

Estado del arte de la biodegradación de cianuro en aguas residuales industriales

**Elis Joanna Zapata Alfonso
Yenny Bermúdez Palma**

Monografía presentada como requisito para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Director:
Carlos Andrés Fajardo

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

Agradecimientos

Un fraternal agradecimiento a nuestro director de trabajo de grado, profesor Carlos Fajardo; por su apoyo técnico, paciencia y calidad humana a lo largo de la construcción de este trabajo de grado.

A mi querida amiga Yenny, una mujer ejemplar y excepcional compañera de trabajo.

Especial agradecimiento a mi madre, nada de lo que soy hoy hubiese sido posible sin su amor y apoyo incondicionales. Su ejemplo de perseverancia, pasión y responsabilidad siempre conmigo.

A mi padre que, sin saberlo, cultivó en mí un amor infinito por la lectura y la ingeniería ambiental. Su ejemplo de entereza y disciplina han sido fundamentales.

A mi amado esposo; sus consejos y apoyo no solo a lo largo de la construcción de este trabajo si no de mi carrera profesional han sido siempre un soporte.

A mis amados hijos, mi adoración

Elis J. Zapata Alfonso

Agradezco a Dios por brindarme sabiduría y fortaleza para culminar este logro tan importante para mí.

Agradezco a mi querida amiga Elis Joanna, por su amistad y apoyo incondicional, por acompañarme en este camino.

Agradezco a mi querida Madre y a mi hermana por ser mujeres ejemplares, valientes y cariñosas.

Mi sincero agradecimiento a la Familia Amado Pérez, por haber creído en mí, por brindarme una oportunidad y por haberme acogido con tanto cariño.

Y agradezco con todo mi amor a mis amados hijos, porque han sido mi ejemplo de lucha e incondicionalidad.

Yenny Bermúdez Palma

Resumen

El cianuro es un compuesto químico, altamente tóxico, clasificado como sustancia de interés sanitario en el Decreto 1594 de 1984, concepto ratificado por la Resolución 0631 de 2015 que, además, establece los parámetros y límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y sistema de alcantarillado público. En Colombia, este compuesto es comúnmente utilizado en procesos productivos industriales, tales como: Minería aurífera, metalurgia para galvanización, industria siderurgia (tratamientos térmicos y limpieza de metales), fotografía, industria tabacalera, industria militar, entre otras. Debido a la falta de control en los vertimientos de las aguas residuales industriales (ARI) contaminadas con cianuro, los efluentes son dispuestos en cuerpos de agua superficiales, suelos y/o sistemas de alcantarillado público sin previo tratamiento; por lo que, respondiendo a políticas públicas de desarrollo sostenible y de calidad del agua, y con el fin de proponer soluciones ecoeficientes y sustentables para preservar los cuerpos de agua el presente trabajo pretende hacer una revisión del estado del arte de la degradación de cianuro en aguas residuales industriales (ARI) a través de un comparativo entre tratamientos convencionales (químicos) y tratamientos biológicos (biotecnología) a través de la aplicación de microorganismos degradadores de cianuro con el fin de revisar cuál es más eficiente o cómo un tratamiento puede, eventualmente, apoyar a otro con el fin de minimizar y mitigar impactos ambientales negativos.

Para esto, se hace una identificación conceptual de tratamientos convencionales (químicos) y tratamientos biológicos (biorremediación) con microorganismos degradadores de cianuro capaces de resistir condiciones extremas de pH y contaminación con metales pesados.

Palabras claves: Biotecnología, microorganismos, agua residual industrial, cianuro, tratamiento convencional

Abstract

Cyanide is a highly toxic chemical compound, classified as a substance of sanitary interest in Decree 1594 of 1984, a concept ratified by Resolution 0631 of 2015, which also establishes the maximum permissible parameters and limits in point discharges to water and public sewer system. In Colombia, this compound is commonly used in industrial production processes, such as: Gold mining, metallurgy for galvanization, steel industry (heat treatments and metal cleaning), photography, tobacco industry, military industry, among others. Due to the lack of control in industrial wastewater discharges contaminated with cyanide, the effluents are disposed in water, soils and public sewage systems without prior treatment. Therefore, in response to public policies for sustainable development and water quality, and to propose eco-efficient and sustainable solutions to preserve water, the present work intends to review the state of the art of cyanide degradation in industrial wastewater through a comparison between conventional treatments (chemical) and biological treatments (biotechnology) through the application of cyanide degrading microorganisms in order to review which is more efficient or how a treatment can, eventually, support another in order to minimize and mitigate negative environmental impacts.

For this, a conceptual identification of conventional treatments (chemical) and biological treatments (bioremediation) is made with cyanide degrading microorganisms capable of withstanding extreme conditions of pH and contamination with heavy metals.

Keywords: Biotechnology, microorganisms, industrial wastewater, cyanide, conventional treatment (chemical), environmental impacts

Tabla de contenido

Agradecimientos	II
Resumen	IV
Abstract	V
Lista de tablas.....	VIII
Glosario	IX
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	3
3. Justificación	6
4. Objetivos.....	8
4.1 Objetivo general	8
4.2 Objetivos específicos.....	8
5. Marco teórico.....	9
5.1 CAPÍTULO 1	9
5.1.1 ¿Qué es el cianuro?	9
5.2. 1 tipos de cianuro	9
5.2.1.1 El cianuro de hidrógeno o ácido cianhídrico (HCN)	10
5.2.1.2 El cianuro de sodio (NaCN).....	10
5.2.1.3 El cianuro de potasio (KCN).....	10
5.2.1.4 El cianuro de amonio (NH ₄ CN)	10
5.3.1 ¿Dónde se encuentra el cianuro?.....	10
1. Usos del cianuro	12
5.4.1 Impactos ambientales y sociales	15
5.1.5 Marco jurídico colombiano para manejo de aguas residuales industriales.....	19
5.2 CAPÍTULO 2.....	22
5.2.1 Tratamientos convencionales	22
5.2.1.1 Oxidación química del cianuro	22
5.2.1.2 Peróxido de hidrógeno	23
5.2.1.3 Tratamiento con “ácido de caro”:	23
5.2.1.4 Tratamiento con UV - H ₂ O ₂	24
5.2.1.5 Tratamiento con O ₃	25

5.2.1.6 Cloración alcalina.....	25
5.2.1.7 Proceso INCO.....	25
5.2.1.8 Hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno.....	26
5.2.1.9 Precipitación	26
5.2.1.10 Carbón activado.....	26
5.3 CAPÍTULO 3.....	27
5.3.1 ¿Qué es biorremediación?	27
5.3.2 Tipos de biorremediación.....	29
5.3.3 ¿Cómo metabolizan los microorganismos para contribuir a la biorremediación? .	32
5.3.3.1 Metabolismo bacteriano	32
5.3.3.2 Metabolismos de hongos	32
5.3.3.3 Metabolismo microbiano (bacterias y hongos unicelulares)	33
5.3.3.4 Metabolismo algas	35
5.3.3.5 Fitorremediación – macrófitas	35
5.4 CAPITULO 4.....	36
5.4.1 Biorremediación de cianuro	36
5.4.2 Ventajas y desventajas de tratamientos de biorremediación	43
6. Conclusiones	49
7. Bibliografía.....	51

Lista de tablas

Tabla 1 Competencia del otorgamiento de permisos y licencia ambiental.....	4
Tabla 2 Usos del cianuro	12
Tabla 3 Impactos ambientales y sociales.....	15
Tabla 4 Marco jurídico en Colombia.....	19
Tabla 5 Tipos de biorremediación	29
Tabla 6 Biorremediación de cianuro.....	36

Glosario

Con el objetivo de acercar al lector a conceptos sencillos citados en la presente investigación, así como, las investigaciones desarrolladas en Colombia y el mundo en torno a la capacidad que tienen algunos microorganismos para degradar cianuro de las aguas residuales industriales a través de procesos de biorremediación, se construye el glosario a partir de los significados del diccionario de la lengua española. Invalid source specified.

ARI: De acuerdo con la Resolución 631 de 2015 – Aguas residuales industriales.

Bacterias degradadoras: Son aquellas que utilizan los contaminantes como fuente de carbono y los remedian.

Biodegradable: Descomposición natural dada por agentes biológicos.

Biorremediación: Uso de microorganismos para contrarrestar la contaminación de los recursos naturales.

Cianobacterias: Organismos procariotas, unicelulares, fotosintéticos.

Cianuro: Sustancia química, contaminante, tóxica, letal y corrosiva

Contaminación: Disposición de sustancias o elementos químicos en el ambiente.

Cuerpos receptores: Curso de agua, arroyo, río, lago.

Ecosistemas: Conjunto de individuos de diferentes especies, en un hábitat determinado.

Metabolizar: Asimilar, transformar y degradar un organismo a una sustancia.

Microorganismos autóctonos: Son aquellos que tienen una asociación estable con una región determinada del organismo, desarrollando una función estable en el ecosistema.

Minería aurífera: Extracción artesanal de oro.

Orgánicos: Sustancias o productos de origen animal y vegetal.

Proceso de lixiviación: Proceso de extracción de un mineral con reactivos.

Proceso metabólico: Transformación de la materia en energía.

Pseudomonas: Bacilos, Gram negativos, se reproducen en medios aeróbicos.

Pseudomonas spp. Bacterias.

Reacciones colaterales: Efectos no directos e inmediatos.

Tóxicos: Sustancias nocivas para cualquier medio u organismo.

Vertimientos: Evacuación de desechos líquidos contaminados al medio ambiente

1. Introducción

El tratamiento de aguas residuales industriales en Colombia se ha constituido en un reto, para la ingeniería ambiental y la biotecnología, dadas las características físicas y químicas de los efluentes producto de las diferentes actividades económicas que, para el caso, utilizan cianuro en sus procesos de producción.

