes hídricas va más allá, teniendo en cuenta que el mercurio que se vierte es consumido por los peces y animales pequeños como el zooplancton, que luego son recolectados y representan una gran oferta gastronómica, lo que repercute en los seres humanos, generando enfermedades, intoxicación y en algunos casos la muerte. Para casos como Colombia es importante resaltar que los estudios epidemiológicos referentes al tema son muy escasos, lo cual genera vacíos a la hora de presentar medias correctivas en la población afectada.

Considerando los graves problemas que genera el uso de mercurio y su vertimiento en las fuentes hídricas, no se está asegurando la disponibilidad y gestión sostenible del agua en los territorios. El mercurio con su gran particularidad de ser el único elemento metálico líquido a temperatura ambiente, hace que sea de especial atención debido a sus graves efectos sobre el ambiente y la salud pública.

Es por ello, que a lo largo del desarrollo tecnológico y científico han surgido diversas formas para disminuir la contaminación hídrica causada por metales pesados, donde se han utilizado tecnologías que se basan en técnicas fisicoquímicas, biológicas, mecánicas y eléctricas.

Entre las tecnologías más comunes se encuentra el uso de precipitación química esta se basa en la realización de las fases del tratamiento común del agua (floculación, coagulación y sedimentación); las biológicas y físicas se refieren a las que incluyen microorganismos, biomasa viva o muerta, especies invasoras, algunas de estas la biorremediación, microremediación, fitorremediación y ficorremediación. estas aprovechan la capacidad de los microrganismos seleccionados para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos. Estas tecnologías sueles ser más favorables en cuanto a costos, pero se generan residuos, debido a que los microrganismos utilizados para la remoción quedan impregnadas del metal o contaminante.

En el caso de las tecnologías con sistemas eléctricos y mecánicos, se encuentran la electrocoagulación, la nanotecnología, los sistemas bioelectroquimicos, los procesos de oxidación fenton, los cuales representan una gran alternativa por sus usos avanzados en procesos de descontaminar aguas; las celdas de combustible microbianas que hace parte de los sistemas bioelectroquímicos ha generado comentarios positivos porque no solo se realiza un proceso de remoción de contaminante, esta también genera bioelectricidad, donde que convierte la energía química en energía eléctrica. Aunque este tipo de tecnologías para iniciar requiere de una gran inversión con el paso del tiempo se convierte en algo positivo que puede generan beneficios y beneficiar muchas comunidades.

Para llegar a estas tecnologías se realizó una recopilación de información de cómo se han venido implementando en sistemas de tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, para así clasificarlas y evaluarlas teniendo en cuenta algunos criterios determinando cuales son las alternativas viables y sustentables para proponer en esta investigación.

Por último, es importante resaltar un hecho histórico y el punto de partida para la recuperación y tratamiento de aguas contaminadas con mercurio, el Convenio de Minamata, esta es una iniciativa de la ONU que busca disminuir la contaminación global con mercurio, además fue una base fundamental para establecer y crear la Ley 1892 de 2018 en Colombia por medio de la cual se aprueba el "Convenio de Minamata sobre el mercurio", originado en Kumamoto (Japón) el 10 de octubre de 2013.

4.5. MARCO LEGAL

NORMA	DESCRIPCIÓN	ARTÍCULO QUE APLICA	AUTORIDAD COMPETENTE
Decreto ley 2811 de 1974	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Todo	Presidencia de la República de Colombia
Constitución política de Colombia de 1991		8, 79, 80, 88, 366	
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio del Medio Ambiente y reordena la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y dicta otras disposiciones	1, 17, 23, 64, 65	Congreso de la República

Ley 9 de 1979	Dicta medidas sanitarias	1, 6, 8	Congreso de la República
Ley 685 de 2001	Expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones	Todo	Congreso de la República
Resolución 0610 de 2010	Establece la Norma de Calidad del Aire (Nivel de Inmisión), para todo el país en condiciones de referencia.	5	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Decreto 2261 de 2012	Establece medidas para regular, registrar y controlar la importación de la maquinaria clasificable en las subpartidas del Arancel de Aduanas, dicta disposiciones para controlar el uso de maquinaria pesada e insumos químicos que puedan ser utilizados en actividades mineras sin las autorizaciones y exigencias previstas en la ley	9	Presidencia de la República de Colombia
	Establece disposiciones para comercializar y usar mercurio en las actividades industriales del país,		

Ley 1658 de 2013	fija requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y dicta otras disposiciones”.	Todo	Congreso de la República
Decreto 1421 de 2016	Adiciona y modifica el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, relacionado con la adopción de medidas para el beneficio y comercialización de minerales y adiciona y modifica el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, respecto a las licencias ambientales para plantas de beneficio”	6	Presidencia de la República de Colombia
CONPES 3868 de 2016	Política de Gestión del Riesgo asociado al uso de Sustancias Químicas		Departamento Nacional de Planeación
Decreto 1421 de 2016	Adiciona y modifica el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, respecto de la adopción de medidas		

	relacionadas con el Beneficio y Comercialización de minerales y se adiciona y modifica el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1076 de 2015, respecto del licenciamiento ambiental para plantas de beneficio"		
Resolución 2254 de 2017	Adopta la Norma de Calidad del aire y se dictan otras disposiciones	4, tabla n°3	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Ley 1892 de 2018	Aprueba el Convenio de Minamata sobre el mercurio, originado en Kumamoto (Japón) el 10 de octubre de 2013		
Decreto 1090 de 2018	Adiciona el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y dicta otras disposiciones		
Decreto 1041 de	Modifica el artículo	Todo	Presidencia de la

2018	3° del Decreto 2133 de 2016 relacionado con cupos para la importación y su administración.		República de Colombia
Ley 1955 de 2019	Expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad”	12	Congreso de la República
Decisión 844 de 2019	XLV Reunión del Consejo Andino de Ministros de Relaciones Exteriores y los representantes titulares ante la comisión de la comunidad andina y Creación del Observatorio Andino para la Gestión de la información oficial en materia de mercurio	Todo	Comité Andino Ad-Hoc de Minería Ilegal (CAMI)

Fuente: Elaboración propia

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, se tuvo en cuenta el desarrollo de tres fases durante la realización del trabajo, las cuales corresponden a cada objetivo específico planteado.

5.1. FASE INICIAL – DIAGNÓSTICO DE LOS RÍOS COLOMBIANOS AFECTADOS POR VERTIMIENTOS DE MERCURIO.

Esta fase está orientada a la elaboración de un diagnóstico previo para identificar por zonas hidrográficas el total de ríos existentes y cuáles pueden haber sufrido problemas de vertimiento de mercurio. Se inició con la recolección de información en diferentes entidades como (IDEAM, SIAC, SIMCO, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, DANE, entre otros).

La revisión del estado del arte se enfocó en buscar en bases de datos como: Redalyc, sCiELO, Google académico, Dialnet, BASE, Microsoft Academic, REBID, SCI, WASTE MAGAZINE, ERIK, PALGRAVE MACMILLAN entre otras, utilizando palabras claves como: mercurio, contaminación de fuentes hídricas por mercurio, la minería y sus afectaciones en los recursos naturales; además, esta información se filtró desde el año 2010 hasta la actualidad para contar con datos recientes y actualizados.

Finalmente, con la información recolectada se realizó la priorización de las zonas vulnerables que presentan afectación por vertimientos de mercurio, y luego fueron plasmadas en un mapa.

5.1.1. Diagnóstico previo

Se identificó la cantidad de ríos existente de acuerdo con su área hidrográfica, categorizadas por sub-zonas hidrográficas existentes en Colombia, por medio del Estudio Nacional del Agua 2018 - ENA.

Después de identificados los ríos, se categorizaron de acuerdo con su área hidrográfica y se tuvieron en cuenta las características de vertimientos de mercurio al suelo y agua, proporcionados en el ENA 2018, esta característica calificada con las convenciones (Muy Alto, Medio, Baja), lo cual fue clave para priorizar las zonas afectadas, esta información se diligenció en un cuadro como el que se presenta a continuación (Cuadro 9).

Cuadro 9. División por zonas hidrográficas

Zona Hidrográfica		
SZH*	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
		Baja
		Media
		Muy alta

SZH* corresponde al código que adopta el DANE para clasificar las fuentes hídricas

Fuente: Elaboración propia

Se identificaron todos los ríos y se presentó la cantidad total por cada área hidrográfica con su respectiva división como se muestra en el cuadro 10.

Cuadro 10. Cantidad de fuentes hídricas por área hidrográfica.

Área Hidrográfica	Cantidad
Caribe	
Magdalena – Cauca	
Orinoco	
Amazonas	
Pacifico	
TOTAL	

Fuente: Elaboración propia

5.1.2. Recolección de información

Teniendo en cuenta que la minería es una de las actividades que más presión genera al recurso hídrico, debido al uso de mercurio para extraer oro, se hizo una revisión acerca de la afectación que se presenta en los ríos colombianos, además se incluyó información sobre los títulos mineros existentes, las regiones donde se presenta minería legal e ilegal, y las fuentes hídricas afectadas por vertimientos de metales pesados, especialmente mercurio. Esta información se recolectó mediante los cuadros 11 y 12 mostrados a continuación.

Cuadro 11. Títulos y solicitudes de explotación de oro por Departamentos

LÍNEA BASE INICIAL				
DEPARTAMENTO (productores)	MUNICIPIOS (productores)	MUNICIPIOS EXISTENTES	Títulos	Solicitudes

Fuente: Agencia Nacional de Minería. 2017

Cuadro 12. Recopilación de información sobre la contaminación de fuentes hídricas por vertimientos de mercurio

Fuente afectada N°	
Título: **Autor:** **Fuente afectada:**	**Objetivo:**

Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Análisis de las zonas afectadas

De acuerdo a la información recolectada de los ríos existentes y la afectación en las regiones colombianas, obtenidas en el diagnóstico previo se plasmaron las zonas afectadas por los vertimientos de mercurio al suelo y al agua en un mapa, con sus respectivas convenciones como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Departamentos afectados por los vertimientos de mercurio

Fuente: Elaboración propia

5.2. FASE EVALUATIVA – DETERMINACIÓN DE LOS IMPACTOS Y EFECTOS SOBRE EL AMBIENTE A CAUSA DE LA CONTAMINACIÓN POR MERCURIO EN LA ACTIVIDAD MINERA

La ejecución de esta fase, se llevó a cabo mediante la realización de las siguientes actividades:

5.2.1. Evaluación documental de los impactos y efectos en el medio ambiente

Se hizo una revisión bibliográfica utilizando bases de datos como Redalyc, sCiELO, Google académico, Dialnet, BASE, Microsoft Academic, REBID, SCI, WASTE MAGAZINE, ERIK, PALGRAVE MACMILLAN, entre otras, revistas ambientales, libros, guías técnicas, informes de trabajo y de investigación enfocados en la minería como una de las actividades que mayor presión genera a los recursos naturales, para así identificar las acciones que se realizan en dicha actividad, y así describir los impactos y efectos sobre el medio ambiente.

5.2.2. Elaboración de matriz de identificación y valoración de impactos ambientales

Para la elaboración de la matriz de impactos ambientales en primer lugar se elaboró el listado de actividades de un proyecto de manera particular abordando cada una de las etapas del proyecto minero y a su vez se identifican los posibles impactos generados por la actividad en el medio físico, biótico y socioeconómico, sea de manera positiva o negativa. Estas actividades se definen de acuerdo a la Guía Minero Ambiental que regula el Ministerio de Minas y el Ministerio del Medio Ambiente. Serán tenidas en cuenta todas las actividades que se desarrollan en un proyecto minero, están se ilustran en el cuadro 13.

Cuadro 13. Actividades de un proyecto minero

ACTIVIDADES DEL PROYECTO MINERO									
ESTUDIOS PREVIOS	MONTAJE		OPERACIÓN					CIERRE	
Prospección y exploración	Planeamiento y montaje de campamentos	Remoción y descapote	Excavaciones	Extracción del Mineral	Trituración y Molienda	Amalgamación	Separación en retorta de Oro y Mercurio	Recuperación de áreas intervenidas	Cierre y abandono

Fuente: Guía minero ambiental

Estas actividades fueron calificadas teniendo en cuenta su impacto ambiental. Para la evaluación de impacto ambiental en la actividad minera, se utilizó la metodología propuesta por Vicente Conesa, 1997. Donde se consideraron las diferentes actividades de un proyecto de acuerdo a sus fases para evaluar los impactos y aspectos ambientales sobre cada componente que involucran lo social y ambiental. Esta evaluación se realizó teniendo en cuenta el dimensionamiento cuantitativo y cualitativo de los impactos que se generan durante el progreso y ejecución de las diferentes actividades y etapas propias de un proyecto minero.

5.2.2.1. Definición de criterios de valoración.

Los criterios de evaluación se describen a continuación:

Cuadro 14. Criterio 1

Carácter (CA): Cambios en el área de influencia	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
POSITIVO (+)	Representa un cambio beneficio
NEGATIVO (-)	Representa un cambio perjudicial o nocivo

Cuadro 15. Criterio 2

Magnitud (MG)	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
BAJA (1)	Es el grado de modificación teniendo en cuenta el estado en que se encuentra el área antes de la intervención
MEDIA (4)	
ALTA (8)	

Cuadro 16. Criterio 3

Extensión (EXT): Área de influencia afectada	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
PUNTUAL (1)	Impactos generados en el área directamente intervenida
LOCAL (4)	Impactos que trascienden en el área intervenida
REGIONAL (8)	Los impactos transcienden el área de influencia

Cuadro 17. Criterio 4

Duración (DUR): Tiempo de alteración del área intervenida	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
FUGAZ (1)	Persiste por menos de 1 año
TEMPORAL (4)	Persiste por 1 a 3 años
PERTINAZ (8)	Persiste por 4 a 10 años
PERMANENTE (12)	Persiste por un tiempo indefinido o mayor a 10 años

Cuadro 18. Criterio 5

Reversibilidad (REV): Capacidad de asimilación del área intervenida	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
CORTO PLAZO (1)	Recuperación natural en menos de 2 años

MEDIANO PLAZO (4)	Recuperación natural entre 2 y 6 años
LARGO PLAZO (8)	Recuperación natural entre 6 y 15 años
IRREVERSIBLE (12)	No es posible su recuperación

Cuadro 19. Criterio 6

Recuperabilidad (REC): Posibilidad de recuperación del área por medio de medidas de manejo ambiental	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
CORTO PLAZO (1)	Se puede eliminar en un tiempo menor a 1 año
MEDIANO PLAZO (4)	Se puede eliminar en un tiempo entre 1 y 3 años
LARGO PLAZO (8)	Se puede eliminar en un tiempo entre 4 y 10 años
IRREVERSIBLE (12)	No se puede eliminar ni mitigar

Cuadro 20. Criterio 7

Periocidad (PE): Aparición o permanencia a lo largo de un periodo de un tiempo	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
IRREGULAR (1)	El impacto se manifiesta esporádicamente y de forma imprevisible a lo largo de la duración del Proyecto
PERIÓDICO (4)	Ocurre de forma regular pero intermitente a lo largo de la duración del Proyecto.
DISCONTINUO (8)	Cuando se producen irregularidades a lo largo de la duración del Proyecto.
CONTINUO (12)	Se manifiesta constantemente o permanentemente a lo largo de la duración del Proyecto.