Industrias como metalúrgica, minería aurífera, fotográfica y militar, entre otras, usan el cianuro como reactivo o como insumo, este hecho tiene un riesgo importante de vertimiento tanto en cuerpos de agua superficiales como en sistemas de alcantarillado público, por lo cual la razón para que este compuesto químico esté presente en cuerpos de agua obedece a actividades antropogénicas.

Si bien, tal y como se conoce la vida moderna, las industrias son inherentes al quehacer diario, sin embargo, el resultado de algunas actividades económicas no siempre ha sido el más benéfico ambiental ni socialmente. Hablar de minería sostenible es una utopía sin embargo si se puede hablar de minería y en general, de industria, responsable con sus procesos productivos con el fin de minimizar impactos ambientales negativos. En Colombia la gestión ambiental del tratamiento de aguas residuales industriales contaminadas con cianuro es trascendental para minimizar vertimientos a cuerpos de agua superficiales o sistemas de alcantarillado público ya que el cianuro es un compuesto químico inorgánico altamente tóxico y por tanto un potencial generador de impactos ambientales negativos en ecosistemas acuáticos. Los impactos negativos en el cuerpo de agua perduran en el tiempo, ya que de acuerdo con la ficha técnica de cianuro de potasio (KCN), al entrar en contacto con agua libera gases tóxicos

De acuerdo con la normatividad nacional para el control de vertimientos en aguas superficiales y sistema de alcantarillado, el cianuro es clasificado como una sustancia de interés sanitario, con lo cual la Resolución 0631 de 2015 establece límites permisibles de acuerdo con las actividades económicas. Para el caso, el límite permisible indica que el vertimiento de aguas residuales no domésticas (ArnD) y aguas residuales domésticas (ARD) contaminadas con cianuro en la red de alcantarillado y cuerpos de agua es de 1mg/L para la industria minera y CN- 0,50 mg/L para (ARD).

De acuerdo con lo anterior es preciso analizar los diferentes tipos de tratamiento para las aguas residuales industriales contaminadas con cianuro. Entre esos se encuentran: los físicoquímicos y los biológicos. Como parte de los procesos biológicos de remediación, la biotecnología implementa técnicas haciendo uso de microorganismos degradadores de cianuro con el fin de transformarlos en elementos menos tóxicos.

En todos los procesos de remediación los rendimientos son diferentes ya que dependen en gran medida del microorganismo y su capacidad de degradación, así como, las características químicas y biológicas del agua residual industrial donde también inciden particularidades físicas como pH, temperatura, oxígeno disuelto (DO) y sólidos suspendidos totales (SST) (Vásquez , Guerrero , & Quintero , Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados , 2010)

El objetivo de esta monografía es consolidar en un documento la información concerniente a los diversos organismos biológicos capaces de degradar cianuro en aguas residuales industriales, así como realizar un comparativo, desde la viabilidad técnica y económica de diferentes tipos de tratamiento tanto convencionales como biológicos. Esta revisión suministra una visión general del estado del arte de la investigación de técnicas como fitorremediación, biorecuperación, bioestimulación, bioaumentación, biofijación, fijación pasiva, atenuación natural y biorremediación a través del uso de microorganismos naturales (hongos, bacterias, algas) y fitorremediación en América y otros países.

2. Planteamiento del problema

La riqueza biológica de Colombia se debe a su ubicación geográfica, oferta hídrica, diversidad de organismos vivos en ecosistemas acuáticos y terrestres y por supuesto, múltiples ecosistemas entre llanuras, páramos, humedales, selvas, océanos, ríos y bosques.

Sin embargo, la calidad del agua en cuanto a la oferta hídrica en Colombia es afectada debido a vertimientos de aguas residuales industriales contaminadas con cianuro porque genera un detrimento en ecosistemas acuáticos impactando la cadena trófica acuática y la salud de las comunidades. Así lo ratifican múltiples informes periodísticos de la Agencia de Noticias de la Universidad Nacional de Colombia (Agencia de Noticias UN , 2013) donde se menciona como el deterioro de las cuencas hidrográficas en Colombia dependen en gran medida del uso de cianuro y mercurio como amalgamadores para la actividad de minería aurífera. Aun cuando no es la única responsable de los efluentes contaminados casi en la misma proporción se encuentran los industriales y comerciales resultado del desarrollo de procesos productivos en los que se utiliza el compuesto químico. Por ejemplo: metalurgia para galvanización, industria fotográfica, tabacalera e industria siderúrgica (tratamientos térmicos y limpieza de metales), entre otras.

El cianuro genera un riesgo inminente debido a su alta toxicidad. Si bien, es biodegradable según lo informa la ficha técnica del cianuro de potasio (KCN), al entrar en contacto con agua libera gases tóxicos para organismos acuáticos, degradando flora y fauna acuática impactando directamente en algas, peces, dafnias y otros invertebrados acuáticos

En humanos es potencialmente tóxico y eventualmente mortal de acuerdo con la concentración y el grado de exposición al mismo. De acuerdo con la ficha técnica, la dosis letal en humanos es de 2,86mg/kg (ingesta oral) y 0,051 mg/l inhalación – polvo/niebla (Bell , DiGangi , & Weinberg , 2014). Algunos de los efectos que provoca en la salud humana son paro respiratorio, inconsciencia, depresión en el sistema nervioso central y muerte. (MERCK , 2014)

En especial, teniendo en cuenta los efectos en los organismos vivos, es preciso desde toxicología y medio ambiente tener en cuenta que el uso de cianuro y mercurio en la

minería aurífera provoca dos procesos; biomagnificación y bioacumulación en la cadena trófica, ya que suele usarse cianuro (CN) para la lixiviación de oro y mercurio (Hg) como reactivo y la combinación de estos dos provoca metilación de mercurio (CH₃)₂ Hg, (Sánchez & Andrade , 2009). Una reacción química producto primario de la metilación, que además se moviliza más rápido en la cadena trófica acuática, no solo en especies nativas sino migratorias, así como en el hombre. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible , 2016)

Los impactos negativos en el cuerpo de agua perduran en el tiempo y se biomagnifican en los tejidos de todos los organismos superiores presentes en la cadena trófica del cuerpo de agua (Bell , DiGangi , & Weinberg , 2014).

Finalmente, debido a que la minería aurífera utiliza en sus procesos productivos; cianuro y mercurio, en el presente documento se ha otorgado especial atención ya que es justamente la que genera desagüe de las aguas de mina como vertimiento.

De acuerdo con la guía de orientación para el correcto manejo de vertimientos, anualmente la ANLA y la CAR otorgan permisos y licencias ambientales, respectivamente, para la remoción total de material útil y estéril con proyección mayor o igual a 2.000.000 ton/año, (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015) ver **tabla No 1**.

Tabla 1 Competencia del otorgamiento de permisos y licencia ambiental

Tema	ANLA	CAR
Carbón	Explotación proyectada mayor o igual a 800.000 ton/año	Explotación proyectada menor a 800.000 ton/año
Materiales de construcción y arcillas o minerales industriales no metálicos	Producción proyectada mayor o igual a 600.000 ton/año para las arcillas o igual a 250.000 m ³ /año para otros materiales de construcción o para minerales no metálicos	Producción proyectada menor a 600.000 ton/año para las arcillas o menor a 250.000 m ³ /año para otros materiales de construcción o para minerales no metálicos
Minerales metálicos y piedras preciosas y semipreciosas	Remoción total de material útil y estéril proyectada sea mayor o igual a 2.000.000 de ton/año	Remoción total de material útil y estéril proyectada sea menor a 2.000.000 de ton/ año
Otros minerales y materiales	Cuando la explotación de mineral proyectada sea mayor o igual a 1.000.000 ton/año	Cuando la explotación de mineral proyectada sea menor o igual a 1.000.000 ton/año

Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015)

La **figura 1** muestra el ciclo productivo de la extracción de oro en Colombia de acuerdo con el efluente final como desagüe de las aguas de mina para vertimiento.

Ilustración 1 Esquema de beneficio del oro



Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015)

Teniendo en cuenta la importancia de soluciones sostenibles la aplicación de biotecnologías permite minimizar la carga contaminante ya que la degradación microbiana es un proceso, per se, natural. La biorremediación a través de microorganismos degradadores de cianuro, es un proceso biológico propio de algunas especies que tienen la capacidad de usar el cianuro como fuente de carbono o nitrógeno obteniendo como resultado un subproducto menos tóxico y disponible para una descarga limpia en las fuentes hídricas (Restrepo , Montoya , & Muñoz , 2016). Los procesos de biorremediación de los contaminantes en el agua permiten preservar el medio ambiente y la salud. (Garzón , Rodríguez - Miranda , & Hernández-Gómez , Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su, 2017).

Con el fin de proponer soluciones ecoeficientes y respondiendo a políticas públicas de desarrollo sostenible, la propuesta del presente trabajo es establecer el estado del arte del tratamiento de las aguas residuales industriales contaminadas con cianuro mediante el uso de microorganismos capaces de degradarlo con el fin de proponer, desde la

biorremediación, una solución sostenible para el tratamiento de las aguas residuales contaminadas con cianuro.