Cuadro 21. Criterio 8

Tendencia (TD): Incremento progresivo o no de la manifestación de la alteración sobre la o las variables socioambientales evaluadas	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
SIMPLE (1)	Cuando la acción reiterada que lo origina no incrementa progresivamente la magnitud del impacto, induciendo a nuevos impactos.
ACUMULATIVO (2)	Se incrementa ante la imposibilidad de la variable afectada pueda recuperarse en la misma proporción que la acción se incrementa espacio-temporalmente.

Cuadro 22. Criterio 9

Tipo (TP): Corresponde a la relación causa – efecto o la manifestación del efecto sobre una variable socio ambiental como consecuencia de una actividad.	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
INDIRECTO (1)	Cuando el impacto evaluado es consecuencia de la actividad o acción que se está desarrollando.
DIRECTO (2)	El impacto que se genera es consecuencia de la interacción con otra variable, a su vez, afectada por la actividad que se está ejecutando.

Cuadro 23. Criterio 10

Posibilidad de ocurrencia (PO): Probabilidad de que el impacto se presente o no	
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
BAJA (1)	El impacto se pudiese presentar

MEDIA (4)	El impacto se presenta
ALTA (8)	El impacto siempre se presenta

La importancia de un impacto está determinada por la combinación de los criterios de calificación anteriormente descritos.

Esta importancia depende de: la cobertura del impacto, su magnitud, su duración, el tipo, etc., por esto la importancia se define como: el resultado de la suma de todos los criterios evaluados para cada impacto excepto la magnitud que se multiplicaría por tres y la cobertura por dos; debido a que estos dos criterios, de acuerdo con la experiencia, son relevantes en la determinación de la importancia de un impacto.

La importancia del impacto permite clasificar los impactos con el fin de priorizar el manejo ambiental y establecer el tipo de medida de manejo requerido. A continuación se describe la operación que se realiza para calcular la importancia.

Importancia (IMP) = CA * (3MG + 2EXT + DUR + REV + REC + PE + TD + TP + PO)

Cuadro 24. Calificación de importancia para el carácter negativo

CALIFICACIÓN Importancia (IMP)	**VALOR (Carácter Negativo)**
Irrelevante	<-25
Moderado	-25 a <-50
Severo	-50 a -75
Critico	>-75

Cuadro 25. Calificación de importancia para el carácter positivo

CALIFICACIÓN Importancia (IMP)	VALOR (Carácter Positivo)
Poco Importante	<25
Importante	25 a 50
Muy Importante	>50

En el cuadro 26 se relacionan las diferentes actividades de un proyecto minero y su interacción con el medio y los posibles impactos que se puedan generar por el desarrollo de las mismas.

.

Cuadro 26. Identificación de los Impactos socioambientales

COMPONENTES DEL ENTORNO			IMPACTOS	ESTUDIOS PREVIOS	MONTAJE		OPERACIÓN					CIERRE	
				Prospección y explotación	Planteamiento y montaje de campamentos	Remoción y descapote	Excavaciones	Extracción del mineral	Trituración y molienda	Amalgamación	Separación	Recuperacion de areas intervenidas	Cierre y abandono
BIOTICO	HIDROLOGÍA	Caudales	Disponibilidad del agua										
		Dinámica fluvial	Variación en los cauces y caudales de los rios y quebradas										
	AGUA	Usos del agua	Restricción de usos										
		Calidad fisicoquimica	Alteración e la calidad fisico química por vertimientos con mercurio										
		Calidad bacteriológica	Alteración de la calidad bacteriológica										
	HIDROGEOLOGÍA	Calidad fisicoquímica de aguas subterráneas	Cambio en las propiedades fisicoquímicas bacteriológicas del agua subterránea										
		Nivel freático	Contaminación de las aguas subterráneas al sobrepasarse el nivel freático en las excavaciones										
		Capacidad de infiltración	Cambio en la capacidad de infiltración										
ABIOTICO	FAUNA ACUATICA	Especies	Cambios de la presencia y cantidad de especies										
		Hábitat	Cambios en las condiciones del hábitat										
SOCIOECONOMICO	DIMENSIÓN DEMOGRAFICA	Dinámica de la población	Cambios en la dinámica de la población										
		Salud de la población	Afectación a la salud por inhalación de vapores de mercurio, contacto directo con la piel y consumo de alimentos contaminados										

Fuente: Vicente Conesa. 1997

.

5.3. FASE PROPOSITIVA – EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS Y PRESENTACIÓN DE FICHAS TÉCNICAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES

Con el fin de evidenciar los impactos ambientales que se pueden generar a raíz de los vertimientos o utilización de mercurio y dar a conocer la vulnerabilidad que se presenta en las zonas priorizadas, se realizó un revisión de las diferentes tecnologías aplicadas en lugares donde se han presentado vertimientos o se han utilizado como escala piloto para la disminución del impacto ambiental que esto genera; luego por medio de criterios de evaluación se definieron las tecnologías más apropiadas y acordes de acuerdo a los puntajes obtenidos en dicha evaluación; después de seleccionadas las diferentes alternativas se plasmaron en fichas técnicas donde se puede encontrar información sobre cómo se utilizan y una descripción de cada una de ellas como estrategias para disminuir los impactos ambientales a causa del mercurio.

5.3.1. Análisis de información

Mediante la revisión de artículos, estudios y en general información secundaria en bases de datos y buscadores académicos, se recopiló información documental de diferentes tecnologías o técnicas fisicoquímicas y biológicas que se realizan para disminuir la contaminación causada por los vertimientos de mercurio en las fuentes hídricas. Para lograr este análisis se tuvo en cuenta el título del texto, el autor o autores, la tecnología aplicada, tipo de documento (trabajo de grado, articulo u otro), lugar donde se implementó (en campo, laboratorio o información teórica), descripción de la tecnología y unos criterios de evaluación.

Estos criterios se establecieron con el fin de comparar y elegir las tecnologías más apropiadas para la disminución de los impactos ambientales a causa de los vertimientos con contenido de mercurio. Los criterios fueron:

I. Facilidad de instalación

.

II. Facilidad en funcionamiento
III. % remoción
IV. Costos
V. Necesidad de terreno
VI. Generación y Gestión de residuos
VII. Favorabilidad ambiental

La evaluación de las tecnologías se realizó teniendo una escala de calificaciones que van desde 1,0 a 5,0 siendo 1,0 la más baja y 5,0 la más alta. Todas las tecnologías fueron evaluadas con los mismos criterios para al final sumarlos y dividirlos por la cantidad de criterios; después de tener el valor para cada una de ellas, se seleccionaron las que obtuvieron un valor entre 3,5 y 5,0 siendo estas las más acertadas de acuerdo a la evaluación, lo dicho anteriormente se observa en el cuadro 27.

Cuadro 27. Análisis de tecnologías

Título del estudio:	
Autor o autores:	
Tecnología aplicada:	
Tipo de documento: Trabajo de Grado __ Artículo ___ Otro ___	
Descripción de materiales y funcionamiento:	
Dónde se hizo la Aplicación: En campo ___ En laboratorio: ___ Información teórica___ Otro __ **Descripción de la aplicación:**	
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:	
CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	
Facilidad en funcionamiento	
% remoción	
Costos	
Necesidad de terreno	
Generación y Gestión de residuos	
Favorabilidad ambiental	
CALIFICACIÓN TOTAL	

Fuente: Elaboración propia

.

5.3.2. Presentación de fichas técnicas

Mediante los criterios establecidos anteriormente, se obtuvo la calificación de las diferentes tecnologías, las cuales fueron plasmadas mediante fichas técnicas con el fin de proponer medidas correctivas para la prevención y mitigación de los impactos ambientales, recordando que estas se seleccionaron de acuerdo a la calificación total obtenida en el rango entre 3,5 y 5,0. La información de las fichas se obtuvo mediante la búsqueda del nombre de la tecnología, para así describir su objetivo, tipo (química, natural, mecánica, entre otras), funcionamiento, ventajas y desventajas, esto se puede evidenciar en el cuadro 28.

Cuadro 28. Ficha técnica tecnologías ambientales

N°1	**Tecnología:**
Objetivo:	
Tipo:	
Descripción:	
Funcionamiento:	
Ventajas:	**Desventajas:**

Fuente: Elaboración propia

.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan en detalle los resultados del trabajo, dando cumplimiento a los objetivos propuestos a partir de la recopilación de información consultada. En primer lugar, se presenta la cantidad de fuentes hídricas (ríos) colombianas, con su grado de afectación, los diferentes factores o actividades económicas asociadas a la contaminación que genera el vertimiento de mercurio, identificando las zonas más afectadas que están determinadas por una contaminación muy alta, media y baja; en segundo lugar se realiza una revisión de los impactos generados por la actividad minera sobre el ambiente, que fueron estudiados de acuerdo a la metodología propuesta por Conessa Fernández; y por último en la fase propositiva se presenta una descripción en fichas técnicas acerca de las diferentes tecnologías sustentables como estrategia de prevención y mitigación para la disminución de los impactos ambientales a causa de los vertimientos de mercurio a las fuentes hídricas colombianas, las cuales fueron seleccionadas de acuerdo a una evaluación teniendo en cuenta criterios como él % remoción, costos, utilización de terreno, entre otras, para determinar la viabilidad, esta evaluación fue daba en un rango entre 1,0 siendo el valor más bajo y 5,0 el más alto; las tecnologías que obtuvieron una calificación total entre 3,5 y 5,0 fueran las elegidas para plasmar en las fichas mencionadas anteriormente.

6.1. FASE INICIAL – RÍOS COLOMBIANOS AFECTADOS POR VERTIMIENTOS DE MERCURIO.

6.1.1. Fuentes hídricas

De acuerdo al Estudio Nacional del Agua – ENA 2018 se obtuvo la cantidad de fuentes hídricas en Colombia y grado de afectación por vertimiento de mercurio al agua y el suelo, clasificadas en las 5 áreas hidrográficas existentes y diferenciadas con el código de sub-zonas hidrográficas (SZH), lo cual se verán reflejadas a continuación en el cuadro 29.

.

Cuadro 29. Cantidad de fuentes hídricas por área hidrográfica

Área Hidrográfica	Cantidad
Caribe	29
Magdalena – Cauca	106
Orinoco	73
Amazonas	62
Pacífico	35
TOTAL	305

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a cada área hidrográfica se subdividieron las zonas para su compilación:

Cuadro 30. Área hidrográfica Caribe

Zona Hidrográfica Atrato - Darién		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
1101	Río Andágueda	Baja
1102	Alto Atrato	Media
1103	Río Quito	Muy alta
1104	Río Bebaramá y otros Directos Atrato	Media
1105	Directos Atrato entre ríos Quito y Bojayá	Baja
1106	Directos Atrato entre ríos Bebaramá y Murrí	Baja
1107	Río Murrí	Baja
1110	Río Murindó - Directos al Atrato	Baja
1111	Río Sucio	Baja

.

1114	Directos Bajo Atrato entre río Sucio y desembocadura al mar Caribe	Baja
1115	Río Tanela y otros Directos al Caribe	Baja
1116	Río Tolo y otros Directos al Caribe	Media
1117	Río Cabi y otros Directos Atrato	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Caribe Litoral		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
1206	Arroyos Directos al Caribe	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Catatumbo		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
1602	Río Zulia	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Cuadro 31. Área hidrográfica Magdalena – Cauca

Zona Hidrográfica Alto Magdalena		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
2104	Ríos Directos al Magdalena	Baja
2105	Río Páez	Baja
2106	Ríos Directos Magdalena	Baja
2108	Río Yaguará y río Íquira	Baja
2109	Juncal y otros ríos directos al Magdalena	Baja
2110	Río Neiva	Baja

.

2111	Río Fortalecillas y otros	Baja
2112	Río Baché	Baja
2113	Río Aipe, río Chenche y otros Directos al Magdalena	Baja
2121	Río Coello	Baja
2124	Río Totare	Baja
2125	Río Lagunilla y Otros Directos al Magdalena	Media

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Saldaña		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
2201	Alto Saldaña	Baja
2202	Río Atá	Baja
2203	Medio Saldaña	Baja
2204	Río Amoyá	Baja
2206	Río Tetuán, río Ortega	Baja
2208	Bajo Saldaña	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Medio Magdalena		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
2301	Río Gualí	Baja
2305	Río La Miel (Samaná)	Baja
2307	Directos Magdalena Medio entre ríos La Miel y Nare	Baja
2308	Río Nare	Media
2310	Río San Bartolo y otros directos al Magdalena Medio	Media
2311	Directos al Magdalena Medio entre ríos Negro y Carare	Baja

.

2317	Río Cimitarra y otros directos al Magdalena	Media
2319	Río Lebrija y otros directos al Magdalena	Baja
2320	Directos al Magdalena (Brazo Morales)	Muy alta

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Sogamoso		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
2405	Río Sogamoso	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Magdalena - Cauca - San Jorge		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
2501	Alto San Jorge	Baja
2502	Bajo San Jorge - La Mojana	Media

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Cauca		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
2601	Alto río Cauca	Baja
2603	Rio Salado y otros directos Cauca	Baja
2604	Río Palo	Baja
2605	Río Timba	Baja
2606	Río Ovejas	Baja

.

2612	Río La Vieja	Baja
2613	Río Otún y otros directos al Cauca	Baja
2614	Río Risaralda	Baja
2615	Río Chinchiná	Baja
2616	Rio Tapias y otros directos al Cauca	Baja
2617	Río Frío y Otros Directos al Cauca	Media
2618	Río Arma	Baja
2619	Río San Juan	Media
2620	Directos río Cauca entre río San Juan y Puerto Valdivia	Baja
2621	Directos río Cauca entre Río San Juan y Puerto Valdivia (mi)	Media
2624	Río Tarazá - río Man	Media
2625	Directos al Cauca entre Puerto Valdivia y río Nechí	Media
2626	Directos Bajo Cauca - Ciénaga La Raya entre río Nechí y Brazo de Loba	Media
2627	Río Piendamó	Baja
2628	Río Quinamayo y otros Directos al Cauca	Media
2629	Ríos Claro y Jamundí	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Nechí		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
2701	Río Porce	Media
2702	Alto Nechí	Media
2703	Bajo Nechí	Muy alta

.

2704	Directos al Bajo Nechí	Media

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Bajo Magdalena		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
2907	Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato	Media

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Cuadro 32. Área hidrográfica Orinoco

Zona Hidrográfica Inírida		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
3108	R. Inírida (mi), hasta bocas Caño Bocón, y R. Las Viñas	Baja
3110	Caño Bocón	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Arauca		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
3701	Río Chítaga	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Cuadro 33. Área hidrográfica Amazonas

Zona Hidrográfica Caquetá		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
4402	Río Caquetá Medio	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

.

Zona Hidrográfica Putumayo		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
4701	Alto río Putumayo	Baja
4703	Río Putumayo Medio	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Cuadro 34. Área hidrográfica Pacífico

Zona Hidrográfica Mira		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
5102	Río Mira	Baja
5103	Río Rosario	Muy alta

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Patía		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
5201	Río Patía Alto	Baja
5202	Río Guachicono	Baja
5203	Río Mayo	Baja
5205	Río Guáitara	Baja
5206	Río Telembí	Muy alta
5207	Río Patía Medio	Media
5209	Río Patía Bajo	Media

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Tapaje - Dagua – Directos		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
5303	Río Iscuandé	Muy alta

.

5304	Río Guapi	Baja
5305	Río Timbiquí	Muy alta
5307	Río San Juan del Micay	Baja
5308	Río Naya - Yurumanguí	Media
5309	Ríos Cajambre - Mayorquín – Raposo	Baja
5310	Río Anchicayá	Baja
5311	Dagua - Buenaventura - Bahía Málaga	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica San Juan		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
5401	Río San Juan Alto	Media
5402	Río Tamaná y otros Directos San Juan	Media
5403	Río Sipí	Baja
5404	Río Cajón	Baja
5405	Río Capoma y otros directos al San Juan	Baja
5407	Ríos Calima y Bajo San Juan	Baja
5408	Río San Juan Medio	Media

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

Zona Hidrográfica Baudó - Directos Pacífico		
SZH	Nombre de Subzona Hidrográfica	Vertimientos de mercurio al suelo y agua
5501	Río Baudó	Baja

Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

6.1.2. Generación de vertimientos

6.1.2.1. Factores asociados a la generación de vertimientos de mercurio

De acuerdo a la contaminación que se genera a causa de los vertimientos de mercurio, la minería se presenta como una de las actividades que generan mayor impacto. El impacto se presenta en la calidad del recurso hídrico, debido a la explotación ilícita de minerales, explícitamente de oro; esto ocasiona un

.

incremento de sedimentos en las fuentes hídricas, así como al uso del mercurio durante el proceso productivo y la disposición final de los residuos.

De acuerdo al registro del Catastro Minero Colombiano que realiza la Agencia Nacional de Minería se identificó que 296 municipios en 19 departamentos es donde se presenta la mayor producción del mineral. Para el año 2017 se identificaron 445 títulos mineros de oro y 3.532 solicitudes de legalización minera de este mineral (entre las archivadas y activas). Los departamentos que presentan la mayor producción de oro, en su orden son, Antioquia, Chocó, Cauca, Caldas, Nariño y Tolima, esta información se puede apreciar en el cuadro 35.

.

Cuadro 35. Títulos y solicitudes de explotación de oro por Departamentos

LÍNEA BASE INICIAL				
DEPARTAMENTO (productores)	MUNICIPIOS (productores)	MUNICIPIOS EXISTENTES	Títulos	Solicitudes
Antioquia	94	125	149	1122
Bolívar	17	46	50	375
Boyacá	2	123	1	7
Caldas	20	27	120	469
Cauca	25	42	20	249
Cesar	7	25	2	16
Chocó	22	30	8	515
Córdoba	6	30	0	81
Guainía	1	2	2	27
Guajira	1	15	1	5
Huila	13	37	9	81
Nariño	25	64	19	0
Norte de Santander	3	40	2	4
Putumayo	6	13	0	147
Quindío	1	12	1	2
Risaralda	3	14	3	61
Santander	7	87	40	143
Tolima	27	47	17	152
Valle del Cauca	16	42	1	76
TOTAL	296	821	445	3532

Fuente: Agencia Nacional de Minería. 2017

Como complemento, se recopiló información sobre fuentes hídricas contaminadas por vertimientos de mercurio en Colombia, la cual se presenta en el cuadro 36.

Cuadro 36. Recopilación de información sobre la contaminación de fuentes hídricas por vertimientos de mercurio

.

Fuente afectada 1	
Título: Propuesta para la prevención y mitigación de la contaminación por la actividad minera de oro sobre el Canal del Dique **Autor:** González Sánchez, L. (2015) **Fuente afectada:** Canal del Dique, Bahía de Cartagena	**Objetivo:** Analizar el problema de la contaminación marina por minería de oro ilegal en el departamento de Bolívar, el cual no solo es considerado un problema ambiental, sino que además tiene implicaciones de carácter social, económico pues contribuye a un riesgo para la salud humana y la seguridad alimentaria de los pobladores.
Fuente afectada 2	
Título: Estudio exploratorio de evaluación de riesgo en la salud de madres lactantes por consumo de pescado contaminado del río Cauca, en el Valle del Cauca (Colombia) **Autor y año:** Zapata Rivera, A. M.; Méndez, F.; Páez, M. I.; Abrahams Chow, N.; Ordoñez, J. & Artunduaga, Y. P. (2018). **Fuente afectada:** Río Cauca, Valle del Cauca	**Objetivo:** Cuantificar la concentración de Cd, Hg y Pb en tejido muscular, para estimar el riesgo por consumo de estos pescados en la salud de madres lactantes de algunas en el corregimiento de El Hormiguero, al suroriente de la ciudad de Cali (rural); en el jarillón de la Comuna 6, en el oriente de esta ciudad (urbana), y en la vereda El Paso de la Torre, en el municipio de Yumbo (rural).
Fuente afectada 3	
Título: Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009 **Autor:** Gracia H, Lisy; Marrugo N, José L, & Alvis R, Erasmo M (2010). **Fuente afectada:** Ciénaga de Ayapel	**Objetivo:** Evaluar las concentraciones de mercurio total (HgT) en cabello de habitantes del municipio de Ayapel (Córdoba) y en peces capturados en la ciénaga de Ayapel.
Fuente afectada 4	
Título: Bioacumulación de mercurio en larvas de anuros en la zona afectada por la minería de oro en el río Dagua, Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia **Autor:** Hernández Córdoba, O. D.; Castro Herrera, F. & Páez Melo, M. (2013). **Fuente afectada:** Río Dagua	**Objetivo:** Evaluación de bioacumulación de mercurio en renacuajos pertenecientes al ensamble de anuros presentes en la parte disturbada del río Dagua, donde se ha hecho minería de oro irregularmente desde 2009, utilizando diferentes métodos y haciéndolo con diferentes intensidades.
Fuente afectada 5	
Título: Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros	**Objetivo:** Brindar una visión general del estado de conocimiento de las concentraciones de

.

metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia **Autor:** **Fuente afectada:** Ciénaga Grande de Achí, Simití, Bija y Capote; canal del Dique; ríos Ité, La Poza Don Alonso, Pocuné, Tiguí, Condoto, bajo y medio río Magdalena y alto río Meta; quebrada Las Mercedes, sector de Cuatro Bocas (confluencia del río Cimitarra al Magdalena)	metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia, realizando un énfasis especial en las concentraciones de mercurio detectadas, debido a que la mayor parte de estudios que se han realizado en el país sobre metales pesados en peces, están dirigidos a evaluar la concentración de este metal.
Fuente afectada 6	
Título: Evaluación del grado de contaminación por mercurio y otras sustancias tóxicas, y su afectación en la salud humana en las poblaciones de la cuenca del rio Atrato, como consecuencia de las actividades de minería **Autor:** Ministerio de Salud y Protección Social & Instituto Nacional de Salud (2018) **Fuente afectada:** Cuenca del río Atrato	**Objetivo:** Indagar sobre las condiciones de salud de la población que habita en la Cuenca del Río Atrato y su relación a la exposición a contaminantes ambientales producto de la minería de oro.
Fuente afectada 7	
Título: Impactos ambientales generados por el uso del mercurio en la minería aurífera ilegal. caso de estudio: Valle del Cauca **Autor:** Acosta Restrepo G. (2015) **Fuente afectada:** Ríos Anchicayá, Dagua, Cauca, Amaime, Bugalagrande, Cali, La Vieja Guachal, Guadalajara, Riofrío y Tuluá.	**Objetivo:** Realizar una revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas en el Valle del Cauca referentes a los impactos ambientales generados por la minería aurífera ilegal con el fin de determinar los niveles de contaminación por mercurio en agua, aire, suelo, flora y fauna
Fuente afectada 8	
Título: mercurio en peces de la bahía de Buenaventura **Autor:** Guillermo Duque, G., Cogua, P. (2016). **Fuente afectada:** Bahía de Buenaventura	**Objetivo:** Relacionar las anormalidades nucleares de los eritrocitos (ENA), la frecuencia de eritrocitos inmaduros (EI) con la concentración de mercurio total (HgT) en peces de la bahía de Buenaventura.

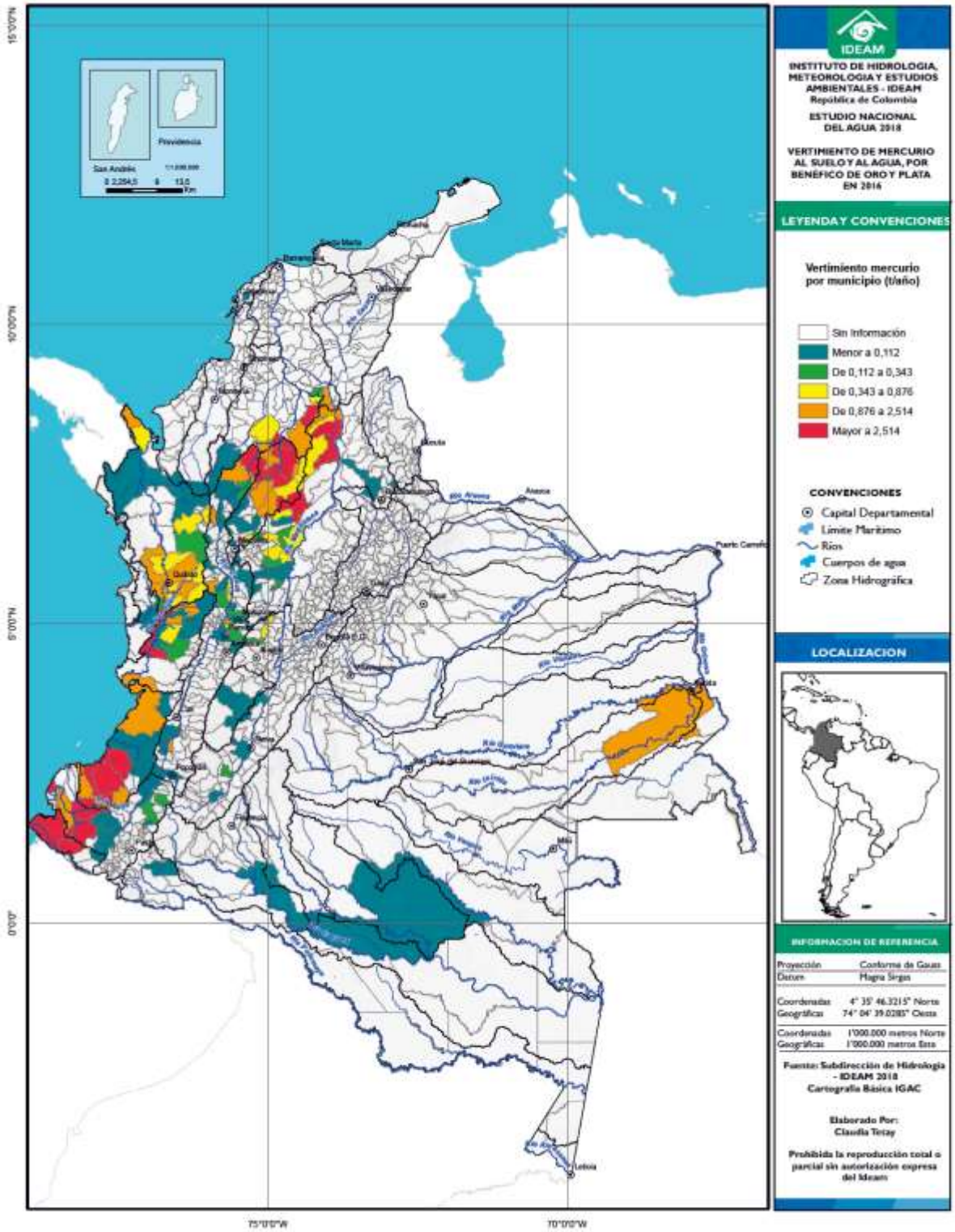
Fuente: Elaboración propia

.

6.1.3. Zonas afectadas

Figura 9. Vertimientos de mercurio al suelo y al agua (Ton/año)

.



Fuente: Estudio Nacional del Agua. 2018

.

6.1.4. Discusión y análisis

De acuerdo a la cuantificación de las fuentes hídricas que se encuentran en Colombia, según el Estudio Nacional del Agua del año 2018 se identificaron 305 fuentes hídricas distribuidas en 5 áreas hidrográficas: Caribe, Pacifico, Magdalena-Cauca, Amazonas y Orinoco.

Donde la mayor afectación se presenta es en el área hidrográfica Pacífico con un 77% (27); le sigue Magdalena-Cauca con 66,2% (66); en tercer lugar, esta Caribe con un 51,7% (15); por último, se encuentran Amazonas con 4,8% (3) y Orinoco (3). Estos porcentajes basados en la cantidad de fuentes existentes y las contaminadas.

Los ríos con una calificación muy alta por los vertimientos de mercurio al suelo y agua son el río Quito, Directos del Magdalena (Brazo Morales), Bajo Nechí, Rosario, Telembí, Iscuandé, Timbiquí; mostrando que la mayor contaminación se concentra en el área hidrográfica Pacífico.

En cuanto a la producción de oro en los departamentos productores se encuentran Antioquia, Bolívar, Boyacá, Caldas, Cauca, Cesar, Choco, Córdoba, Guainía, La Guajira, Huila, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Quindío, Risaralda, Santander, Tolima y Valle del Cauca, con un porcentaje de producción de acuerdo a los municipios existentes y los productores de un 75, 37, 2, 74, 60, 28, 73, 20, 50, 7, 35, 39, 8, 46, 8, 21, 8, 57, 38 respectivamente. Siendo Antioquia, Caldas y Chocó los mayores productores de oro en Colombia.

En las fuentes identificadas por medio de la revisión bibliografía se encontró que los departamentos que han venido realizado estudios y cuantificación de los impactos generados por la contaminación de mercurio son: Bolívar, Valle del Cauca, Córdoba y Chocó.

.

El departamento del Choco se ha identificado como un gran foco de contaminación, debido a que es una de las regiones más ricas en metales preciosos, lo cual es de gran atractivo para grandes empresas mineras; en un estudio realizado en esta zona a través de muestras de cabello humano, pescado y sedimentos de cuerpos de agua se estableció que se superan los valores admitidos en comparación con la norma, para el caso de cabello humano se obtuvieron valores de 6,72ppm y 0,87ppm y para las muestras en sedimentos se presentaron concentraciones mayores a 0,10ppm.

La afectación principal en la costa caribe colombiana se presenta en la fauna acuática, donde un gran cantidad de especies se ve afectada por los vertimientos de mercurio incorporándose en sus músculos o membranas, las especies con concentraciones altas son: el bocachico *(Prochilodus magdalenae)* y el comelón (*Leporinus muyscorum*) lo cual en los estudios encontrados excedían las concentraciones máximas permisibles. En cuanto a los sedimentos se identificaron concentraciones de 7,67µg/g excediendo la norma (0,5µg/g).

En departamento del Valle del Cauca con su afluente principal el rio Cauca, ha sido lugar de intervención e investigación para conocer el estado actual y como ha sido afectado por metales pesados como el mercurio. En la zona rural del municipio de Santiago de Cali de acuerdo a la cuantificación del riesgo cancerígeno y no cancerígeno en madres lactantes se obtuvieron concentraciones de 235µg/kg-1, superando los valores establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. En este mismo orden de ideas el municipio de Buenaventura también ha sido un gran conocedor de la problemática, este con afluentes contaminados como el corregimiento de Zaragoza debido a la explotación y extracción de oro.

.

6.2. FASE EVALUATIVA – IMPACTOS Y EFECTOS SOBRE EL AMBIENTE A CAUSA DE LA CONTAMINACIÓN POR MERCURIO EN LA ACTIVIDAD MINERA

6.2.1. Impactos y efectos en el medio ambiente.

Cuadro 37. Etapas y actividades de la actividad minera

ETAPAS Y ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN
Exploración	Establece y determina la presencia y ubicación del material, la geometría del depósito y la viabilidad existente para la extracción, también identifica que se puede generar en el ambiente y la población.
Prospección	Es la planeación de las actividades que se realizan de manera previa a la etapa exploratoria.
Planeamiento y Montaje	Organización, diseño y establecimiento de la infraestructura y equipos a utilizar en la obtención del mineral.
Remoción y descapote	Se remueve la capa vegetativa que está presente en el yacimiento.
Trituración y molienda	Consiste en disminuir el tamaño del material para ser triturado.
Amalgamación	Se realiza una mezcla entre el oro y Hg para ser lavado y fundido para generar la amalgama.
Separación en Retorta de Oro y mercurio	Utilizar un recipiente para quemar la amalgama.
Cierre de Mina y recuperación de áreas	Terminación de la actividad para su posterior mitigación y compensación de las zonas afectadas durante el proyecto.