3. Justificación

En ecosistemas acuáticos potencialmente contaminados con aguas residuales que contienen cianuro las concentraciones pueden superar la normatividad ambiental colombiana. El Decreto 1594 de 1984¹ (**Ver tabla 4 Marco jurídico en Colombia**) clasifica el cianuro como una sustancia de interés sanitario y la Resolución 0631 de 2015 lo ratifica clasificando los vertimientos de acuerdo con las actividades económicas estableciendo límites permisibles. Para el caso, el parámetro indica que la concentración de carga para los vertimientos de aguas residuales domésticas (ARD) y aguas residuales no domésticas (ArnD) contaminadas con cianuro en la red de alcantarillado y cuerpos de agua, el límite permisible para CN- 0,50 mg/L y 1mg/L para la industria minera. Con lo cual esta problemática demanda que las fuentes hídricas contaminadas con cianuro sean recuperadas; por lo que una de las opciones de tratamiento se basa en el uso de técnicas biológicas a través de la implementación de sistemas con microorganismos degradadores de cianuro que transformen o remuevan compuestos orgánicos tóxicos y los conviertan en productos metabólicos inocuos o menos tóxicos que mitiguen y controlen la contaminación del recurso hídrico. (Garzón , Jennifer; Rodriguez , Juan; Hernández , Catalina, 2017). En la actualidad los vertimientos de agua residual industrial contaminada con cianuro se tratan a través de métodos químicos, ya que se considera que el tratamiento es más eficiente. (Superintendencia de Industria y Comercio, 2014). Con el fin de buscar tecnologías de tratamiento que generen un menor impacto ambiental y con ello técnicas de biorremediación que degraden el cianuro presente en cuerpos de agua se han impulsado nuevas investigaciones, desde la academia, para que, a través de métodos de fitorremediación, biorremediación con algas y microorganismos se degrade cianuro presente en el ARI.

La biorremediación, es una buena solución para sustituir el tratamiento químico; ya que está fundamentada en la acción de microorganismos autóctonos y modificaciones ambientales de gran sencillez, como la aplicación de nutrientes y la aireación; esta técnica

¹ Resolución 0631 de 2015 Establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y deroga el Decreto 1594 de 1984

causa un impacto menos negativo en el medio ambiente ya que el cianuro es biodegradable y sus desechos pueden ser tratados por biorremediación, porque desde la colonización y el crecimiento de los microorganismos no se inhiben por altas concentraciones del mismo. Por consiguiente, los microorganismos degradadores son capaces de utilizar un contaminante para su subsistencia y así sintetizarlo como parte del tratamiento biológico de sustancias biodegradables y tóxicas. Los microorganismos involucrados poseen varios sistemas enzimáticos específicos que les permite desarrollarse en ambientes con alta concentración de cianuro. Entre los microorganismos más conocidos están: *Cianobacterias* y bacterias del género *pseudomona* además de las cepas de hongos *Trichoderma* y *Fusarium trincictum*, entre otros. En el proceso metabólico, ellas emplean el cianuro como fuente de nitrógeno y la glucosa como fuente de carbono para convertirlo en amoníaco y dióxido de carbono, y finalmente pueden degradar el cianuro en productos menos tóxicos. Los factores más importantes para la biorremediación del cianuro en medio acuoso son el pH, el oxígeno y la concentración del cianuro (Macías & Zambrano, 2017).

Entre los beneficios de los métodos biológicos en términos generales, se destaca que no se utilizan agentes químicos, sus costos de implementación son bajos, genera un mínimo de residuos (lodos) susceptibles de disposición final adecuada y es una alternativa de impacto positivo a la comunidad y su entorno (fauna y flora). Por ello se le atribuye una mayor probabilidad de resultado. (Vallejo, Ruiola y Prado, 2010).

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Establecer el estado del arte de la capacidad de degradación de los microorganismos en aguas residuales industriales contaminadas con cianuro ARI.

4.2 Objetivos específicos

- Establecer el estado del arte de las metodologías aplicadas para el tratamiento de aguas residuales industriales contaminadas con cianuro utilizando microorganismos en estudios de caso en América y otros países.
- Identificar, conceptualmente, los microorganismos degradadores de cianuro para aguas residuales industriales, de estudios de caso en América y otros países.

5. Marco teórico

5.1 CAPÍTULO 1

5.1.1 ¿Qué es el cianuro?

El cianuro es un compuesto formado por un átomo de carbono y un átomo de nitrógeno unidos por un triple enlace. Es un compuesto químico inorgánico y una sal derivada del ácido cianhídrico. Una gran variedad de cianuros disuelve la plata y el oro por lo que son usados como lixiviante en la industria aurífera, así como en la metalúrgica, siderúrgica, fotográfica, entre otras. (Rizzotto , 2009). Se encuentra unido por un enlace triple de carbono-nitrógeno (CN). Este se puede presentar como cianuro de hidrógeno (HCN) que es un gas, o en forma de cristales como el cianuro de sodio (NaCN) o el cianuro de potasio (KCN) o como cianuro de amonio ($\text{NH}_4 \text{CN}$) en forma de cristales cúbicos incoloros. (Guerrero , 2015)

El cianuro es un compuesto químico muy tóxico que interfiere con la función de numerosas metaloproteínas. A pesar de su toxicidad, el cianuro es un compuesto ampliamente utilizado en procesos industriales de la sociedad moderna. Los residuos cianurados, como resultado de estos procesos industriales llegan a ser vertidos como efluente de agua residual industrial y constituyen una seria amenaza para el medio ambiente. Aun cuando la exposición o las dosis sean mínimas la descarga en la biosfera podría ser mortal en fauna acuática y terrestre. (Pedregosa, 2016).

5.2. 1 tipos de cianuro

5.2.1.1 El cianuro de hidrógeno o ácido cianhídrico (HCN)

Se caracteriza por ser un gas o líquido deslucido, con olor predominante a semillas amargas, su peso molecular de 27, punto de ebullición de 26°C, no combustible, soluble en agua y alcohol ligeramente en éter. Sus sales son altamente oxidantes, no compatibles con nitratos, cloratos y ácidos. (Ramírez , 2010)

5.2.1.2 El cianuro de sodio (NaCN)

Es de forma cristalina, color blanco. pH entre 11 – 12. Es muy tóxico tanto para humanos como para organismos acuáticos ya que presenta toxicidad en peces como trucha irisada, *Oncorhynchus mykiss* spp e invertebrados acuáticos como *daphnia magna* spp. En contacto con ácidos libera gases. (Sigma-Aldrich, 2014)

5.2.1.3 El cianuro de potasio (KCN)

Es sólido, blanco, con olor a almendras amargas. pH entre 11 – 12 y punto de fusión 634 °C.

Si bien, es fácilmente biodegradable – 99%; 42d; en medio aeróbico - es peligroso para el agua potable y tóxico para peces como pez luna, *lepomus macrochirus* spp y otras especies de invertebrados acuáticos como dafnias, *daphnia* spp. Debido a la formación de gases tóxicos al contacto con el agua (MERCK , 2014)

5.2.1.4 El cianuro de amonio (NH₄CN)

Es una síntesis orgánica como resultado de una solución de borboteo de gas (HCN) y amoniaco en solución acuosa descompuesta por calentamiento. Tanto en agua como en alcohol es muy acuosa. (Rizzotto , 2009).

5.3.1 ¿Dónde se encuentra el cianuro?

Debido a que el cianuro es un compuesto químico, en 1782 Scheele preparó en disolución, cianuro de sodio y de potasio y GayLussac lo obtuvo como un compuesto puro en 1815. Las disoluciones acuosas de cianuros se descomponen lentamente en el agua, si el medio es ácido se libera cianuro de hidrógeno. (Díaz & Suárez , 2016).

No existe propiamente un yacimiento natural dado que el cianuro es un compuesto químico, sin embargo, puede estar presente en la naturaleza en menor proporción como cianuro de hidrógeno liberado a través de algunos alimentos tales como: leguminosas,

tubérculos (yuca) y semillas como las de almendras, manzanas y cerezas. Esta propiedad es llamada, cianogénesis.

Los seres vivos están expuestos al cianuro de manera natural a través de los glucósidos cianogénéticos, siendo sustancias complejas formadas por una aglicona, un azúcar y una molécula de ácido cianhídrico. Los glucósidos, se encuentran en algunas especies de plantas con la capacidad de liberar HCN en limitados ambientes a través de enzimas vegetales o bacterianas.

Debido a actividades antropogénicas, es posible encontrar el compuesto químico presente en procesos de lixiviación de cianuro proveniente de la minería aurífera, así como vertimientos de aguas residuales industriales provenientes de la industria metalúrgica y química, las cuales generan, entre otras cosas, nuevos compuestos de cianuro tales como ferro y ferricianuro. (Quiroga & Olmos , 2009)

Los diferentes tipos de cianuro de hidrógeno, sólidos o en disolución son altamente perjudiciales por absorción en la piel, ingesta e inhalación. En el medio acuático son potencialmente tóxicos, aunque en algunas especies se ha detectado que una concentración de 0.05 mg/l de cianuros libres es medianamente aceptable, otros son perceptivos a concentraciones mínimas, lo cual no permite establecer un parámetro determinado. También este compuesto se crea al quemar hidrocarburos en atmósferas con aire limitado y también se encuentra en la estratosfera en cantidades mínimas. (Díaz & Suárez , 2016)

Finalmente, es posible hallar HCN en mínimas cantidades en la sangre humana (0.02 a 0.04 mg/ml), también en fumadores o consumidores de verduras en exceso, el cual es transformado por el organismo en tiocianato, y su medio de eliminación es a través de la orina. (Díaz & Suárez , 2016)

1. Usos del cianuro

Debido a las múltiples actividades económicas en las que se utiliza cianuro estas se clasificaron en la siguiente matriz en orden de prioridad de uso en Colombia. Dadas las particularidades de la minería aurífera y el renglón amplio que ocupa en la economía colombiana, se ha hecho especial énfasis, a lo largo de este trabajo, en las aguas residuales industriales contaminadas con cianuro producto de la minería aurífera. **(ver tabla 2 usos del cianuro).**