Fuente: Guía minero ambiental de Explotación, Beneficio y Transformación. Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Medio ambiente

.

6.2.2. Matriz de identificación y valoración de impactos ambientales

De acuerdo a la evaluación de los impactos socioambientales identificados por medio de las diferentes fases de un proyecto minero, donde se tuvieron en cuenta las siguientes actividades: prospección y exploración, planeamiento y montaje, remoción y descapote, excavaciones, trituración y molienda, amalgamación, separación y retorta de oro y mercurio, cierre de mina y recuperación de las áreas intervenidas, esta información se puede observar en el cuadro 38.

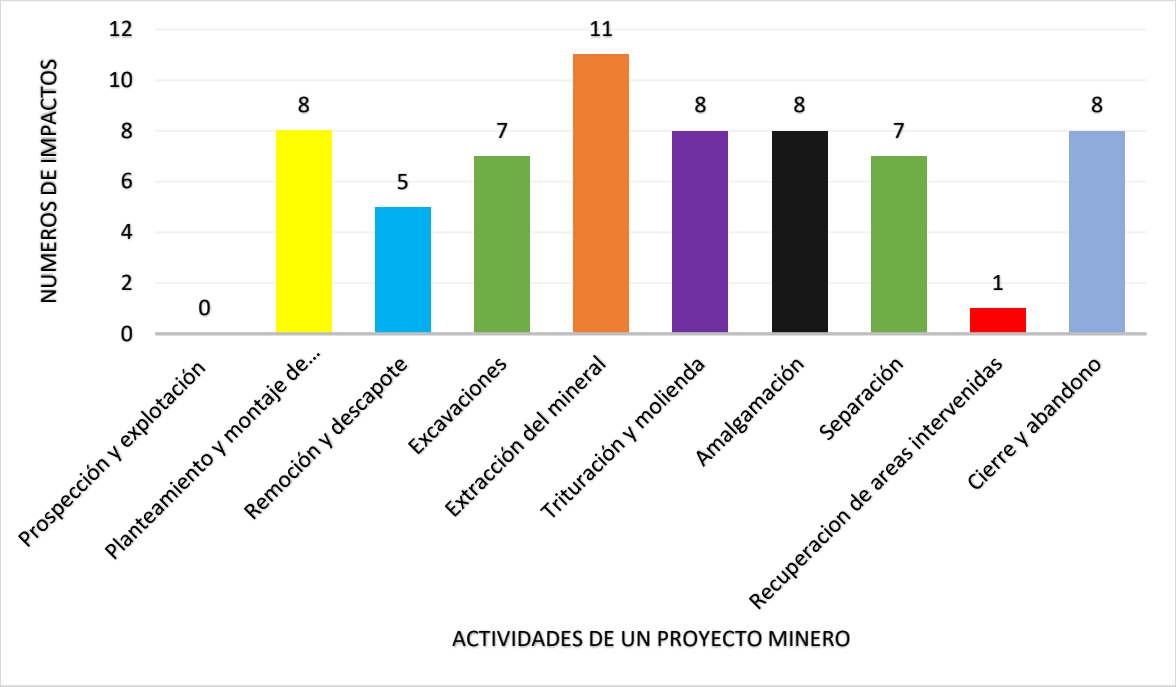
.

Cuadro 38. Matriz evaluación de los impactos socioambientales

COMPONENTES DEL ENTORNO			IMPACTOS	ESTUDIOS PREVIOS	MONTAJE		OPERACIÓN					CIERRE	
				Prospección y explotación	Planteamiento y montaje de campamentos	Remoción y descapote	Excavaciones	Extracción del mineral	Trituración y molienda	Amalgamación	Separación	Recuperacion de areas intervenidas	Cierre y abandono
BIOTICO	HIDROLOGÍA	Caudales	Disponibilidad del agua										
		Dinámica fluvial	Variación en los cauces y caudales de los ríos y quebradas										
	AGUA	Usos del agua	Restricción de usos										
		Calidad fisicoquímica	Alteración e la calidad fisico química por vertimientos con mercurio										
		Calidad bacteriológica	Alteración de la calidad bacteriológica										
	HIDROGEOLOGÍA	Calidad fisicoquímica de aguas subterráneas	Cambio en las propiedades fisicoquímicas bacteriológicas del agua subterránea										
		Nivel freático	Contaminación de las aguas subterráneas al sobrepasarse el nivel freático en las excavaciones										
		Capacidad de infiltración	Cambio en la capacidad de infiltración										
ABIOTICO	FAUNA ACUATICA	Especies	Cambios de la presencia y cantidad de especies										
		Hábitat	Cambios en las condiciones del hábitat										
SOCIOECONOMICO	DIMENSIÓN DEMOGRAFICA	Dinámica de la población	Cambios en la dinámica de la población										
		Salud de la población	Afectación a la salud por inhalación de vapores de mercurio, contacto directo con la piel y consumo de alimentos contaminados										

.

Figura 10. Impactos identificados para los diferentes elementos del ambiente



Fuente: Elaboración propia

.

Cuadro 39. Matriz Evaluación de los Impactos Socioambientales.

MATRIZ EVALUACION DE LOS IMPACTOS SOCIOAMBIENTALES																
COMPONENTES DEL ENTORNO			IMPACTOS	CA	MAG	EXT	DUR	REV	REC	PE	TD	TP	PO	IMP	CALIFICACION IMPORTANCIA	PROMEDIO IMP
BIOTICO	HIDROLOGÍA	Caudales	Disponibilidad del agua	-1	4	8	8	12	12	1	2	1	1	-65	SEVERO	-63
		Dinámica fluvial	Variación en los cauces y caudales de los ríos y quebradas	-1	4	8	4	12	12	1	2	1	1	-61	SEVERO	
	AGUA	Usos del agua	Restricción de usos	-1	8	8	8	8	8	8	1	2	8	-83	CRITICO	-84
		Calidad fisicoquimica	Alteración e la calidad fisico quimica por vertimientos con mercurio	-1	8	8	8	8	8	8	2	2	8	-84	CRITICO	
		Calidad bacteriologica	Alteración de la calidad bacteriologica	-1	8	8	8	8	8	8	2	2	8	-84	CRITICO	
	HIDROGEOLOGÍA	Calidad fisicoquimica de aguas subterraneas	Cambio en las propiedades fisicoquimicasy bacteriologicas del agua subterranea	-1	1	8	8	12	12	4	2	1	1	-59	SEVERO	-50
		Nivel freatico	Contaminación de las aguas subterraneas al sobrepasarse el nivel freatico en las excavaciones	-1	1	4	4	12	12	4	1	1	1	-46	MODERADO	
		Capacidad de infiltracion	Cambio en la capacidad de infiltracion	-1	1	1	4	12	12	4	2	1	4	-44	MODERADO	
ABIOTICO	FAUNA ACUATICA	Especies	Cambios de la presencia y cantidad de especies	-1	8	8	8	8	8	12	2	2	8	-88	CRITICO	-88
		Hábitat	Cambios en las condiciones del habitat	-1	8	8	8	8	8	12	2	2	8	-88	CRITICO	
SOCIOECONOMICO	DIMENSIÓN DEMOGRAFICA	Dinámica de la población	Cambios en la dinamica de la poblacion	-1	4	1	4	4	4	4	2	1	8	-41	MODERADO	-63
		Salud de la poblacion	Afectacion a la salud por inhalacion de vapores de mercurio, contacto directo con la piel y consumo de alimentos contaminados	-1	4	8	12	12	12	8	2	2	8	-84	CRITICO	

.

6.2.3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

Se identificaron 63 impactos, los cuales generan gran preocupación por los cambios que surgen en las áreas intervenidas por los proyectos mineros, donde el mayor afectado es el recurso hídrico y las especies que habitan en él.

En la actividad minera, la etapa que mayor presión genera es la Operación, con 41 impactos; en esta se presenta contaminación y/o la alteración de las condiciones sociales y del ambiente, donde se disminuye la disponibilidad del agua, variación de caudales en ríos y quebradas, alteraciones y modificación en las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del agua superficial y subterránea, disminución de peces por la modificación en el hábitat y por ultimo afectaciones a la salud por inhalación de vapores mercurio, contacto directo con la piel y el consumo de animales contaminados.

En la evaluación ambiental cada componente fue calificado y se observó que la mayor alteración se presenta en el medio biótico, este componente está conformado por agua, hidrología e hidrogeología, el cálculo de la importancia se vio reflejada con un impacto severo, donde se obtuvieron los siguientes valores (-84), (-63) y (-84) respectivamente, lo que representa una media de -77.

.

6.3. FASE PROPOSITIVA – TECNOLOGÍAS Y PRESENTACIÓN DE FICHAS TÉCNICAS PARA DISMINUIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES

6.3.1. Análisis de información

Mediante la ayuda de diferentes buscadores y bases de datos se realizó una recopilación bibliográfica de diferentes tecnologías utilizadas para la remoción de metales pesados en diferentes fuentes hídricas; a continuación, se pueden observar algunas de ellas en los cuadros 40, 41 y 42 y las otras se encuentran en los anexos A, B, C, D, E, F, G, H, I, K.

Cuadro 40. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 1.

Título del estudio: EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD BIOSORBENTE DE LA CÁSCARA DE NARANJA Y ESPIGA DE ARROZ PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO INORGÁNICO EN SOLUCIÓN ACUOSA
Autor o autores: Llamuca, J. P. 2018.
Tecnología aplicada: BIOSORCIÓN
Tipo de documento: Trabajo de Grado X Artículo ___ Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Los biosorbentes utilizados fueron cascaras de naranja y espiga de arroz, tamiz de 40mm y 850µm de diámetro, gravilla, nitrato de mercurio, agua destilada, ácido nítrico, plancha de calentamiento, molino industrial, vidrios, tubos de PVC de ½", válvula de ½", recipiente plástico de 5L, estructura metálica de acero, codos de ½".
Dónde se hizo la Aplicación: En campo ___ En laboratorio: X Información teórica___ Otro __ **Descripción de la aplicación:** El primer paso fue la construcción del biofiltro, luego la recolección de los biosorbentes para ser cortados en fracciones de 5cm, se lavaron para eliminar impureza, las fracciones fueron llevadas a un horno de laboratorio a 60°C por 24h, después de estar secas, se trituraron y tamizaron para así obtener la biomasa. Después de obtenida la biomasa se pesaron 12,5 g de cada biosorbentes para ser llevados al biofiltro. Por último, se evaluó el porcentaje de remoción en una solución de mercurio inorgánico con una concentración inicial de 408,25mg/L y pH de 3,24, donde se obtuvo un porcentaje de remoción de 22,06% lo que

.

equivale 318.21 mg/L con una absorción de 0.36016 mg/g, en un tiempo de 40 minutos, aquí se tuvieron en cuenta la temperatura, pH, tiempo de retención y granulometría, en cuento a las unidades de análisis se contaron con 12 para efectividad del procedimiento.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación: **CRITERIO** **CALIFICACIÓN** Facilidad de instalación 5.0 Facilidad en funcionamiento 5.0 % remoción 3.0 Costos 4.0 Necesidad de terreno 5.0 Generación y Gestión de residuos 4.0 Favorabilidad ambiental 5.0 **CALIFICACIÓN TOTAL** **4,4**

Cuadro 41. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 2

Título del estudio: REVISIÓN DE LA LITERATURA ACTUAL SOBRE LOS REACTORES SOLARES QUE UTILIZAN LA FOTOCATÁLISIS PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO A TRAVÉS DEL TiO_2
Autor o autores: Duarte, D. A. & Peñaranda, H. D. 2020.
Tecnología aplicada: FOTOCATÁLISIS
Tipo de documento: Trabajo de Grado __ Artículo _X_ Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Celdas solares o fotoceldas, TiO_2.
Dónde se hizo la Aplicación: En campo ___ En laboratorio: ___ Información teórica _X_ Otro __ **Descripción de la aplicación:** Se utiliza el sol como fuente de energía, la tecnología fotovoltaica convierte la luz solar en energía, para el tratamiento de aguas contaminadas se ha utilizado la fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio, donde se puede disminuir la concentración de mercurio en disoluciones acuosas desde 100 ppm hasta 100 ppb, y el mercurio que se elimina es convertido en mercurio metálico y calomelano quedando sobre la superficie del catalizador y este puede ser recuperado fácilmente.

.

Criterios de evaluación:	
Evaluación con respecto a criterios de evaluación:	
CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	4.0
% remoción	4.0
Costos	3.0
Necesidad de terreno	3.0
Generación y Gestión de residuos	4.0
Favorabilidad ambiental	4.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.7**

Cuadro 42.Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 3

TÍTULO DEL ESTUDIO: ELIMINACIÓN DE MERCURIO DE SISTEMAS ACUOSOS UTILIZANDO NANOPARTÍCULAS COMERCIALES Y ÓXIDO DE METAL PREPARADAS PARA LABORATORIO
Autor o autores: Ishan, D. 2009.
Tecnología aplicada: NANOTECNOLOGÍA
Tipo de documento: Trabajo de Grado _X_ Artículo ___ Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Se utilizaron nanopartículas (CuO, TiO_2, Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3, tampones químicos (búfer), reactor discontinuo, mercaptooctano, equipo de fluorescencia de rayos X, resina, $NaHCO_3$,tubos de ensayo, agitador químico, espectrofotómetro de absorción atómica de vapor frio,
Dónde se hizo la Aplicación: En campo ___ En laboratorio: _X_ Información teórica __ Otro __ **Descripción de la aplicación:** Para la realización de esta tecnología se prepararon 2g/L de cada nanoparticula mencionadas en los materiales y resina tanto en agua nanopura (solución no tamponada) y agua nanopuratamponada con $NaHCO_3$. Luego se preparó una solución de 200 ppb de Hg^{2+} tanto en tampón como en solución no tamponada, para mezclar una alícuota de 5ml de solución de nanoparticulas individuales con 5ml de solución de Hg para crear una reacción sin tampón y con tampón en recipientes con 1g/L y una concentración de 100 ppb de Hg. Cada mezcla de nanoparticulas/mercurio se vertió en tubos de ensayos y se colocaron en un agitador durante 24h, para poder evaluar la remoción de Hg, los tubos se colocaron en una microcentrífuga y se agitaron durante 40min a 16.000

.

rpm. Después el sobrenadante de cada tubo se tomó y se analizó por medio de un espectrofotómetro de absorción atómico de vapor frio, para medir la concentración de Hg antes y después de la reacción.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación: **CRITERIO** — **CALIFICACIÓN** Facilidad de instalación — 3.0 Facilidad en funcionamiento — 4.0 % remoción — 5.0 Costos — 2.0 Necesidad de terreno — 4.0 Generación y Gestión de residuos — 4.0 Favorabilidad ambiental — 4.0 **CALIFICACIÓN TOTAL** — **3.7**

Fuente: Elaboración propia

6.3.2. Fichas técnicas

Para la realización de las fichas técnicas con las diferentes tecnologías se tuvo en cuenta la calificación total de los artículos y trabajos de grado presentados en el punto anterior, donde se escogieron las que obtuvieran una calificación de 3,5 hasta 5,0, la cual se puede observar en el cuadro 43. Posteriormente se investigaron en diferentes plataformas y bases de datos acerca de la tecnología seleccionada para recopilar información y poder construir la ficha, esta información se basaba en definir el objetivo, quien era el autor o autores, en donde se realizó, descripción de la aplicación, funcionamiento, ventajas y desventajas. A continuación, se presentan las diferentes tecnologías:

Cuadro 43. Calificación de tecnologías

TECNOLOGÍA	CALIFICACIÓN TOTAL
Biosorción	4,4
Fotocatálisis	3,7

.

Nanotecnología	3,7
Electrocoagulación	3,9
Ficorremediación	3,4
Sistemas Bioelectroquímicos	4,3
Precipitación química	4,3
Adsorción	3,4
Filtración por membranas	3,9
Fitorremediación	3,3
Humedales artificiales	3,4
Procesos de oxidación Fenton	3,7
Hidrolisis acida	3,4

Fuente: Elaboración propia

Ficha 1. Tecnología Bioadsorción

N°1	Tecnología: BIOADSORCIÓN
Objetivo: Esta tecnología consigue eliminar, retener o captar agentes contaminantes por medio de biomasa (viva o muerta), a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico	
Tipo: Fisicoquímico	
Descripción: Es un proceso pasivo que involucra una fase sólida y otra liquida en donde se refiere al sorbente y solvente respectivamente, lo más común es que el solvente sea agua. Esta tecnología busca establecer un equilibrio químico entre el sorbato disuelto y el sorbato enlazado al sólido, ya permite la captación activa o pasiva de iones metálicos, esto gracias a las propiedades de tiene la biomasa para enlazar y acumular contaminantes por medio de diferentes mecanismos.	
Funcionamiento: Esta tecnología sucede de dos maneras, una rápida que es donde se produce una adsorción tipo físico en la superficie del material biológico inerte; y la segunda que es más lenta se lleva a cabo por procesos químicos en la superficie del material. Dentro de estos procesos químicos se	

.

engloban la precipitación química, el intercambio iónico, la quelación y la hidrolización. Existen dos modalidades de trabajo en la bioadsorción, en discontinuo o "*batch"* y en continuo o "en columna"	
Ventajas: • Son muy útiles presentan buenos rendimientos de forma económica comparado con técnicas como la precipitación química y la separación por membranas • Presentan diferencias en las columnas de bioadsorbentes frente a las de cambio iónico, teniendo en cuenta que el relleno, es un desecho de alguna industria, reutilizado para la descontaminación, y que es 100% biodegradable. • Además, las resinas sintéticas tienen un coste de producción más elevado y no son biodegradables. • Proceso reversible. • Son muy rápidos y eficientes en la remoción de metales; la biomasa se comporta como un intercambiador de iones.	**Desventajas:** • El pH es uno de los parámetros que más influye en este proceso, debido a que tiene influencia sobre el grado de ionización. • Aunque no se tiene una regla general para todas las sustancias, se estudia un rango de valores entre los cuales la eficacia de la bioadsorción es la máxima. • Se aumenta el proceso cuando disminuye la temperatura ya que se tratan de reacciones normalmente exotérmicas, de todas formas, los efectos de este parámetro son mínimos debido a que las variaciones de entalpía en la adsorción no son muy grandes. • Se puede presentar una eliminación de metales incompleta, generando lodos tóxicos y otros productos de desechos que requieren eliminación más rigurosa.

Fuente: Elaboración propia

.

Ficha 2. Tecnología Celda de Combustible Microbiana (CCM)

N°2	Tecnología: CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA (CCM)
Objetivo: Esta tecnología se basa en usar un sistema bioelectroquimico que permite que los microorganismos que actúan en procesos biológicos no solo biodegraden la materia orgánica de las aguas residuales, sino que también se pueda producir electricidad (bioelectricidad). De esta manera, se consiguen sustituir los sistemas basados en tratamientos biológicos que consumen mucha energía por un nuevo proceso con eficiencias similares en eliminación de residuos, pero además con un saldo energético positivo y un menor coste económico de operación, convirtiendo la energía química en energía eléctrica.	
Tipo: físico, químico y eléctrico	
Descripción: Son sistemas bioelectroquímicos capaces de digerir un amplio rango de sustancias orgánicas, incluyendo diferentes tipos de aguas residuales, y generar energía eléctrica en ese proceso de digestión. En el caso de aguas residuales se reduce la demanda química de oxígeno del agua. Su principal producto gaseoso es el dióxido de carbono, es un proceso pasivo por lo cual elimina el consumo energético. En el sistema se presentan reacciones de oxidación de materia orgánica en el ánodo y reducción de un oxidante (e.g. oxígeno) en el cátodo.	
Funcionamiento: La celda está compuesta por 2 cámaras separadas, una anaerobia y otra aerobia, donde se ubican el ánodo y el cátodo respectivamente, se utilizan bacterias para catalizar la oxidación de los sustratos que se encuentran en el agua, generando electrones que son transferidos al ánodo, donde en la cámara anódica todos los contaminantes orgánicos presentes en el agua residual pueden potencialmente ser oxidados por los microorganismos presentes y actuar como dadores de electrones para el circuito de la pila.	
Ventajas: • Responden a bajas	**Desventajas:** • Esta tecnología no ha sido usada

.

concentraciones de materia orgánica y a bajas temperaturas más eficazmente que la digestión anaerobia no electrogénica. • Genera menor cantidad de fangos con el consiguiente ahorro en costes que el tratamiento y eliminación de éstos ocasionan. • Aumentan la velocidad de depuración (velocidad de digestión de la materia orgánica contaminante) del agua y reducir (por la generación de electricidad) de aporte externo de energía necesario para los distintos procesos de depuración	para fines industriales a escala piloto, sigue en investigaciones y estudios**.** • Se generan lodos. • Los factores ambientales afectan la generación de electricidad respecto a las interacciones electroquímicas entre las bacterias y los electrodos, en el desarrollo de la biopelícula, crecimiento bacteriano, en la actividad y transporte de electrones y protones.

Fuente: Elaboración propia

Ficha 3. Tecnología Fotocatálisis

N°3	Tecnología: FOTOCATÁLISIS
Objetivo: Consiste en la destrucción de los contaminantes mediante el empleo de radiación solar ultravioleta y catalizadores con el objeto de formar radicales hidroxilos, los cuales posteriormente tendrán un efecto oxidante sobre los contaminantes químicos.	
Tipo: Químico	
Descripción: Esta tecnología permite la inhibición de los procesos de recombinación y promoción de los procesos de migración; debido a que son estos últimos los que después de una cadena de reacciones terminan oxidando la materia orgánica. La fotocatálisis se considera la aceleración de una fotorreacción mediante la presencia de un catalizador, donde el catalizador activado por la absorción de la luz acelera el proceso	

.

interaccionando con el reactivo a través de un estado excitado o bien mediante la aparición de pares electrón-hueco si el catalizador es un semiconductor (e- y h+).	
Funcionamiento: La fotocatálisis heterogénea tiene como base la irradiación de una superficie de un semiconductor que con una longitud de onda específica genera vacíos de pares de electrones los cuales antes de recombinarse promueven reacciones de óxido-reducción con la sustancia absorbida en la superficie (Generalmente dióxido de titanio: TiO2) sobre el sustrato para evadir la fluidización del polvo y una etapa de para recuperación del fotocatalizador de la corriente ya sea de aire o de agua.	
Ventajas: • La fotocatálisis con TiO2 ha atraído como método promisorio en la tecnología de tratamiento de aguas por su poder para descomponer contaminantes, tener de bajo costo y ser amigable con el medioambiente. • La fotocatálisis heterogénea a diferencia de la mayoría de los procesos fisicoquímicos, no es selectiva y puede emplearse para tratar mezclas complejas de contaminantes	**Desventajas:** • El bajo pH requerido (menor que 3, para evitar la precipitación de hidróxidos de hierro) y la necesidad de separar el hierro después de concluida la reacción

Fuente: Elaboración propia

Ficha 4. Tecnología Electrocoagulación

N°4	Tecnología: ELECTROCOAGULACIÓN
Objetivo: Permite la eliminación de contaminantes (aceites y grasas, metales pesados, coloides, moléculas orgánicas, color, etc.) en suspensión, disueltos o emulsionados de aguas residuales muy diversas, procedentes de las	

.

industrias galvanoplástica, alimentaria, del papel, de la piel, siderúrgica, textil, así como también lavanderías y plantas de producción de agua para el consumo humano entre otras.	
Tipo: Electroquímica	
Descripción: Se comporta como un proceso que emplea los fundamentos de la electroquímica, la coagulación y flotación o precipitación, para eliminar los contaminantes del agua con el uso de electrodos (cátodos y ánodos), que por acción de un potencial de energía generan un coagulante, el cual lleva a la coagulación in situ. Además, este proceso ha demostrado tener alta eficiencia en la remoción de metales pesados, minimizando la generación de residuos secundarios y por ende el impacto ambiental del proceso.	
Funcionamiento: El uso de esta clase de tecnología implica utilizar un reactor de electrocoagulación, este equipo se puede considerar como una celda electrolítica cuyos elementos conductores de corriente o electrodos (ánodos o electrodos de trabajo y cátodos o electrodos inertes), son sumergidos en el fluido a tratar, que contiene los metales o sustancias que van a ser retirados y que es aprovechado como medio electrolítico. Los reactores pueden ser en modo discontinuo o continuo.	
Ventajas: • Presenta una mayor eficiencia, que se debe a que los cationes generados presentan mayores porcentajes de remoción frente a los provenientes de productos químicos tradicionales como el sulfato de aluminio o hierro. • El uso de equipos pequeños es posible obtener costos razonables de funcionamiento, posible automatización y menor generación de sales y residuos. Es	**Desventajas:** • Es necesario reponer los electrodos de sacrificio. • Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado. • Puede ser un tratamiento costoso en regiones en la cuales el costo de la energía eléctrica sea alto. • El óxido formado en el ánodo

.

posible fabricar los equipos para realizar estos procedimientos a nivel de laboratorio.	puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

Fuente: Elaboración propia

Ficha 5. Tecnología Nanotecnología

N°5	Tecnología: NANOTECNOLOGÍA
Objetivo: Busca eliminar eficazmente contaminantes y gérmenes, ofreciendo mayor efectividad debido al gran área superficial que abarcan, en comparación con otros métodos de tratamiento que son más costosos y demandan mayor energía.	
Tipo: biológico, tecnológico	
Descripción: Esta tecnología utiliza membranas con poros pequeños menores a un nanómetro, la cual requiere presiones de funcionamiento. Las nanoparticulas son partículas con una dimensión en el rango de 1-100 nm. Por lo tanto, las nanoparticulas pueden ser transportadas efectivamente por el flujo de agua subterránea, Las membranas empleadas en nanofiltración tienen la capacidad de retener especies neutras con un peso molecular entre 200 a 300 g/mol, y también posee la capacidad de rechazar iones inorgánicos.	
Funcionamiento: Utiliza un mecanismo de exclusión por tamaño en combinación con interacciones electroestáticas entre los iones y la membrana cargada presenta un mayor rechazo de iones divalentes y menor rechazo de iones monovalentes, la presión de funcionamiento es más baja, posee un mayor flujo y un menor consumo de energía en comparación con la osmosis inversa	
Ventajas: • Puede reducir el número de pasos,	**Desventajas:** • Inicialmente la nanotecnología

.

materiales y energía requerida para purificar el agua, haciendo más fácil la implementación. • Los contaminantes pueden ser removidos de forma más efectiva, incluso en pequeñas concentraciones debido a la mayor especificidad de nanotecnología y el desarrollo de "inteligente “filtros adaptados para usos específicos. • Las aplicaciones de los nanomateriales son cada vez de mayor interés investigativo como alternativa al carbón activado para la eliminación de metales del agua por adsorción, principalmente para el cromo, cadmio, mercurio, zinc, arsénico y cobre.	requiere de mucha inversión en investigación

Fuente: Elaboración propia

Ficha 6. Tecnología Precipitación química

N°6	Tecnología: PRECIPITACIÓN QUÍMICA
Objetivo: Retener la mayoría de los metales de las aguas residuales y algunas especies aniónicas como sulfato y fluoruro.	
Tipo: Químico	
Descripción: Es una técnica muy efectiva y ha sido la más aplicada para eliminación de metales al tratarse de una tecnología sencilla y barata. La precipitación química es un tratamiento que comprende tres fases: coagulación, floculación y sedimentación.	
Funcionamiento: Las especies metálicas se precipitan variando el pH del medio, normalmente por adición de algún compuesto químico, quedando	

.

como residuo un lodo cargado con el metal que se puede separar por sedimentación o filtración. Las precipitaciones químicas más utilizadas son las que implican formación de un hidróxido o un sulfuro. Donde las fuerzas entre las partículas de los contaminantes se debilitan o eliminan mediante la adición de productos químicos**,** permitiendo la interacción de partículas mediante el movimiento molecular y la agitación física.	
Ventajas: • Esta tecnología permite disminuir costos en equipos e infraestructura al evitar una segunda etapa de precipitación química con el beneficio adicional de reducir el tiempo total de tratamiento.	**Desventajas:** • La necesidad de añadir compuestos químicos de forma precisa, la eliminación del metal no siempre alcanza los mínimos requeridos por las regulaciones medioambientales y es necesario tratar el lodo cargado de metales obtenido como residuo. • Esta tecnología también se ha desarrollado combinada con otras como la nanofiltración o el intercambio iónico para mejorar su eficacia.

Fuente: Elaboración propia

Ficha 7. Tecnología Filtración por membrana

N°7	Tecnología: FILTRACIÓN POR MEMBRANA
Objetivo: Atrapar en la superficie de la membrana microorganismos cuyo tamaño es mayor que el tamaño del poro 0.45 µm, esto gracias a que una bomba eléctrica ejerce una presión diferencial sobre la muestra de agua haciendo que se filtre	
Tipo: biológico	

.

<table>
<tr><td colspan="2">Descripción: Una membrana es una barrera al flujo de material en suspensión o material coloidal que se encuentra en disolución en un solvente. Representa un importante tratamiento del agua, gracias a su alto potencial de remoción y bajo costo. Además, hay muy pocos contaminantes del agua que no pueden ser removidos por procesos de membrana y el costo de este tratamiento aumenta a medida que decrece el tamaño del soluto removido.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Funcionamiento: Su funcionamiento se basa en el principio de la filtración tangencial que limita la colmatación de los poros, la colmatación se refiere a la absorción de macromoléculas con el contacto de la membrana, obstrucción mecánica de poros cuando las dimensiones de las moléculas del soluto son cercanas a la de los poros y a la formación de un gel con el aumento de la concentración del soluto en contacto con la membrana.</td></tr>
<tr><td>Ventajas:
• El agua de alimentación fluye tangencialmente en forma continua.
• El filtrado se obtiene bajo el efecto de un gradiente de presión a través de la membrana.
• Se presenta un barrido continuo de la membrana evitando la formación de depósitos, volviendo el proceso continuo.
• La colmatación es lenta y la limpieza tienda hacer más sencilla</td><td>Desventajas:
• Rápida formación de depósitos, generando colmatación en las membranas.
• El proceso se vuelve discontinuo, por lo que se debe detener el proceso para realizar la limpieza de la membrana</td></tr>
</table>

Fuente: Elaboración propia

.