Tabla 2 Usos del cianuro

USOS DEL CIANURO EN LA INDUSTRIA	
MINERÍA AURÍFERA	En la minería aurífera es utilizado el cianuro como reactivo a través del proceso de extracción por lixiviación, con lo cual, el riesgo de vertimiento en cuerpos de agua durante el proceso de lixiviación es inminente. El mineral es apilado en plataformas forradas con geomembranas en donde el cianuro es agregado usando un sistema de riego por goteo. El objetivo es que a través de la disolución de cianuro se lixivie el mineral separando la roca del oro. El resultado final de este procedimiento es que las aguas residuales industriales. (CORANTIOQUIA , 2016)
	El recubrimiento electrolítico es la inmersión de piezas de acero en zinc fundido y cromo con el fin de evitar la corrosión de estas. En este proceso productivo que consiste en un baño de recubrimiento interno para tuberías de acero en condiciones de temperaturas superiores a 500°C. En el proceso productivo el uso frecuente de materiales como cianuros (especialmente

<p>RECUBRIMIENTO ELECTROLÍTICO (GALVANIZACIÓN)</p>	<p>para zinc, cobre, bronce, plata y latón), cadmio, cromo hexavalente y soluciones electrolíticas basadas en cromo/formaldehído.</p> <p>Con lo cual, en etapas como: desengrase, lavado, decapado, fluxado, secado, baño de zinc y enfriamiento, repaso e inspección del proceso se generan importantes riesgos, inicialmente por pérdida de químicos por arrastre y posteriormente o en simultáneo, descarga de agua clarificada a partir de tratamiento de precipitación y coagulación. (INGALSA, 2009)</p>
<p>FOTOGRAFÍA</p>	<p>El cianuro era usado para el procesamiento en algunas técnicas fotográficas clásicas; tanto en revelado como fijado. Se usaba como fijador o baño de paro en el colodión.</p> <p>Revelado: Una vez se reducen las sales férricas a sales ferrosas debido a la fotosensibilidad de rayos UV es posible configurar la imagen final ya que las emulsiones durante el revelado contenían KCN y NaCN. (Gallardo , 2014)</p> <p>Baño de fijación: <i>“Para fijar la imagen se tenía que eliminar el haluro de plata que no había sido revelado, convirtiéndolo en un complejo soluble en agua a través de una disolución de tiosulfato sódico o amónico (producto estable y no tóxico que no reaccionaba ni con la gelatina ni con la plata revelada), o bien con una disolución de cianuros (en baños fijadores de acción rápida). Los baños fijadores contenían también reguladores de pH (ácido acético, ácido bórico amoníaco...), endurecedores (compuestos de aluminio) y conservadores (sulfito sódico)”</i> (VALENCIA, 2012).</p>

<p>COMBUSTIÓN DE DIESEL VEHICULAR</p>	<p>La combustión de diésel vehicular genera material particulado PM10, PM2.5 y PM0., a través de una mezcla de partículas sólidas, líquidas y gaseosas. Y gases, como: dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono e hidrocarburos policíclicos aromáticos (benceno, tolueno y benzopireno). Asimismo, dentro de los componentes de humo de diésel trazas de cianuro emitidas a la atmósfera pueden estar presentes. (Alfonso , 2018)</p>
<p>INDUSTRIA TABACALERA</p>	<p>En la industria tabacalera, el cianuro de hidrógeno hace parte de los más de 600 compuestos químicos presentes en los cigarrillos. 44 de ellos son de interés toxicológico: entre los que están alquitrán, nicotina, cianuro de hidrógeno, cadmio, plomo, formaldehído, benceno y resorcinol. (Roma Paumgarten, Gomes-Carneiro , & Amado Xavier de Oliveira, 2017)</p>
<p>INDUSTRIA MILITAR (ARMAMENTO)</p>	<p>Su uso, como arma química en ámbitos militares, data de la primera guerra mundial (1914 – 1918) donde el cianuro de hidrógeno (HCN) fue utilizado como compuesto principal del gas vincenita. Dadas su efecto fisiológico sobre los humanos ya que es un agente hemotóxico. Nuevamente, el cianuro de hidrógeno fue usado como arma química durante la 2ª Guerra Mundial (1939 – 1945), en ese momento, y tras los aciertos y desaciertos del HCN durante la 1ra guerra mundial se desarrolla plenamente de manera que la SS empleó en las cámaras de gases un preparado de HCN llamado Zyklon B. En la actualidad es usado como exterminador de roedores pequeños. (Fernández , Desarrollo de un nuevo método para la eliminación del cianuro de aguas residuales de mina , 2007)</p>

Elaborado por autor

5.4.1 Impactos ambientales y sociales

Los impactos ambientales negativos causados por las aguas residuales industriales resultan ser complejos en la medida en la que el tratamiento de estas no se ajusta a la normatividad ambiental vigente. Para el caso la Resolución 0631 de 2015 se establecen los parámetros a medir y los límites máximos permisibles de acuerdo con la actividad económica que genera el vertimiento, sin embargo, los vertimientos aun precisan más control por parte de las autoridades ambientales competentes. **(Ver tabla 3 Impactos ambientales y sociales)**

Tabla 3 Impactos ambientales y sociales

FACTORES	IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIALES	
ABIOTICO	AIRE	<p>La contaminación atmosférica por cianuro es consecuencia de actividades industriales y del consumo de tabaco, propiamente, del humo de cigarrillo. En todos los casos obedece al proceso de pirólisis de varios compuestos a temperatura superior de 700°C.</p> <p>En la atmósfera, a consecuencia de estas actividades el compuesto químico presente es el cianuro de hidrógeno, proveniente de: Humo de cigarrillo, industria de galvanización (emisión como parte del proceso productivo) y combustión de diésel vehicular.</p> <p>La duración de cianuro de hidrógeno en la atmósfera se estima es de aproximadamente 5 meses. (Jaszczak, Polkowska, Narkowicz, & Namieśnik, 2017)</p>
	SUELO	<p>El desarrollo de actividades antrópicas, como la galvanización, gasificación subterránea de carbón y metalurgia, contribuyen con el impacto ambiental del cianuro en el suelo bien sea por la disposición</p>

		<p>inadecuada de residuos contaminados con cianuro o a través de filtraciones como consecuencia de vertimientos en agua residual industrial contaminada con el compuesto químico. Cualquiera sea la razón, la contaminación del suelo depende en gran medida a la cantidad del depósito y la actividad que genere la filtración. Al depositarse en el suelo su toxicidad puede ser baja, sin embargo, al contacto con la luz se convierten en cianuros libres, tóxicos y volátiles.</p> <p>Un indicador de contaminación del suelo es su coloración azul, derivada de ferrocianuro de hierro Fe₄ (Jaszczak, Polkowska, Narkowicz, & Namieśnik, 2017)</p>
	<p>AGUA</p>	<p>Actividades tales como minería aurífera, galvanización y fotografía tienen efluentes contaminados con cianuro producto de sus actividades productivas, con lo cual, vierten aguas residuales industriales en cuerpos de agua superficiales, en sistemas de alcantarillado público y, en algunos casos, generan filtraciones en aguas subterráneas. Sin embargo, en el caso específico de la minería aurífera el mayor impacto obedece a los drenajes ácidos que perduran en el tiempo aun cuando las minas han sido cerradas.</p> <p>Ahora, la ficha técnica del cianuro de potasio (KCN) manifiesta que, aun cuando el compuesto químico es biodegradable, al entrar en contacto con el agua libera gases tóxicos para especies acuáticas.</p> <p>La resolución 0631 de 2015 establece valores y límites permisibles para vertimientos puntuales en cuerpos de agua superficiales y alcantarillado público, asimismo establece que, previo a la descarga de un efluente este debe ser sometido a tratamiento y posterior caracterización con el fin de determinar si el agua clarificada es apta o no para ser vertida, sin embargo, la mayor preocupación radica en el impacto ambiental que genera el agua residual industrial vertida en fuentes de agua superficiales en condiciones carentes de tratamiento ya que tiene efectos negativos en la cadena trófica, ya sea por bioacumulación o no, así como en las macrófitas de medios lénticos y lóticos (Ministerio , 2015)</p>

	<p>SOCIAL (SALUD HUMANA)</p>	<p>De acuerdo con la ficha técnica del cianuro de potasio (KCN) es potencialmente tóxico para humanos, provoca náuseas, vómitos, insuficiencia respiratoria, vértigo, inconsciencia, parálisis respiratoria, sobre el sistema cardiovascular, taquicardia, muerte. Con ello la dosis mínima letal son 2,86mg/kg (ingesta oral) y 0,051 mg/l (inhalación – polvo/niebla). El compuesto químico es de rápida absorción. (MERCK , 2014).</p> <p>Frente al cianuro de sodio (NaCN) la ficha técnica no reporta valores sobre mínimo letal en humanos sólo en organismos acuáticos y otros mamíferos como ratas y conejos.</p> <p>Frente a la salud humana también es importante tener en cuenta que los impactos socioambientales no solo obedecen a los vertimientos de aguas residuales industriales (ARI) contaminadas con cianuro si no, también es preciso prestar especial atención a procesos de metilación de mercurio que la actividad de minería aurífera provoque dado el uso de cianuro (CN) para la lixiviación de oro y mercurio (Hg) como reactivo, ya que la combinación de estos dos provoca una reacción química llamada metilación de mercurio (CH₃)₂ Hg, (Sánchez & Andrade , 2009) la cual se moviliza más rápido en la cadena trófica acuática (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible , 2016) ya que se biomagnifican en los tejidos de todos los organismos superiores de la cadena trófica, tanto en especies nativas como migratorias y en la especie humana (Bell , DiGangi , & Weinberg , 2014).</p> <p>Asimismo, en caso de ingesta accidental de plantas contaminadas con cianuro esto puede generar parálisis permanente de las extremidades. (Guerrero , 2015)</p> <p>Finalmente, frente a la exposición ocupacional el riesgo aumenta a medida que se incrementan los periodos de exposición por, inhalación polvo/niebla, bien sea, de cianuro de sodio (NaCN) y cianuro de potasio (KCN), tiene efectos sobre el sistema nervioso central (SNC) así como el sistema respiratorio y cardiovascular. (Guerrero , 2015)</p>
--	-------------------------------------	--