Ficha 8. Tecnología Proceso de oxidación Fenton

N°8	Tecnología: PROCESO DE OXIDACIÓN FENTON
Objetivo: Degradar parcial o total de contaminantes inorgánicos y orgánicos persistentes, dando lugar a una disminución de la toxicidad del agua.	
Tipo: Químico	
Descripción: El proceso fenton representa un cambio estructural de los compuestos orgánicos que posibilitan un eventual tratamiento biológico posterior, se produce una oxidación parcial que redunda en una disminución de la toxicidad del efluente, y/o una oxidación total de los compuestos orgánicos en sustancias inocuas que posibilitan una descarga segura del efluente sin necesidad de un tratamiento posterior.	
Funcionamiento: Este proceso consiste en la adición de sales de hierro en presencia de H_2O_2 , en medio ácido, para la formación de radicales °OH. A la combinación de H_2O_2 y sales de hierro se denomina reactivo Fenton, al formarse radicales °OH, se generan radicales perhidroxilo (HO_2°), los cuales inician una reacción de oxidación en cadena para eliminar la materia oxidable. Típicamente a presión atmosférica y temperatura entre 20 °C y 40 °C. Las condiciones óptimas del reactivo Fenton se obtienen con valores ácidos de pH y con ellas se pueden alcanzar altas remociones de los contaminantes orgánicos.	
Ventajas: • El Fe (II) es abundante y no tóxico. • El peróxido de hidrógeno es fácil de manejar y ambientalmente benigno. • No se forman compuestos clorados como en otras técnicas oxidantes, y no existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo.	**Desventajas:** • Requiere la adición continua y estequiométrica de Fe (II) y H_2O_2, es decir, necesita una alta concentración de Fe. Sin embargo, debe tenerse en cuenta siempre que un exceso de Fe (II) puede causar condiciones para el atrapamiento de HO•

.

• El diseño de reactores para la aplicación tecnológica es bastante sencillo	

Fuente: Elaboración propia

6.3.3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

Las fichas presentadas representan alternativas y estrategias a utilizar en lugares donde se ha presentado algún tipo de contaminación por algún metal pesado o algún vertimiento de tipo doméstico o industrial.

Estas tecnologías pueden ser de tipo químico, físico, biológico, eléctrico, mecánico, o una combinación de varias tecnologías donde se genera una mejor remoción del contaminante.

Se puede observar que a lo largo del tiempo han venido surgiendo diferentes tecnologías desde lo más simple hasta lo más complejo, algunas muy accesibles en cuanto a costos pero otras muy efectivas que resultan ser muy costosas en su puesta en marcha.

En la actualidad la Universidad del Valle con sede en el municipio de Santiago de Cali, ha venido adelantado investigaciones sobre sistemas bioelectroquímicos, utilizando Celdas de Combustible Microbianas logrando remociones de hasta un 90% teniendo como prueba piloto el campus Meléndez.

La fotocatálisis como método de eliminación de cianuro y mercurio en aguas contaminadas en Colombia, se ha posicionado como una alternativa a comparación de otras tecnologías porque es más eficiente y económica, esta se logra aplicando fotocatálisis con TiO_2.

.

Las tecnologías que utilizan plantas o algunos microorganismos suelen ser muy eficientes y de bajo costo, pero la eliminación de los residuos que quedan en las paredes de las especies se convierte en otro problema, por motivos como este se sugieren tecnologías con otro tipo de técnicas para no generar residuos contaminados y de fácil disposición.

.

7. CONCLUSIONES

- Se elaboró un diagnóstico de las diferentes fuentes hídricas que existen en Colombia, donde de acuerdo al DANE se encuentran registradas 305 fuentes hídricas divididas en 5 cuencas hidrográficas, donde el 37,4% (114) corresponde a fuentes afectadas por vertimientos de mercurio al suelo y agua.

- El área hidrográfica que más alteración presenta es la Pacífica, por lo cual se hace necesario, promover tecnologías que contrarresten la alteración y contribuyan a la conservación de los recursos hídricos.

- En Colombia el 59% (19) de los departamentos son productores de oro, y 296 municipios son los causantes de verter aproximadamente 205 toneladas de mercurio en diferentes ríos.

- En la recopilación de documentos sobre la contaminación de fuentes hídricas por vertimientos de mercurio, se pudo establecer que a lo largo de los años se han venido adelantando estudios y análisis que abarcan no solo las afectaciones a fuentes hídricas, sino también los problemas en la salud por ingesta de peces contaminados y la inhalación de vapores de mercurio lo cual afecta los diferentes sistemas del cuerpo humano.

- Se identificaron las diferentes etapas y actividades que se desarrollan a través de la actividad minera considerando la amalgamación y separación en retorta de oro y mercurio como uno de los procesos que más afecta el medio ambiente.

- Se elaboró la matriz de identificación y valoración de impactos ambientales y se determinó que el recurso hídrico es donde mayor alteración se presenta, seguido de la población existente en el área de influencia.

.

- Se identificaron diferentes tecnologías utilizadas para disminuir los impactos ambientales a causa de los vertimientos de mercurio en las fuentes hídricas algunas de ellas son: la fotocatálisis, fitorremediación, electrocoagulación, filtración por membranas, la nanotecnología, humedales artificiales, entre otros.

- Las tecnologías con mayor aceptación teniendo en cuenta una calificación por medio de criterios de evaluación fueron la biosorción, precipitación química y los sistemas bioeléctricos. Estas son tecnologías que se han utilizado en diversos lugares presentando valores de remoción altos, los cuales las hace interesantes a la hora de definir qué tipo de alternativa se puede poner en marcha.

.

8. RECOMENDACIONES

- Es de gran importancia seguir realizando trabajos de investigación donde se actualice información sobre las afectaciones que causan los vertimientos de mercurio en todo el territorio nacional e internacionalmente, para promover prácticas ambientales encaminadas a evitar que se deterioren las fuentes hídricas.

- Generar conciencia ambiental, con el cumplimento de las normativas planteadas para disminuir el grado de contaminación y las afectaciones al medio ambiente.

- Cumplir y hacer seguimiento a los Planes de Manejo Ambiental - PMA presentados para la disminución de impactos ambientales presentados durante la ejecución de un proyecto minero a través de licencias ambientales.

- Generar mayor participación por parte de las autoridades ambientales y gubernamentales favoreciendo el cuidado y preservación de los recursos naturales.

- Asegurar el cumplimiento de las condiciones de seguridad ocupacional en que laboran los trabajadores en la actividad minera.

- Hacer cumplir la normativa legal vigente para evitar la contaminación de los recursos naturales, siendo más estrictos a la hora de otorgar licencias ambientales para los títulos mineros.

- Implementar procesos y programas de producción más limpia, por ejemplo buscar reemplazar la amalgamación en el proceso de extracción del mineral.

.

- Actualizar las guías minero ambiental expedidas por el Ministerio de Minas y Energía.

- Identificar la población afectada en el área de influencia donde se desarrollan proyectos mineros y realizar estudios de toxicidad por ingesta de alimentos contaminados o inhalación de vapores de mercurio.

.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACOSTA, D. 2015. *Impactos ambientales generados por el uso de mercurio en la minería aurífera ilegal. Caso de estudio: Valle del Cauca*. Universidad del Valle. [En línea]. Santiago de Cali. [Citado el 23 de abril de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/282219805_Impactos_ambientales_generados_por_el_uso_del_mercurio_en_la_mineria_aurifera_ilegal_Caso_de_estudio_Valle_del_Cauca
2. AL HAMOUZ, O. et al. 2017. *Removal of cadmium ions from wastewater by dithiocarbamate functionalized pyrrole based terpolymers,* Sep. Purif. Technol., vol. 177, pp. 101–109
3. AMABILIS, L. et al. 2015. *Remoción de mercurio, cromo y plomo por humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes.* Tecnol. cienc. Agua. 2015, vol.6, n.2, pp.21-34. ISSN 2007-2422.
4. APPEL, P and NA-OY, L. 2014. *The Borax Method of Gold Extraction for small-Scale Miners*. Blacksmith Institute Journal of Health & Pollution, vol. 2, n°3. [Citado el 12 de enero de 2021]. Disponible en: http://meridian.allenpress.com/doi/pdf/10.5696/2156-9614-2.3.5.
5. AQUAE FUNDACION. 2020. *Principales datos del agua en el mundo.* [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: https://www.fundacionaquae.org/principales-datos-del-agua-en-el-mundo/
6. ARCTIC MONITORING AND ASSESSMENT PROGRAMME, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. 2013. *Technical background report for the global mercury assessment*
7. AUGUSTINI, E. et al. *Remediación biológica de mercurio: Recientes avances. Argentina.* Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal 3(2):119-146
8. BENITEZ, Y. 2017. *Estado del arte en métodos 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. Disponible en: http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1785/Yeison%20Javier%2 0Benitez%20Caicedo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
9. BENTO, F. et al. 2003*. Bioremediation of soil contaminated by diesel oil.* Brazilian journal of Microbiology, vol.34 (1), pp. 65-68.
10. BERRIO, L. et al. 2012. *Sistemas De Tratamiento Para Residuos Líquidos Generados En Laboratorios De Análisis Químico.* Gestión y Ambiente, 15(3), 113- 124. Recuperado de: https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36285/43153

.

11. BORJA, N. 2015. *Estudio de la cinética de biosorción en plomo (II) en Alga Ascophyllum Nodosum.* Rev Soc Quím Perú. 81(3).
12. BUSTAMANTE, E. 2011. *Adsorción de metales pesados en residuos de café modificados químicamente*.Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en http://eprints.uanl.mx/*2323/1/1080223849.pdf*
13. CANCILLERÍA DE COLOMBIA*. Convenio de Minamata sobre el mercurio*. [En línea]. Colombia 2017. [Citado el 1 de mayo de 2020]. Disponible en: https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2019/C-275-19.htm
14. CANO, S. 2012. *Contaminación con mercurio por la actividad minera*. En: Biomédica, INS. Bogotá, D.C. Vol. 32. No 3. p. 1
15. CARTAYA, O. et al 2008. *Cinética De Adsorción De Iones Cobre (II) Por Una Mezcla De Oligogalacturónidos*. Rev. Iberoam. Polímero Vol. Iberoam. Polim, vol. 9, no. 95, pp. 473–479
16. CHAVEZ, C. 2011. *Detección de metales pesados en agua.* Tesis de grado maestro en ciencias en la especialidad de electrónico. Tonantzinla, Puebla. Instituto Nacional de Astrofísica óptica y electrónica.
17. CHAVEZ, G. 2018. Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas. La Paz, Bolivia. J. Selva Andina Res. Soc. 2018; 9(1):52-61.
18. CLEMENTE, A. et al. 2014. *Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen Petroquímico.* Medellín. Universidad de Antioquia. Ingeniería y Competitividad, volumen 16, n°2, p. 211 – 223
19. CONTRERAS, J. et al. 2004. *Determinación de metales pesados en aguas y sedimentos del río Haina.* Cienc. Soc., vol.29, n°. 1, pp. 38–71.
20. CORONA, L., & ITURBE, R. 2005. *Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos*. Redalyc, pp. 119-126. [Citado el 10 de enero de 2021]. Disponible en: http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2005.06n2.008
21. CORPORACIÓN RUTA N. 2016. *Observatorio CT+i: Informe No. 1 Área de oportunidad Nanotecnología para el tratamiento de aguas*. [Citado el 21 de enero de 2021]. Disponible en: www.brainbookn.com
22. CORPORACIONES AUTONOMAS REGIONALES; CORPORACION DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y AUTORIDADES AMBIENTALES URBANAS. 2018. *Plan de acción sectorial del mercurio*. [En línea]. Colombia. [Citado el 21 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/PLAN_NACIONAL_AMBIENTAL_MERCURIO.pdf
23. CORRALES, A. 2013. *ANALISIS Y EVALUACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA SOCIOAMBIENTAL OCASIONADA POR EL USO DEL MERCURIO EN LA MINERIA AURIFERA ARTESANAL EN COLOMBIA.* Tesis de grado

.

especialista en Gerencia Ambiental. Colombia. Universidad Libre: Instituto de posgrados ingeniería. 122p.

24. DEFENSORIA DEL PUEBLO. 2010. *La minería de hecho en Colombia*. Defensoría Delegada para los Derechos Colectivos y del Ambiente
25. DELGADILLO, A. et al. 2011. *Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación*. Tropical an subtropical agroecosystems. Recuperado: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci_arttext#t3
26. DESAI, I. 2009. *MERCURY REMOVAL FROM AQUEOUS SYSTEMS USING COMMERCIAL AND LABORATORY PREPARED METAL OXIDE NANOPARTICLES.*
THESIS MASTER OF SCIENCE. Universidad de Texas: Office of Graduate Studies, 44p
27. DI PAOLA, M., & VICIÉN, C. (S.F.). *Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación.* Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/262935161_Biorremediacion_vinculaciones_entre _investigacion_desarrollo_y_legislacion
28. DOADRIO, A. 2004. *Ecotoxicología y acción toxicológica del mercurio. Real Academia Nacional de Farmacia*. [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: http://www.analesranf.com/index.php/aranf/article/view/254/283
29. DORIA A.; DELUQUE V. 2015. *Niveles y distribución de metales pesados en el agua de la zona de playa de Riohacha, La Guajira, Colombia*. Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 6(1), 123 - 131. [Citado el 12 de septiembre de 2020] Disponible en: https://doi.org/10.22490/21456453.1268
30. DUQUE, G., COGUA, P. 2016. *mercurio en peces de la bahía de Buenaventura.* Ingenium, 10(29) 11-17. [En línea]. Colombia. [Citado el 23 de abril de 2020]. Disponible en: https://repository.usc.edu.co/bitstream/20.500.12421/794/1/MERCUR~1.PDF
31. ESTRADA, E. & SALAZAR, M. s.f. *Generación de Energía eléctrica a partir del tratamiento de aguas residuales por medio de bioceldas.* México. Informe final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
32. FAJARDO, C; PINZON, C. 2018. *Impacto del mercurio en los sistemas Colombianos y las técnicas aplicables para su remediación.* Colombia. Revista: ECAMPA, Vol. 2. Número 1.
33. FERNÁNDEZ, M. et al. (2018). Factores de mayor influencia en la adsorción de metales pesados por biomasa seca de Kluyveromyces Marxianus CCEBI 2011. *Tecnología Química*, *38*(2), 335-345. Recuperado en 15 de enero de 2021, de

.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200011&lng=es&tlng=es.