BIÓTICO	FLORA ACUÁTICA	<p>En cuanto a flora acuática el cianuro de sodio (NaCN) es potencialmente tóxico en algas <i>Nitzschia closterium</i>. (Sigma-Aldrich, 2014)</p> <p>En cuanto a flora acuática el cianuro de potasio (KCN) es potencialmente tóxico en algas verdes <i>Scenedesmus quadricauda</i> (MERCK , 2014)</p> <p>En los dos casos, las algas son bioindicadores de contaminación de cuerpos de agua con cianuro.</p>
	FAUNA ACUÁTICA	<p>De acuerdo con la ficha técnica del cianuro de potasio (KCN) este es potencialmente tóxico para fauna acuática, especialmente peces de la especie <i>Lepomus macrochirus</i> (pez-luna blugill) con una concentración tóxica límite de 0,45 mg/l; 96 h en agua blanda, <i>daphnias</i> 2 mg/l; 48 h y otros invertebrados acuáticos 1,8 - 1,9 mg/l; 72 h (MERCK , 2014).</p> <p>Por otro lado, la ficha técnica del cianuro de sodio (NaCN) reporta toxicidad en fauna acuática en peces tales como: <i>Oncorhynchus mykiss</i> (Trucha irisada) con una concentración tóxica límite de 0,05 mg/l - 96 h y <i>daphnia magna</i> 0,09 mg/l - 96 h (Sigma-Aldrich, 2014)</p>
	FAUNA TERRESTRE	<p>La ficha técnica del cianuro de sodio (NaCN) indica toxicidad aguda para mamíferos como conejos, ratones y ratas con síntomas que incluyen depresión pulmonar, somnolencia y disnea. Asimismo, frente a procesos reproductivos puede producir fetotoxicidad y efectos teratogénicos (Sigma-Aldrich, 2014)</p> <p>Es un inhibidor enzimático no específico, es decir, induce a la hipoxia celular en mamíferos pequeños, tal y como lo indica la ficha técnica. Dentro de las enzimas que inhibe se encuentran la superóxido-dismutasa, la anhidrasa carbónica, la citocromooxidasa, responsables de la producción de ATP. (Guerrero , 2015)</p>

Elaborado por autor

5.1.5 Marco jurídico colombiano para manejo de aguas residuales industriales

La normatividad colombiana es amplia en cuanto al manejo y preservación de recursos naturales, así como el tratamiento y gestión de las aguas residuales industriales ARI y residuos peligrosos RESPEL. A continuación (**ver Tabla 4 Marco jurídico en Colombia**) la especificidad de la normativa.

Tabla 4 Marco jurídico en Colombia

NORMA	DESCRIPCIÓN
CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE 1991	Art. 79 Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de vital importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.
DECRETO LEY 2811 DE 1974	Código Nacional de Recursos Naturales y no Renovables. El ambiente es un patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo.
LEY 99 DE 1993	Por la cual se crea Ministerio Medio Ambiente y se organiza el SINA (Sistema Nacional Ambiental). Reforma el sector público encargado de la gestión ambiental. Se establecen principios generales como guía de la política nacional ambiental.
DECRETO 1594 DE 1984	Se reglamenta el vertimiento de residuos líquidos en cuerpos de agua. Procedimiento para toma y análisis de muestra, calidad de agua, ordenamiento del recurso hídrico, entre otros.
DECRETO 901 DE 1997	Determina las tasas retributivas para vertimientos de residuos líquidos puntuales en cuerpos de agua.

**RESOLUCIÓN 631 de
2015**

Establece, la norma técnica para el control, manejo de vertimientos y su límite permisible en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones a nivel nacional.

Sector actividad minera Art. 10. Parámetros físicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas ARnD a cuerpos de aguas superficiales, de actividades de minería. “Parámetro: iones Cianuro total (CN) - extracción de carbón de piedra y lignito, extracción de minerales de hierro y extracción de oro y otros metales preciosos 1,00mg/L” (MINAMBIENTE , 2015)

Sector hidrocarburos Art. 11. Parámetros físicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas ARnD a cuerpos de aguas superficiales, de actividades asociadas con hidrocarburos (petróleo, crudo, gas y derivados) “Parámetro: iones Cianuro total (CN) – exploración, producción y refino - 1,00mg/L. (MINAMBIENTE , 2015)

Sector de fabricación y manufactura de bienes Art. 13. Parámetros físicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas ARnD a cuerpos de aguas superficiales, de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes “Parámetro: iones Cianuro total (CN) – fabricación de abonos y compuestos inorgánicos nitrogenados, fabricación de sustancias y productos químicos, fabricación de ácidos inorgánicos y sales 0,50mg/L. Fabricación de plástico en forma primaria, de forma básica y artículos de plástico 1,00 mg/L. Tratamiento de revestimiento de metales y fabricación de pilas, baterías y acumuladores eléctricos 0,10 mg/L. Fabricación de equipos eléctricos de iluminación 0,50mg /L . Fabricación de maquinaria y equipos de recubrimiento electrolíticos y siderurgia 0,50mg/L. Fabricación y autopartes 0,20 mg/L. Imprentas y litografías 0,20mg/L. Actividades de atención a la salud humana, atención médica con o sin internación 0,50 mg/L” (MINAMBIENTE , 2015)

Actividades comerciales, industriales, o de servicios diferentes a los contemplados en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales Art. 15.

	Parámetros físicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARnD a cuerpos de aguas superficiales “Parámetro: iones Cianuro total (CN⁻) 0,10mg/L” (MINAMBIENTE , 2015)
RESOLUCIÓN 3957 DE 2009	Establece, la norma técnica para el control, manejo de vertimientos y su límite permisible, en la red del sistema de alcantarillado público en el Distrito Capital.
Decreto 4741 de 2005	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral
Ley 1252 de 2008	Por medio del cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones
Resolución 1362 de 2007	Por la cual se establece los requisitos y el procedimiento para el registro de generadores de residuos o desechos peligrosos, a que hacen referencia los artículos 27º y 28º del decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005.
Decreto único reglamentario 1073 de 2015	Decreto único reglamentario del sector administrativo de minas y energía
Ley 685 de 2001	Código de minas y otras disposiciones en torno a explotación de minerales en Colombia
Decreto 1076 del 2015	Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible

Elaborado por autor

5.2 CAPÍTULO 2

5.2.1 Tratamientos convencionales

De manera convencional se han utilizado algunos métodos fisicoquímicos para la eliminación del cianuro, aunque con desventaja por ser altamente costosos y con alto consumo de energía. A las técnicas para degradar cianuro se les llama procesos de minimización del cianuro, siendo la transformación del cianuro en un compuesto menos tóxico, mediante reacciones de óxido-reducción, tecnología utilizada para remediar aguas residuales contaminadas con cianuro.

5.2.1.1 Oxidación química del cianuro

Existen algunos tratamientos químicos para tratar de eliminar el cianuro, todos dirigidos a la oxidación del cianuro a cianato, a lo mejor menos tóxico y posteriormente disociable en dióxido de carbono y nitrógeno; mediante: dilución, degradación natural, oxidación química, Precipitación. (Fernández , Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina , 2007)

Los métodos de oxidación química con más importancia para el tratamiento de cianuro son: el procedimiento con Dióxido de azufre (SO_2) /Aire, (Patentado por la compañía minera canadiense INCO) y el proceso de tratamiento con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), (Patentado por Degussa). Otra opción de oxidación química anterior a las nombradas es el Proceso de Cloración Alcalina, utilizada ocasionalmente en la industria minera. (Castillón , 2015)

A continuación, se describe cada uno de los métodos de oxidación química en relación:

5.2.1.2 Peróxido de hidrógeno

Es un oxidante eficiente no contaminante, de amplio uso durante los últimos años, principalmente en grandes instalaciones metalúrgicas de todo el mundo (puntualmente para tratamientos de efluentes cianurados residuales). El reactante se distribuye en tanques de plástico de 1 m³ con concentraciones superiores al 70 % en H₂O₂. Las reacciones de oxidación tienen lugar al pH natural del efluente (normalmente es de 10), y no requiere control de dicho parámetro, ya que el H₂O₂ sólo muestra un tenue carácter ácido. (Castillón , 2015)

Este proceso se desarrolla en contenedores abiertos. Sin embargo, la reacción es semejante sin afectarse por la agitación que es necesaria para efectuar una óptima mezcla del oxidante con el efluente, y evitar el almacenamiento de precipitados en los tanques de reacción. Se requieren 1,31 gramos de H₂O₂ por gramo de CN oxidado, aunque actualmente, el consumo es de 2-8 gramos de H₂O₂ por gramo de CN oxidado. La reacción motora de oxidación es afectada por la presencia de mínimas concentraciones de iones de Cu (10-20 mg/l) que funcionan como catalizadores. Es adecuado para el manejo de efluentes con iones Cu en solución por encima de 20 mg/l. Cuando hay carencia de estos iones, la reacción ocurre de manera lenta, necesitando exceso de H₂O₂ para la aceleración del proceso y hasta añadirlos en forma de CuSO₄. La lentitud de aquella reacción es mayor a la que tendría lugar usando UV-foto activación, Ácido Caro o Hipoclorito (Castillón , 2015).

5.2.1.3 Tratamiento con “ácido de caro”:

El tratamiento de oxidación mediante el uso del ácido de Caro se amplió a escala industrial a finales de los noventa, como una opción respecto a otros métodos oxidantes por las numerosas ventajas que presenta (Gómez P. , 2012)

Al presente se usa en algunas plantas de USA como sustituto de otros métodos.