34. FRANCO, L. & RICAURTE, S. 2018. *EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DEL CAMPUS UNIVERSITARIO MELÉNDEZ.* Tesis de grado Ingeniero Ambiental y Sanitario. Universidad del Valle: Escuela de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, 70p.
35. FUNDACION PARA EL CONOCIMIENTO MADRID. 2013. *Humedales artificiales como sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Conceptos e historia.* [Citado el 3 de enero de 2021]. Disponible en: https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/05/16/131891#:~:text=Los%20humedales%20artificiales%20son%20zonas,procesos%20f%C3%ADsicos%2C%20biol%C3%B3gicos%20y%20qu%C3%ADmicos**.**
36. GAVIRIA, S. 2016. *También tenemos que hacer la paz con la naturaleza porque el mercurio sigue causando estragos*, DNP. [En línea]. Colombia. [Citado el 15 de abril de 2020]. Disponible en: https://www.dnp.gov.co/Paginas/%E2%80%9CTambi%C3%A9n-tenemos-que-hacer-la-paz-con-la-naturaleza-porque-el-mercurio-sigue-causando-estragos%E2%80%9D-Sim%C3%B3n-Gaviria-Mu%C3%B1oz.aspx
37. GEYMONAT, E. 2011. *Manejo Racional de Productos con mercurio*. Disponible en: http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/Tratamientot%C3%A9rmico-para-la-recuperaci%C3%B3n-de-mercurio-Diciembre-2011.pdf
38. GOBIERNO DE LA RIOJA. s.f. *Salud y metales pesados.* [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/calidad-aire-cambio-climatico/calidad-aire/red-biomonitarizacion-metales-pesados-rioja/salud-metales-pesados
39. GÓMEZ, W. et al. 2009. *Evaluación de la bioestimulación frente a la atenuación natural y la bioaumentación en un suelo contaminado con una mezcla de gasolina-diesel*. Dyna 76 (160), 83-93. Recuperado de: https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/13471/14378
40. GRACIA, L. 2010. *Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia.* Rev. Fac. Nac. Salud Pública 2010; 28(2): 118-124
41. GÜIZA, L. 2013. *LA PEQUEÑA MINERÍA EN COLOMBIA: UNA ACTIVIDAD NO TAN PEQUEÑA.* DYNA, [S.l.], v. 80, n. 181, p. 109-117. ISSN 2346-2183. [En línea]. Colombia. [Citado el 29 de abril de 2020]. Disponible en: https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/35819
42. IDEAM. 2019. *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: Ideam: 452 pp

.

43. IZQUIERDO, M. 2010. *Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso*
44. JARAMILLO, M. & VERA, S. 2012. *TRANSFORMACIÓN DE PET MEDIANTE HIDRÓLISIS ÁCIDA Y Bacillus subtilis PARA OBTENER MATERIALES CON CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE METALES PESADOS COMO COBRE Y MERCURIO.* Tesis de grado Ingeniero en Biotecnologia de los recursos naturales. Universidad Politecnica Salesiana, 92p.
45. JOHANSEN P. et al. 2007. *Acumulación humana de mercurio en Groenlandia*. Sci Total Environ 2007; 377: 173-178.
46. KEHRIG, H. et al. 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. [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/pdf/revbiolmar/v52n2/art04.pdf
47. LA ROTTA, A; TORRES, M. 2017. *Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá.* RIO DE JANEIRO, V. 41, N. 112, P. 77-91, JAN-MAR 2017
48. LINDBERG, S. et al. 2001 *Especies de mercurio metilado en muestras de gas de vertedero de desechos municipales en Florida, EE. UU*. Ambiente atmosférico 2001; 35: 4011-4015.
49. LITTER, M. s.f. Remoción de contaminantes. [Citado el 27 de diciembre de 2020]. Disponible en: metálicoshttps://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/12_capitulo_12.pdf
50. LONDOÑO, L. et al. 2016. *Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal,"* Biotecnología en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial, vol. 14, no. 2, p. 145.
51. LOREDO, J. et al. 2006. *Optimización del Proceso de Remoción de Metales Pesados de Agua Residual de la Industria Galvánica por Precipitación Química*. Inf. tecnol. vol.17, n.2, pp.33-42 [En línea]. [Citado el 12 de enero de 2021], Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200006&lng=es&nrm=iso>.
52. LUNA, K. 2019. *GESTIÓN DE RIESGO QUÍMICO Y ELABORACIÓN DEL MANUAL DE MANEJO SEGURO DE CLORO GAS PARA LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LA CIUDAD DE IBARRA EMAPA-I*. Tesis de grado Ingeniero Industrial. Ecuador: Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. 106 p.

.

53. MANCERA, N y ALVAREZ, R. 2006. *Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia*. En: Acta biol. Colombia. Vol. 11. No 1. p. 4.
54. MARTORELL J.J. 2010. *Biodisponibilidad de metales pesados en dos ecosistemas acuáticos de la costa Suratlántica andaluza afectados por Contaminación difusa.* Tesis Doctoral Universidad de Cádiz.
55. 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/
56. MENDEZ, R. et al. *Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton.* México. Ingeniería e Investigación, vol. 30, n°1, p 80-85.
57. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Resolución 2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.*
58. MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. 2015. *Evaluación de riesgo de mercurio en peces de aguas continentales en Colombia*. Bogotá, D.C. p. 10
59. MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. 2019. *Evaluación de los efectos en salud de la población vulnerable del territorio colectivo aires de Garrapatero, cuenca del río Cauca y microcuenca del río Teta Mazamorrero, expuesta a vertimientos contaminantes por explotación minera*. [En línea]. Colombia. [Citado el 3 de mayo de 2020]. Disponible en: https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_2_protocolo_de_estudio_de_la_propuesta.pdf
60. MINISTERIO DE SALUD. 2018. *Evaluación del grado de contaminación por mercurio y otras sustancias toxicas, y su afectación en la salud humana en las poblaciones de la cuenca del río Atrato, como consecuencias de las actividades de minería*. Bogotá. p. 10
61. MOHAN, D. et al. 2006. *Trivalent chromium removal from wastewater using low cost activated carbon derived from agricultural waste material and activated carbon fabric cloth*," J. Hazard. Mater., vol. 135, no. 1–3, pp. 280–295
62. MULLIGAN, CN & YONG & RN. 2004. *Natural attenuation of contaminated soils*. Environmental International, vol 30. pp. 587-601.
63. NAVARRO, M. 2007. *Determinación de Escherichia coli y coliformes totales en agua por el método de filtración por membrana en AGAR CHROMOCULT.* IDEAM, 17p.
64. OBSERVATORIO DE CONFLICTOS MINEROS DE AMÉRICA LATINA. 2018. *El preocupante hallazgo de mercurio en las aguas del río Cali.* [En línea]. Colombia. [Citado el 4 de mayo de 2020]. Disponible en:

.

https://www.ocmal.org/el-preocupante-hallazgo-de-mercurio-en-las-aguas-del-rio-cali/

65. OCAMPO, M. 2012. Estudio de remoción de mercurio de aguas residuales provenientes de un relleno sanitario. Tesis de maestría Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia: Facultad de ingeniería y arquitectura ,93p.
66. OLIVERO VERBEL, J. s.f. *Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana.* [En línea]. Colombia. [Citado el 2 de mayo de 2020] Disponible en: http://concienciaciudadana.org/wp-content/uploads/2017/06/Efectos-de-la-Miner%C3%ADa-en-Colombia-sobre-la-Salud-Humana-Jes%C3%BAs-Olivero-Verbel.pdf
67. 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. Disponible en: http://www.scielo.org.co/pdf/rfce/v24n2/v24n2a09.pdf
68. PAZ, J*. 2019. Calidad, abastecimiento y saneamiento: los grandes retos del agua en Colombia*. MONGABAY. [En línea]. Colombia. [Citado el 30 de abril de 2020]. Disponible en: https://es.mongabay.com/2019/03/colombia-estudio-nacional-agua-ideam/*Recursos Hídricos.* [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr/2019
69. REPORTE DE LA WWF. 2018. *Ríos Sanos, Gente Sana. Abordando la crisis del mercurio en la Amazonía.* [En línea] [Citado el 3 de mayo de 2020]. Disponible en: http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/wwf___rios_sanos_gente_san a_3.pdf
70. REYES, M. 2003. *Tratamiento de agua por filtración tangencial con membranas de cerámica. Monografía Licenciado en Química. Universidad Autónoma de Nicaragua. p. 81.*
71. ROCHA-ROMAN, L. et al. 2018. *IMPACT OF GOLD MINING ASSOCIATED WITH MERCURY CONTAMINATION IN SURFACE SOIL OF SAN MARTIN DE LOBA, SOUTH OF BOLIVAR (COLOMBIA)*. *Rev. Int. Contam. Ambient* [online]. vol.34, n.1 [citado 2020-05-12], pp.93-102. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-
72. RODRIGUEZ, P. & BARRERA, C. 2020. *Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento del agua.* Mexico. Universida Autonoma del Estado de Mexico. ISBN 978-607-633-188-0.
73. ROJAS, H. et al. 2012. *Aplicación del módelo de Bohart y Adams en la remoción de mercurio de drenajes de minería por adsorción con carbón activado*. Información tecnológica. Disponible en:

.

https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000300004&script=sci_arttext

74. ROMERO, A; VASQUEZ, J & GONZALEZ, A. 2012. *Bacterias, fuente de energía para el futuro. Colombia.* Tecnura, vol. 16, n°32, pp 118-143
75. SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL COLOMBIANO. s.f*. Calidad del Agua*. [En línea]. Colombia [Citado el 19 de abril de 2020]. Disponible en: http://www.siac.gov.co/calidadagua
76. SRIVASTAVA, S., & GOYAL, P. 2010. *Novel biomaterials: decontamination of toxic metals from wastewater: Springer Science & Business* Media.
77. TEJADA-TOVAR, C; VILLABONA-ORTIZ, A Y GARCÉS-JARABA, L. 2014. *Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico*. Tecno Lógicas, vol. 18, no. 34, pp. 109-123, 2015.
78. TOVAR, C.et al. 2012. *Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión.* Ingenium, 6(14), pp, 11-21.
79. UNESCO. 2019. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. [Citado el 12 de septiembre de 2020]. Disponible en: https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr/2019
80. VALDERRAMA, A. et al. 2014*. Study of physicochemical parameters for cadmium (ii) and mercury (ii) phytoremediation using the specie Eichhornia crassipes (water hyacinth).* Rev. Soc. Quím. Perú, vol.80, n.3 [citado 2021-01-22], pp.164-173.
81. VERA, J. 2016. *REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUAS CONTAMINADAS MEDIANTE MICROORGANISMOS TOLERANTES, UNA APROXIMACIÓN A LA BIORREMEDIACION MICROBIANA.* Tesis de grado Ingeniero Ambiental. Universidad Santo Tomás: Facultad de Ingeniería Ambiental, 64p
82. WEINBERG, J.2007. *Introducción a la contaminación por mercurio para las ONG*. IPEN. p. 14
83. WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2016. *Environmental and occupational health hazards associated with artisanal and small-scale gold mining*.
84. WU, C. et al. 2016. *Removal of trace-amount mercury from wastewater by forward osmosis.* J. Water Process Eng., vol. 14, pp.108–116
85. GONZÁLEZ, L. 2015. *Propuesta para la prevención y mitigación de la contaminación por la actividad minera de oro sobre el canal del dique.* Trabajo de Grado. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
86. ZAPATA, A. et al. 2018. *Estudio exploratorio de evaluación de riesgo en la salud de madres lactantes por consumo de pescado contaminado del río Cauca, en el Valle del Cauca (Colombia).* Ambiente y Desarrollo, *22*(43).
87. HERNANDEZ, O. et al. 2013*. Bioacumulación de mercurio en larvas de anuros en la zona afectada por la minería de oro en el río Dagua,*

.

Buenaventura, Valle del Cauca, COLOMBIA. Acta Biológica Colombiana, 18(2), pp 341-348.

.

ANEXOS

Anexo A. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 4

TÍTULO DEL ESTUDIO: ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL CENTRO POBLADO LA RINCONADA- PUNO
Autor o autores: Quispe, Q. K. 2015
Tecnología aplicada: ELECTROCOAGULACIÓN
Tipo de documento: Trabajo de Grado _X_ Artículo ___ Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Matraces volumétricos de 100, 500 y 1000 mL, erlenmeyers de 25, 50, 100, 250, 500 y 1000 mL, pipetas de 1, 2, 5 y 10 mL, embudos de vidrio, termómetro, papel filtro Whatman N° 42, soporte de embudos, pinzas y soporte universal, frasco lavador, cronometro, placas de aluminio y placas de acrílico, Balanza digital, potenciómetro, conductímetro, espectrofotómetro UV/Visible, fuente de poder (30 V – 3A) y multímetro digital, $HgCl_2$, HCl, H_2SO_4, rodamina B, tiocianato de amonio, alcohol polivinílico, NaOH, NaCl, agua destilada y solución Buffer pH 4, 7 y 10.
Dónde se hizo la Aplicación: En campo: X En laboratorio X Información teórica __ Otro __ **Descripción de la aplicación:** Para esta tecnología se construyó una celda de electrocoagulación con 3 zonas (depósito de lodos y espumas, zona de flotación y sedimentación), la cantidad de muestra en volumen fueron 40L de agua residual. Primero se realizó una caracterización previo donde se midieron diferentes parámetros (pH, conductividad, dureza, cloruros, sulfatos, Ca, Mg), se le añadió NaCl a las muestras para ser colocadas en los electrodos de aluminio de la celda, se encendió la fuente de poder a una corriente establecida por estudios previos, al culminar el proceso de electrocoagulación se apagó la fuente y se retiraron los electrodos dejándolos reposaran 30 minutos mientras los sólidos suspendidos se sedimentaran, por último se realiza la filtración para posteriormente hacer la cuantificación y el análisis por medio del espectrofotómetro y la curva de calibración.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	4.0
% remoción	5.0
Costos	2.0

.

Necesidad de terreno	5.0
Generación y Gestión de residuos	3.0
Favorabilidad ambiental	4.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.9**

Fuente: Elaboración propia

Anexo A. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 5

TÍTULO DEL ESTUDIO: REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUAS RESIDUALES DE LA ACTIVIDAD MINERA CON EL USO DE MICROALGAS

Autor o autores: Guaman, M., González, N. & Vela, N. 2019

Tecnología aplicada: FICORREMEDIACIÓN

Tipo de documento: Trabajo de Grado _X_ Artículo ___ Otro ___

Descripción de materiales y funcionamiento:

Cepas de microalgas (*Pleurococcus sp., Scene desmus sp., Chlorella sp.*), agua destilada, fotobioreactores, cámara de Neubaver, multiparámetro, ácido nítrico, test nanocolor n

° (0-80, 0-87, 0-86, -064), microscopio, agitador, nitrofoska (nutriente), fotómetro.

Dónde se hizo la Aplicación:

En campo: X En laboratorio X Información teórica __ Otro __

Descripción de la aplicación:

Para esta tecnología se realiza la toma de la muestra de agua residual para su posterior análisis físico químico donde se midieron diferentes parámetros (pH, Hg, SO_4, NO_3, PO_4), para la implementación del sistema de tratamiento del agua se procedió a la recolección de las cepas de microalgas, estas fueron cultivadas, nutridas y cuidas para que estuvieran en condiciones óptimas, luego se realizó un ensayo de tratabilidad de Hg para ver la tolerancia de las microalgas al Hg, se procedió a la identificación de las especies (*Pleurococcus sp., Scene desmus sp., Chlorella sp.*), para después poner en marcha la etapa de tratamiento, donde se ensamblaron 4 fotobioreactores con las especies seleccionas y una mezcla de las 3 (consorcio), finalmente fueron filtradas con mallas de fibra de vidrio y con ayuda del fotómetro se obtuvieron los alores de absorbancia para cada concentración.

Criterios de evaluación:

Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	4.0
% remoción	3.0
Costos	4.0
Necesidad de terreno	3.0

.

Generación y Gestión de residuos	2.0
Favorabilidad ambiental	4.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.4**

Fuente: Elaboración propia

Anexo B. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 6

TÍTULO DEL ESTUDIO: BIORREMEDIACIÓN MEJORADA DE METALES PESADOS Y GENERACIÓN DE BIOELECTRICIDAD EN UN SEDIMENTO DE CÁTODO INTEGRADO POR MACRÓFITOS EN UNA PILA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA (MSMFC)

Autor o autores: Kabutey, F.T., Antwi, P., Ding, J., Zhao, Q. & Quashie, F. 2019.