El ácido de Caro es una solución de H₂SO₅ (peroxomonosulfuric-acid.) por medio de su mezcla y producida por altas concentraciones de H₂SO₄ (mínimo del 95 %) con H₂O₂

(concentración del 50-60%). A pesar de ser un ácido, depende de una base como el NaOH o Ca (OH)₂, debiendo ser agregada al efluente al tiempo, con el fin de conservar el pH de (9-9,5) (Castillón , 2015).

Relacionado con otros oxidantes (incluido el H₂O₂), el ácido de Caro tiene una velocidad alta de oxidación, sin adición de catalizadores y alta eficiencia, como parte de la solución en fangos. Como en el caso del H₂O₂, el cianato formado se hidroliza espontáneamente generando carbonato y amonio (Castillón , 2015).

5.2.1.4 Tratamiento con UV - H₂O₂

Desde hace algún tiempo se ha tenido en cuenta el uso del H₂O₂ foto activado para la restauración de efluentes industriales, especialmente la eliminación directa de disolventes orgánicos y cianuros.

Aunque aún está vigente, entre sus ventajas se puede resaltar su efectividad, limpieza y solo necesita añadir H₂O₂, aunque sea un proceso lento. Entre sus desventajas es que se debe al uso de foto activadores, reduciendo las posibilidades en un campo de acción, porque la presencia de partículas en suspensión provocaría la absorción de la radiación y también, la disminución de la intensidad. (Castillón , 2015).

La absorción de la radiación U.V. (de intensidad solar) en agua pura ocurre a menos de 1mt de fondo, el espesor de la solución irradiada debe ser mínima y la precipitación de los sólidos que tiene lugar durante el proceso reducirá posiblemente su efectividad. (Castillón , 2015).

Para la aplicación del método en balsas de contención, estas deben de estar ubicadas en territorios con altas irradiaciones solares durante todo el año y mínima profundidad (- de 50 cm). La precipitación de sólidos en este caso no sería un problema ya que precipitarían facilitando la solución puntual y el H₂O₂ debería ser mezclado con el efluente justo antes de su descarga en la balsa. La precipitación de sólidos en este caso no sería un problema ya que precipitarían y dejarían la solución clara (Castillón , 2015).

5.2.1.5 Tratamiento con O₃

El ozono establece como medio para el tratamiento de cianuro. Dentro de sus opciones se resalta como un proceso óptimo que logra descomponer cianuros, cianatos y tiocianatos. Lo anterior requiere un bajo mantenimiento, no se necesita transporte, acopio ni manejo de sustancias químicas, así como de producción de residuos químicos tóxicos.

El reactivo para usar es una composición de ozono y oxígeno (V=3%), apto para crear ambientes oxidantes cuando es introducido en forma de burbujas en un medio acuoso. El costo, en un tiempo muy amplio, ha ido decreciendo de una manera constante por uso excesivo. De todos modos, la ausencia de información sobre la cinética y los mecanismos de la reacción de oxidación ha limitado su aplicación. Por la baja disolución del ozono en agua, y sumado a la baja concentración de O₃, el cambio de masa al medio a tratar es necesario tener en cuenta los efectos de sus parámetros como el pH, temperatura, velocidad de agitación y rango de flujo descendente en los coeficientes de transferencia de masa (Castillón , 2015).

5.2.1.6 Cloración alcalina

Es el proceso más común usado en la industria minera para la reducción de cianuro. No remueve en su totalidad el cianurado de Fe, siendo una desventaja el uso de este método y su costo depende del efluente y su estructura. Como reactivo se usa el cloro en gas, se pone en agitadores teniendo en cuenta el pH (10.5) y tiempo de 30 a 90 minutos. Los excesos de cloro deben ser apartados antes de la deposición final del efluente. Dentro del proceso de oxidación mediante la aplicación de cloro, hay que mencionar el método GSH (Gas-Sparo-Hydrocyclone) que ha sido probado, utilizando un hidrociclón como reactor y como oxidante el gas dióxido de cloro (ClO₂), alcanzando una diferencia muy elevada en la destrucción de cianuro (99%) en un tiempo no mayor a 5 min (Castillón , 2015).

5.2.1.7 Proceso INCO

El dióxido de azufre ha estado en uso durante largo tiempo, con el fin de oxidar medios cianurados. La patente obtenida de una de las variantes del método en 1980, siendo la más empleada desde entonces: el proceso "INCO".

Este tratamiento de oxidación se establece mediante la inyección, en el depósito de detoxificación, de una mezcla de dióxido de azufre y aire, ocurriendo la oxidación del cianuro libre y el cianuro WAD (Weak Acid Dissociable - dissociable en ácido débil) evidentes en un medio acuoso, usando como catalizador iones de cobre. El proceso es recomendado para efluentes con más de 200 mg/l de cianuro total, reduciendo su resultado a menos 1 mg/l. Las concentraciones de cobre, zinc, níquel y hierro son reducidas a valores muy bajos (<2, <1, <1 y <0.5 mg/l respectivamente). La elevada validez en la eliminación del hierro es atribuida al bajo potencial oxidante del sistema, que logra mantener el hierro en su forma minimizada. Una desventaja se determina en la entrada al sistema de altas cantidades de iones sulfato, aumentando la concentración de sales disueltos (Castillón , 2015).

5.2.1.8 Hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno

Es una aplicación en el ámbito industrial en el que se hace uso del reactivo NaClO (hipoclorito de sodio), a cambio de Cl₂, homogenizado con H₂O₂, según la cantidad de peróxido de hidrogeno. La reducción de cianuro empleando hipoclorito en conjunto con el peróxido de hidrógeno origina un compuesto toxico de cloruro cianógeno (CNCl). El proceso no alcanza este punto debido al exceso de cloro, debido a la amplia reacción (Castillón , 2015).

5.2.1.9 Precipitación

En cianuros estables se alcanza mediante el hierro, la cual minimiza la fuerza de cianuro libre, siendo capaz de estabilizar los altos niveles de otros posibles metales presentes. Los cianuros de hierro suelen reaccionar con otras sustancias químicas y originar precipitados sólidos, conteniendo sales insolubles de cianuro, y logrando la remoción de cianuro de la solución. Parte del cianuro en las soluciones reacciona con otros componentes químicos y forman concentraciones menos tóxicas de compuestos tales como el amoníaco, el nitrato y el dióxido de carbono (Castillón , 2015).

5.2.1.10 Carbón activado

Es utilizado para la eliminación de niveles bajos de cianuro y metales, logrando ser menos invasivo en los efluentes. El uso e implementación de este método es estrictamente

controlado por sus altos costos y reuso, no es factible para tratar tiocianato y amoniaco (Fernández , Desarrollo de un nuevo método para la eliminación del cianuro de aguas residuales de mina , 2007).

5.3 CAPÍTULO 3

5.3.1 ¿Qué es biorremediación?

La biorremediación es una alternativa de restauración implementando microorganismos inoculados para convertir la estructura de los hidrocarburos en elementos menos tóxicos, con el fin de mitigar el impacto ambiental en zonas contaminadas.

En un medio no contaminado, los organismos heterótrofos como bacterias, hongos, protistas degradan continuamente todo material orgánico útil, para la obtención de energía. Si un contaminante inorgánico como una sal de cianuro u orgánico como: combustible, petróleo u otro liberado al medio algunos de los microorganismos propios morirán, y sobrevivirían otros con la capacidad de degradar estos compuestos orgánicos e inorgánicos. Es entonces mediante la biorremediación que incide en estos organismos nutrientes, oxígeno, y otras condiciones que favorecen un óptimo aumento y reproducción. Es posible degradar el contaminante orgánico a más velocidad, facilitando el proceso descontaminante. Según el sitio y contaminantes, la biorremediación puede llegar a ser más eficiente y a menor costo, que otras alternativas, como la incineración o el enterramiento de los materiales contaminados. (Vásquez , Guerrero , & Quintero , Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados , 2010)

Esta técnica trabaja con el proceso metabólico de los microorganismos para convertir contaminantes orgánicos en compuestos no contaminantes, es posible que haya una

intervención en microorganismos autóctonos del área contaminada, inoculando cepas o fuentes microbianas que posea las esas rutas metabólicas necesarias para procesar el contaminante a eliminar; los resultados positivos de estas inoculaciones dependen de factores abióticos como: pH, temperatura, potencial de reducción, disponibilidad de agua y nutrientes, y también de factores bióticos: como la competencia microbiana, comensalismo, parasitismo y depredación que pueden limitar el crecimiento y desarrollo de las poblaciones inoculadas (Medina , J., 2018).

Como ventaja la biorremediación es más económica y su impacto en el medio ambiente es mínimo, las técnicas de biorremediación son viables para algunos tipos de contaminación. Cuando ocurre una acumulación de sustancias toxicas o no biodegradables la biorremediación no es funcional, ya que la colonización y aumento de los microorganismos se inhibe. (Vásquez , Guerrero , & Quintero , Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados , 2010)

“La biorremediación se ha centrado en la explotación de la diversidad genética y versatilidad metabólica que caracteriza a las bacterias para transformar contaminantes en productos inocuos, o en su defecto menos tóxicos, que pueden entonces integrarse en los ciclos biogeoquímicos naturales La biorremediación se ha concentrado en el aprovechamiento de la diversidad genética y ligeros procesos metabólicos que caracteriza a las bacterias para convertir contaminantes en productos inocuos, que pueden integrarse en los periodos biogeoquímicos naturales”. (López & Lozada , 2011)

5.3.2 Tipos de biorremediación

Ahora bien, entendiendo qué es la biorremediación y los diferentes mecanismos aeróbicos o anaeróbicos, resulta relevante reconocer cómo funciona la degradación de cianuro desde la biorecuperación hasta la biofiltración. La degradación de cianuro constituye un papel fundamental en los procesos de recuperación de cuerpos de agua o en los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales, por ello **(ver Tabla 4. Tipos de biorremediación)** se encontrará, grosso modo, la explicación de los diferentes mecanismos de degradación apoyados en microorganismos (hongos, algas, bacterias) y fitorremediación, para el caso de aguas residuales industriales, apoyado en macrófitas.

Tabla 5 Tipos de biorremediación

BIORREMEDIACIÓN			
	MECANISMO	VENTAJAS	DESCRIPCION
BIORECUPERACIÓN	Aerobio y anaerobio	Es posible aplicar la técnica en acuíferos degradados por metales pesados y compuestos inorgánicos como el cianuro. También es útil para suelos degradados por los mismos compuestos. (Suárez , 2013)	Son un grupo de técnicas biocorrectivas que usa microorganismos para degradar o reducir sustancias toxicas bien sea para minimizar su impacto negativo contaminante o para reducirlo. Algunos de los procesos implícitos dentro del grupo de técnicas, son: biotransformación y biodegradación.

FITORREMEDIACIÓN	Aerobio	Los contaminantes rizodegradados y fitoestabilizados pueden ser extraídos a través de la biomasa. Además, los compuestos químicos de las raíces tienen capacidad de adsorción inmovilizándolo y fijándolo en el suelo a través de la fitoestabilización. Finalmente, se sintetiza la degradación a través de la fitodegradación metabolizando los contaminantes dentro del tejido de la planta haciéndolo inocuo o reduciendo la toxicidad del contaminante. (Agudelo , Macías , & Suárez , Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos, 2015)	Es una alternativa biológica que sintetiza y remueve contaminantes orgánicos e inorgánicos del cuerpo de agua (a través de humedales artificiales o biofiltros), de lodos, sedimentos o suelos contaminados por metales y metaloides, plaguicidas, disolventes, cianuro y HAP's a través de la simbiosis entre la rizosfera, suelo, microorganismos que usan los contaminantes como fuente de carbono.
BIOESTIMULACION	Aerobio	Es viable económicamente dado los bajos costos, sin embargo, es útil como pretratamiento por lo que precisa acompañamiento de otras técnicas de biorremediación para reducir, sintetizar o minimizar la carga contaminante de cianuro presente en el agua residual. Adicionalmente, precisa tener en cuenta el tiempo de retención hidráulica para que la población bacteriana reduzca la carga contaminante. (Ome , 2017)	Es una técnica que consiste en bioestimular la población bacteriana presentes en el agua residual para reducir la carga contaminante de esta. Con bacterias nativas del medio puede incrementarse la eficiencia de remoción. En tratamientos, como bioestimulación y bioaumentación, el crecimiento bacteriano se da en un medio controlado a través de un biocatalizador rico en nutrientes, esencialmente: oxígeno, nitrógeno, carbono y fósforo.
BIOAUMENTACION	Aerobio	Es viable económicamente dado los bajos costos y en comparación con técnicas químicas es eficiente también, por ejemplo, el uso de bacterias pseudomonas fluorescens tiene un rendimiento hasta del 90% en remoción de cianuro en ARI de acuerdo, por supuesto con características físico químicas	La bioaumentación selecciona un grupo determinado de cepas bacterianas especializadas, desarrolladas específicamente para sintetizar un contaminante determinado dadas sus capacidades para metabolizar contaminantes como metales pesados, cianuro,

		<p>amigables para la población bacteriana. Tal cual la técnica de bioestimulación, es preciso tener en cuenta el tiempo de retención hidráulica para que la población bacteriana reduzca la carga contaminante. (Ome , 2017)</p>	<p>HAP's, y derivados de hidrocarburos</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">BIOFILTRACIÓN</p>	<p>Aerobio y anaerobio</p>	<p>Los costos son bajos y es posible apoyar el uso de biofiltros en los humedales artificiales con macrófitas capaces de degradar cianuro u otros compuestos. No quieren demasiado espacio, sin embargo, sí precisa ser controlada la temperatura, la disposición del lecho filtrante, así como el material de grava.</p> <p>El tiempo de retención, sedimentación y degradación obedecen en gran medida a la temperatura del medio y al tipo de lecho. Además, es una técnica útil solo para pretratamiento de materia orgánica cuando no es acompañada de macrófitas para degradar otros contaminantes. (Romero , 2016)</p>	<p>Los biofiltros son dispuestos a través de lechos filtrantes en humedales artificiales. El lecho filtrante tiene una composición de material de grava y arena de diferentes gravimetrías con el fin de filtrar materia orgánica.</p>

Elaborado por autor

5.3.3 ¿Cómo metabolizan los microorganismos para contribuir a la biorremediación?

Uno de los papeles principales de los microorganismos es la transformación dentro de la naturaleza.

La biorremediación a través de microorganismos degradadores de cianuro, es un proceso biológico propio de algunas especies que tienen la capacidad de usar el cianuro como fuente de carbono o nitrógeno obteniendo como resultado un subproducto menos tóxico (Restrepo , Montoya , & Muñoz , 2016).

5.3.3.1 Metabolismo bacteriano

Los seres vivos tienen la capacidad de obtener nutrientes y con ello contribuir con procesos de crecimiento o aprovechamiento de estos. Estos procesos son conocidos como metabolismo a través del cual se desarrollan transformaciones químicas; las que sirven para romper compuestos en partes más pequeñas; catabolismo. Y la biosíntesis (construcción) anabolismo. El metabolismo también es el encargado de transformar la energía de los nutrientes. La transformación de estos en compuestos útiles se desarrolla a través de enzimas (proteínas) y la glucosa se constituye como fuente única de energía frente al crecimiento en un medio de cultivo y su transformación se da a partir de diferentes pasos que, a su vez, generan productos intermedios que finalmente contribuyen con la formación de metabolismo (Dreyfus , 2009).

5.3.3.2 Metabolismos de hongos

Al igual que todos los seres vivos, los hongos, realizan dos diferentes procesos para transformar la materia; anabolismo y catabolismo. Esta reacción metabólica le permite desarrollar sus procesos vitales. El mecanismo principal sintetiza componentes celulares para transformar la energía liberándola. Al igual que sucede en el metabolismo bacteriano, “todos los organismos funcionan bajo las mismas reglas”, ya que el metabolismo ocurre al interior de la célula donde al ingresar los nutrientes estos son transformados. Por ejemplo, para transformar el azúcar con la liberación de energía se forman productos intermedios (tal y como sucede en el metabolismo bacteriano) hasta que se obtiene el producto final, metabolismo intermediario, que para el caso de las levaduras es dióxido de carbono (CO₂) y etanol (Ruiz, 2010).

La fermentación es un proceso que no requiere oxígeno por lo que libera poca energía y acumula productos intermedios que eventualmente pueden ser liberados. Por el contrario, si el metabolismo de los hongos (o de cualquier organismo vivo) es realizado en presencia de oxígeno la energía que liberará será total, con lo cual, transformará el agua y carbono

que están contenidos en la materia orgánica oxidándola para dar como resultado CO₂ (Ruiz, 2010).

Los hongos son capaces de crecer en condiciones anaerobias con lo cual llevan a cabo su metabolismo sin vía respiratoria, a través de un estado de óxido – reducción de nutrientes donde la oxidación reduce otros compuestos ya sintetizados durante el metabolismo (Ruiz, 2010)

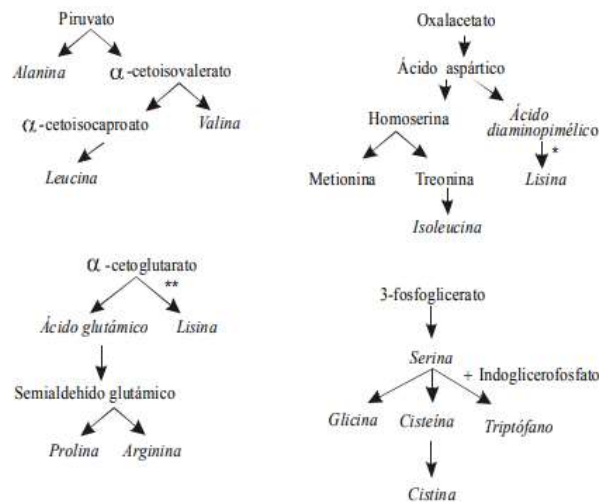
5.3.3.3 Metabolismo microbiano (bacterias y hongos unicelulares)

El aumento microbiano requiere de diferentes mixturas bioquímicas como proteínas, ácidos nucleicos, polisacáridos y lípidos, mediante elementos formados en un medio de crecimiento sintetizados por la misma célula, siendo parte también una fuente de energía para llegar a realizarse a buen término el proceso. (Junco Diaz & Rodriguez, s.f.)

La forma química frecuente en que se encuentra la energía es el adenosín-trifosfato ATP, generado por fotosíntesis con compuestos orgánicos e inorgánicos. Sus precursores más relevantes son los metabolitos focales, formado macromoléculas mediante los siguientes mecanismos:

- ADN y proteínas
- Enzimas (lípidos y carbohidratos)

Ilustración 2 Biosíntesis de aminoácidos en bacterias y hongos



* En bacterias.

** En hongos.

Fuente: (Junco Diaz & Rodriguez, s.f.)

Las rutas biosintéticas requieren la intervención de ATP, que agrega conjuntos fosfatos a diferentes medios metabólicos activándolos, y creando enlaces energéticos; algunos de los enlaces son: Guanina-trifosfato (GTP), Uridina-trifosfato (UTP), Citidina-trifosfato (CTP), Acetil coenzima A (Acetil CoA).