Tecnología aplicada: CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

Tipo de documento: Trabajo de Grado ___ Artículo X Otro ___

Descripción de materiales y funcionamiento:

Limnobiumlaevigatum , Pistia stratiotes y Lemna minor, tamices, ánodos, catodos, recipientes para muestra, biorreactores de plástico, multímetro, bombas de aireación, placa de aqusicion de datos, computadora de escritorio, tampón quimico, solución de etanol, espectroscopio de plasma, microscopio eléctrico de barrido.

Dónde se hizo la Aplicación:

En campo __ En laboratorio X Información teórica __ Otro __

Descripción de la aplicación:

Se desarrolló y evaluó un nuevo biocátodo de macrófitos para la eliminación de metales y sustancias orgánicas y la generación de bioelectricidad por medio de un cátodo integrado por macrófitos, se utilizaron 5 biorreactores de plástico *in situ*, los sedimentos se exhibieron después de 120 días de operación, estos sedimentos fueron recolectados, tamizados y homogenizados mecánicamente. Las vías de eliminación de metales pesados y orgánicos incluyeron la reducción electroquímica, precipitación y recuperación, bioacumulación por macrófitas del agua superficial y reducción bioelectroquímica en el sedimento.

Criterios de evaluación:

Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	4.0
% remoción	4.0
Costos	3.0
Necesidad de terreno	4.0
Generación y Gestión de residuos	4.0
Favorabilidad ambiental	4.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.9**

.

Fuente: Elaboración propia

Anexo C. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 7

TÍTULO DEL ESTUDIO: SISTEMAS BIOELECTROQUIMICAS PARA UN TRATAMIENTO EFICIENTE DE RESIDUOS RECALCITRANTES
Autor o autores: Chen, C., Cheng, S. & Huang, L. 2010
Tecnología aplicada: SISTEMAS BIOELECTROQUIMICOS (BES)
Tipo de documento: Trabajo de Grado ___ Artículo X Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Los materiales que comúnmente se utilizan son: gratificado granulado, fibra de grafito, ánodos, cátodos, ánodos y cátodos recubiertos, papel carbón, tela de carbono, Pt, ánodo de fieltro de carbono mezclado.
Dónde se hizo la Aplicación: En campo: ___ En laboratorio ___ Información teórica: X Otro __ **Descripción de la aplicación:** Estos sistemas han surgido como una tecnología clave potencial para explorar la producción de electricidad, combustibles y productos químicos de aguas residuales renovables. Estos utilizan bacterias químicamente activas como electrocatalizadores en los llamados bioánodos de las reacciones electroquímicas para crear una reacción cercana a la reacción del equilibrio. Además a diferencia de los procesos electroquímicos que normalmente utilizan ánodos o cátodos de sacrificio, se utilizan materiales a base de carbono como gránulos de grafito, fibra de grafito y placa de grafito que son ampliamente utilizado como ánodo y cátodo en BES, no solo eliminando la generación de lodos químicos
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	4.0
% remoción	5.0
Costos	3.0
Necesidad de terreno	5.0
Generación y Gestión de residuos	4.0
Favorabilidad ambiental	5.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**4.3**

Fuente: Elaboración propia

Anexo D. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 8

.

TÍTULO DEL ESTUDIO: OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA GALVÁNICA POR PRECIPITACIÓN QUÍMICA
Autor o autores: Miranda, R., Loredo, J., Soto, E. & Sosa, C. 2006
Tecnología aplicada: PRECIPITACIÓN QUÍMICA
Tipo de documento: Trabajo de Grado ___ Artículo X Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Equipo de prueba de jarras, cloruro de hierro y férrico, pHmetro, vasos de precipitado, sales solubles de cromo (III), zinc, hierro (III) y níquel, espectroscopio de absorción atómica.
Dónde se hizo la Aplicación: En campo: ___ En laboratorio X Información teórica: ___ Otro __ **Descripción de la aplicación:** El desarrollo de este tratamiento se realizó mediante precipitación química, usando hidróxido de sodio para ajustar el pH y cloruro férrico como coagulante en un equipo de prueba de jarras. En cuanto a las condiciones óptimas encontradas usando el agua sintética fueron: 7 minutos para el tiempo de floculación, 18 rpm para la velocidad de agitación y 11.8 mL para la dosis de coagulante. Para el agua cruda fueron: 9.5 minutos para el tiempo de floculación, 30 rpm para la velocidad de agitación y 5.2 mL para la dosis de coagulante. Para el análisis y cuantificación se realizó mediante. Los análisis de las aguas tratadas se realizaron utilizando Espectroscopia de Absorción Atómica y se tuvieron en cuenta un tiempo crítico de sedimentación y velocidad inicial de sedimentación.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	4.0
% remoción	5.0
Costos	4.0
Necesidad de terreno	5.0
Generación y Gestión de residuos	4.0
Favorabilidad ambiental	4.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**4.3**

Fuente: Elaboración propia

Anexo E. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 9

TÍTULO DEL ESTUDIO: ESTUDIO DE REMOCIÓN DE MERCURIO DE AGUAS

.

RESIDUALES PROVENIENTES DE UN RELLENO SANITARIO
Autor o autores: Ocampo, M. F. 2012.
Tecnología aplicada: ADSORCION CON CARBONES ACTIVADOS Y MEMBRANAS DE QUITOSANO
Tipo de documento: Trabajo de Grado X Artículo ___ Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Borohidruro de sodio 96% de pureza Merck, ácido sulfúrico pureza del 98,9 %, ácido nítrico al 65 % Merck, solución estándar de mercurio de 100 0 mg/l, de Hg(NO3)2 Merck en ácido nítrico 2 mol/L, permanganato de potasio, persulfato de potasio, hidroxilamina sulfato, membrana de filtración en fibra de vidrio, agua destilada, espectrofotómetro de absorción atómica, carbón activado, membrana de quitosano, disulfuro de carbono, glutaraldehido al 25 %, grado analítico, ácido acético analítico, prefiltros .
Dónde se hizo la Aplicación: En campo: ___ En laboratorio X Información teórica: ___ Otro __ **Descripción de la aplicación:** Se inició con la determinación del coeficiente de partición (Kd), entre las fases sólidas y líquidas del lixiviado, luego mediante las dosis y los tiempos óptimos de contacto se analizó la mejor correlación de las isotermas más conocidas, buscando encontrar cuál de los dos adsorbentes es más efectivo par a remover el mercurio presente en las aguas lixiviadas del relleno sanitario. A nivel de laboratorio se desarrollaron ensayos de filtración en columna sobre lecho empacado con los adsorbentes (carbón modificado con azufre y filtración sobre membrana de quitosano) en continuo para encontrar parámetros de diseño que permitan la aplicación a sistemas reales.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	3.0
Facilidad en funcionamiento	3.0
% remoción	4.0
Costos	3.0
Necesidad de terreno	4.0
Generación y Gestión de residuos	3.0
Favorabilidad ambiental	4.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.4**

Fuente: Elaboración propia

Anexo F. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 10

TÍTULO DEL ESTUDIO: TRATAMIENTO DE AGUA POR FILTRACIÓN

.

TANGENCIAL CON MEMBRANA DE CERAMICA
Autor o autores: Reyes, M. 2003.
Tecnología aplicada: FILTRACIÓN POR MEMBRANA
Tipo de documento: Trabajo de Grado X Artículo ___ Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Espectrofotómetro UV-VIS, pHmetro, balanza analítica, conductímetro, turbidimetro, horno de laboratorio, autoclave, incubadora, cajas de Petri, papel filtro, tubos de ensayo, mechero, termómetro, frascos de vidrio con tapón esterilizado, Erlenmeyer de 250 ml, probeta de 10 y 100 ml, balones aforados de 100, 500 y 1000 ml, bureta de 50 ml, capsulas de porcelana, gotero, embudo para filtrar, hipoclorito de sodio, tiosulfato de sodio pentahidratado, ácido acético concentrado, yoduro de potasio, almidón soluble, ácido clorhídrico, cloruro de bario, sulfato de potasio,
Dónde se hizo la Aplicación: En campo: ___ En laboratorio X Información teórica: ___ Otro __ **Descripción de la aplicación:** Para el desarrollo de esta tecnología se realizó un diseño estructural con tubería al cual se le puso una bomba peristáltica de agua y un filtro de varias membranas. El filtro consta de un soporte cilíndrico de cerámica, donde se encuentran coaxialmente ubicadas una serie de 19 membranas con poros por los cuales se hizo pasar el agua desde un recipiente a presión constante para obtener el agua filtrada. Para el análisis de los datos se realizó mediante el método de espectrometría. Adicional se tuvieron en cuenta parámetros como pH, temperatura, caudal, turbidez, solidos totales, solidos volátiles, sulfatos y nitratos.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	4.0
% remoción	4.0
Costos	3.0
Necesidad de terreno	4.0
Generación y Gestión de residuos	4.0
Favorabilidad ambiental	4.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.9**

Fuente: Elaboración propia

Anexo G. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 11

.

TÍTULO DEL ESTUDIO: ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS PARA LA FITORREMEDIACIÓN DE CADMIO (II) Y MERCURIO (II) CON LA ESPECIE *Eichhornia Crassipes*
Autor o autores: Poma, V. & Valderrama, A. 2014.
Tecnología aplicada: FITORREMEDIACIÓN
Tipo de documento: Trabajo de Grado ___ Artículo X Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Ladrillo, cemento, nutrientes para las plantas, bolsas ziploc, solución de mercurio, HNO_3, tubos de ensayo, equipo de absorción atómica, generador de hidruros (vapor frio)
Dónde se hizo la Aplicación: En campo: ___ En laboratorio X Información teórica: ___ Otro __ **Descripción de la aplicación:** Se recolectaron las especies de *Eichhornia Crassipes,* estas fueron almacenadas y cultivadas en un estanque, donde se le añadieron nutrientes a una parte para aumentar el tiempo de supervivencia y resistencia al Hg, luego se preparó un litro de solución que se repartió para hacer varias concentraciones. Después de tener la solución preparada se tomaron las muestras y se les añadió, las muestras se colectaron cada 24h por 8 días preservadas con HNO_3. Finalmente fueron llevadas a tubos de ensayo para su análisis por medio del equipo de absorción atómica acoplado a un generador de hidruros (vapor frio) para el Hg.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	4.0
% remoción	2.0
Costos	4.0
Necesidad de terreno	3.0
Generación y Gestión de residuos	3.0
Favorabilidad ambiental	3.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.3**

Fuente: Elaboración propia

Anexo H. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 12

Título del estudio: REMOCIÓN DE MERCURIO, CROMO Y PLOMO POR HUMEDALES ARTIFICIALES INOCULADOS CON CEPAS TOLERANTES
Autor o autores: Amabilis, L., Siebe, C., Moeller, G. & Durán, M. 2015.
Tecnología aplicada: HUMEDALES ARTIFICIALES
Tipo de documento: Trabajo de Grado ___ Artículo X Otro ___

.

Descripción de materiales y funcionamiento:
Dónde se hizo la Aplicación: En campo: ___ En laboratorio X Información teórica: ___ Otro __ **Descripción de la aplicación:** Se utilizaron seis reactores a escala de laboratorio, que consistieron en cilindros de cloruro de polivinilo, en los humedales artificiales (RCT y RCC) fueron sembrados con la especie *Phragmites australis* y en el caso de los tres inoculados con cepas tolerantes (RCT), la rizosfera fue esterilizada por medio de la aplicación de NaClO al 10%, seguido por C_2H_6O al 70%. Para la prueba de fitotoxicidad se realizó un bioensayo con semillas de *Lactuca sativa*, para evaluar los efectos de la mezcla de metales pesados de interés. La toma de muestras de cada reactor se realizó cada cuatro días, en función del tiempo de recambio del agua, en frascos de polietileno previamente lavados con HNO_3 al 5%. La determinación de metales se realizó por medio de espectrometría de absorción atómica, con generación de hidruros para las muestras de mercurio y con el método de flama para plomo y cromo.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	3.0
% remoción	3.0
Costos	4.0
Necesidad de terreno	4.0
Generación y Gestión de residuos	3.0
Favorabilidad ambiental	3.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.4**

Fuente: Elaboración propia

Anexo I. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 13

TÍTULO DEL ESTUDIO: APLICACIÓN DEL PROCESO FENTON EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN PETROQUÍMICO
Autor o autores: Clemente, A., Chica, E. & Peñuela, G. 2014.
Tecnología aplicada: PROCESO DE OXIDACIÓN FENTON
Tipo de documento: Trabajo de Grado ___ Artículo X Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: En este artículo no se especifican materiales, teniendo en cuenta que es una revisión teórica.

.

Dónde se hizo la Aplicación: En campo: ___ En laboratorio ___ Información teórica: X Otro __ **Descripción de la aplicación:** Este proceso consiste en la adición de sales de hierro en presencia de H_2O, en un medio acido, formando radicales OH, a esta combinación se le llama reactivo fenton, además de formarse radicales OH se generan radicales de perhidroxilo (HO_2) los cuales eliminan materia oxidable. En este proceso influyen parámetros como la temperatura, pH, concentración del agente oxidante del catalizador, tiempo de reacción, tipo de contaminante, presencia de aniones, entre otros.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	3.0
Facilidad en funcionamiento	3.0
% remoción	4.0
Costos	4.0
Necesidad de terreno	5.0
Generación y Gestión de residuos	3.0
Favorabilidad ambiental	4.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.7**

Fuente: Elaboración propia

Anexo J. Tecnologías aplicadas para remoción de mercurio. Estudio 14

TÍTULO DEL ESTUDIO: TRANSFORMACIÓN DE PET MEDIANTE HIDRÓLISIS ÁCIDA Y *Bacillus subtilis* PARA OBTENER MATERIALES CON CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE METALES PESADOS COMO COBRE Y MERCURIO.
Autor o autores: Jaramillo, M. & Vera, S. 2012.
Tecnología aplicada: HIDRÓLISIS ÁCIDA
Tipo de documento: Trabajo de Grado X Artículo ___ Otro ___
Descripción de materiales y funcionamiento: Vasos de precipitados, pipetas graduadas, balones aforados, matraz de erlenmeyers, parafilm, cajas de Petri, goteros, embudos, imanes de agitación, papel filtro, tijeras, papel aluminio, marcadores indelebles, piceta, agua destilada, *Bacillus subtilis,* balanza analítica, estufa, equipo de absorción atómica, lámpara de cobre y mercurio, espectrofotómetro infrarrojo, compresor de aire, tanque de acetileno, pinzas, botellas plásticas, caldo nutritivo.
Dónde se hizo la Aplicación: En campo: ___ En laboratorio X Información teórica: ___ Otro __ **Descripción de la aplicación:**

.

Se realizó la recolección de botellas plásticas (PET) para cortarlas en trozos pequeños y mediante acción mecánica se hizo una degradación mecánica con ácido sulfúrico, luego se retiró el PET de la solución y se lavó para eliminar los residuos de ácido, después se colocó el material en una estufa a una temperatura de 36°C durante 3 días. Ya obtenidas las partículas de PET se realizó una semidegradación con la *Bacillus subtilis* en caldo nutritivo; para la modificación de la matriz realizada por ácido sulfúrico y la bacteria se empleó la técnica de pastillaje para infrarrojo y por último se analizaron los espectros en el espectrofotómetro infrarrojo.
Criterios de evaluación: Evaluación con respecto a criterios de evaluación:

CRITERIO	**CALIFICACIÓN**
Facilidad de instalación	4.0
Facilidad en funcionamiento	4.0
% remoción	4.0
Costos	2.0
Necesidad de terreno	4.0
Generación y Gestión de residuos	3.0
Favorabilidad ambiental	3.0
CALIFICACIÓN TOTAL	**3.4**

Fuente: Elaboración propia