Mediante Fosforilación a nivel de sustrato y transporte de electrones se genera el ATP por:

Oxidación biológica: Fermentación: exclusiva de bacterias y respiración: exclusiva de bacterias y tres géneros de hongos.

Fotosíntesis: Algas

Fermentación: Proceso metabólico generador de ATP en el que compuestos orgánicos sirven tanto de donadores (oxidación) como de aceptores de electrones

Regulación del metabolismo

Cada reacción metabólica está regulada por la concentración de nutrientes en el medio. La cual se realiza a diferentes niveles: actividad enzimática, se produce: activación de enzimas alostéricas, inhibición por retroalimentación, activación alostérica y cooperatividad. Y la inducción enzimática y la represión por productos finales son mecanismos de regulación de la síntesis de enzimas. (Grotiuz & Varela , 2008)

la fermentación (como única vía de producción de energía) es bloqueada en presencia de oxígeno, asegurando que el suministro de energía se produzca por respiración, que consume menos glucosa y acumula menos lactato. En este fenómeno denominado efecto Pasteur, la enzima fosfofructoquinasa es activada o inhibida según la relación entre el ATP y el ADP, regulando así el consumo de glucosa. (Grotiuz & Varela , 2008)

Las bacterias como grupo son variables y con alta capacidad para el uso de nutrientes inorgánicos simples, a orgánicos más complejos. Los nutrientes se dividen en: esenciales, sin los cuales la célula no puede crecer y no esenciales, presentes, pero no son indispensables. Algunos nutrientes son usados solo como precursores de macromoléculas celulares, otros solo fuente de energía sin ser relacionados directamente al material celular y otros hacen las dos funciones al tiempo. (Grotiuz & Varela , 2008)

El carbono es el mayor constituyente de la célula bacteriana y es indispensable más que otro nutriente. Según la forma en que lo usa, existen fundamentalmente dos tipos de bacterias: autótrofas y heterótrofas. Las primeras son capaces de sintetizar todos sus componentes orgánicos a partir de compuestos inorgánicos como elCO₂, el nitrógeno es el constituyente principal de las proteínas y los ácidos nucleicos. La mayoría de las bacterias son capaces de usar el amonio como fuente de nitrógeno, mientras que otras pueden usar los nitratos. La reducción de nitratos se puede lograr por dos mecanismos

diferentes: reducción asimiladora, en la cual se reduce por la vía del nitrito y reducción, donde el nitrato sirve como aceptor final de electrones. El fósforo es usado para la síntesis de ácidos nucleicos y de fosfolípidos. La mayoría de las bacterias lo usan en forma inorgánica como fosfato ($PO_4^{=}$). Los fosfatos orgánicos si bien están distribuidos ampliamente en la naturaleza, para ser usados deben ser atacados primero por fosfatasas, enzimas que criban estos compuestos liberando el fósforo inorgánico. Los micronutrientes son importantes para la nutrición de la bacteria. Entre estos destacamos el cobalto, el cobre y el manganeso. (Grotiuz & Varela , 2008)

5.3.3.4 Metabolismo algas

Las algas son organismos acuáticos autótrofos. Tienen un pigmento primario fotosintético; la clorofila. Las algas absorben contaminantes (nitratos) y almacenan en sus tejidos los nitratos como proteínas. Para aumentar la biomasa solo precisan sol, agua residual rica en nitratos y oxígeno, con lo cual consumen menos energía y aumenta exponencialmente la biomasa (crecimiento de algas) (Dreckmann , Senties , & Núñez , 2013)

5.3.3.5 Fitorremediación – macrófitas

Las macrófitas flotantes pueden llegar a doblar su biomasa en muy poco tiempo y si cuenta con la disponibilidad adecuada de nutrientes su rendimiento aumenta considerablemente. La temperatura, el tiempo, el medio (léntico o lótico), los insectos, turbidez, oxígeno disuelto, otras especies en competencia (algas o macrófitas), la disponibilidad de fertilizante y el pH son determinantes en la capacidad de adsorción de nutrientes mayores. Entre más nutrientes adsorban las macrófitas flotantes aumentará su biomasa por lo tanto aumenta la cobertura y aumenta la adsorción. (Poveda , 2014)

5.4 CAPITULO 4

En la siguiente tabla se describen los diferentes métodos de biorremediación con microorganismos y macrófitas capaces de degradar cianuro presente en aguas residuales industriales. Se realizó la consulta de una amplia literatura sobre el tema central de la monografía, sin embargo, se tuvieron en cuenta estos diez métodos debido a su rendimiento, capacidad de degradación y tolerancia a aguas residuales industriales, innovación y facilidad (microorganismos o algas o macrófitas asequibles).

5.4.1 Biorremediación de cianuro

Tabla 6 Biorremediación de cianuro

APLICACIONES DE BIORREMEDIACIÓN EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES CONTAMINADOS CON CIANURO		
Título / Autor	Descripción de la técnica	Análisis
<p>Estudio del papel de los genes cio en la resistencia al cianuro de "<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i>" CECT5344 (Carmona 2016).</p>	<p>"<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i>" CECT5344, bacteria que asimila cianuro a pH alcalino. Tiene la capacidad de crecer en medio mínimo con cianuro como única fuente de nitrógeno, más acetato y otros compuestos como fuente de carbono. Esta bacteria soporta hasta 30mm de cianuro libre, asimila complejos metal cianuro, por ello es clave para el tratamiento de residuos cianurados. Su potencial ha sido demostrado en un reactor discontinuo (detoxificación de cianuro) y a través de un biosensor (detección de cianato) mediante la enzima cianasa.</p> <p>Se ha demostrado que la expresión de la oxidasa terminal</p>	<p>"<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i>" CECT5344</p> <p>Durante el metabolismo las bacterias del género pseudomona sintetizan las enzimas de nitrilasas y oxidasas que son las proveedoras de carbono para transformar el cianuro. Además, debido a su versatilidad metabólica y de utilizar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos, las bacterias del género pseudomonas son una alternativa económica y técnicamente viable para tratar aguas residuales industriales (ARI) en medios controlados. Por ejemplo, en un reactor discontinuo tal y como lo menciona la descripción de la técnica.</p>

	<p>cio1 es necesaria para crecer en presencia de cianuro. El análisis y anotación del genoma ha permitido identificar los sistemas génicos que codifican las diferentes oxidasas terminales de la bacteria. (Carmona 2016)</p>	
<p>Tesis: Microorganismos Potenciales degradadores de Cianuro en residuos de minería de oro. (Cardona, 2015)</p>	<p>Para el desarrollo de este trabajo, las bacterias de residuos de la minería de oro fueron aisladas. Se realizaron experimentos <i>in vitro</i> y en suelo bajo condiciones de invernadero con plantas para la degradación de cianuro. Como resultado, se encontró seis morfotipos de bacterias tolerantes y capaces de degradar las concentraciones de cianuro de 100 a 400 ppm. Dos bacterias fueron las más eficientes degradantes de cianuro en condiciones <i>in vitro</i>. Sin embargo, los resultados de biorremediación no mostraron que la degradación por bacterias y plantas fueron significativas respecto al ensayo <i>in vitro</i>. (Cardona, 2015)</p>	<p>Para las bacterias el sustrato para propiciar su crecimiento es el cianuro ya que lo utilizan como fuente de carbono o nitrógeno. algunos de los géneros de bacterias analizados son capaces de degradar el cianuro con un alto rendimiento, 96% en un tiempo aproximado de 9 días (en ensayo <i>in vitro</i>). Tal es el caso de las <i>pseudomonas fluorescens</i>, <i>pseudomonas alcaligenes</i>, <i>acinetobacter</i>, <i>enterobacter</i> y <i>bacillus</i>.</p> <p>De acuerdo con el autor (Cardona, 2015) también hay géneros de bacterias capaces de producir proteínas (enzimas) a partir del catabolismo del cianuro; <i>Chromobacterium violaceum</i> y <i>Klebsiella oxytoca</i>. De acuerdo con los resultados sobre la actividad microbiana y sus capacidades de degradación es posible inferir que podrían utilizarse procesos de tratamiento biológico de aguas residuales industriales contaminadas con cianuro como tratamiento principal y no como complemento, sobre todo porque el rendimiento bacteriano es casi del 100%.</p>
<p>Adsorción de cianuro a partir de medio</p>	<p>La adsorción es uno de los métodos de tratamiento más utilizados para eliminar contaminantes del agua y las aguas</p>	<p>Los métodos de adsorción son métodos físicoquímicos que comúnmente son identificados en minerales. Por ejemplo; en</p>

<p>acuoso por la cáscara de café: metodología de superficie de respuesta (Gebresematia, Gabbiye, & Omprakash, 2017)</p>	<p>residuales. En el presente trabajo de investigación, la metodología de superficie de respuesta se empleó con éxito para la optimización y el análisis del proceso de adsorción. Se realizaron experimentos en modo discontinuo para determinar el equilibrio de adsorción de cianuro en solución acuosa. En condiciones óptimas de concentración inicial (10 mg / l), tiempo de contacto (1 h), dosis de adsorbente (1 g) y pH (8), se obtuvo el 90,6% de la adsorción de cianuro. El diseño factorial y el análisis RSM demostraron que los valores experimentales y predichos de los modelos estaban de acuerdo. (Gebresematia, Gabbiye, & Omprakash, 2017)</p>	<p>carbón, en zeolitas (minerales de origen volcánico), etc.</p> <p>La presente investigación sugiere que es posible remover cianuro de aguas residuales industriales a través de un método de adsorción con la cáscara del café. Si bien no menciona la variedad del café, se podría suponer que es arábica, dado que es la variedad más abundante en los países que la cultivan, con lo cual, además de adsorber cianuro de ARI es una solución sostenible para el manejo de residuos orgánicos y postcosecha de productos agrícolas.</p> <p>Experimentalmente, in vitro, arrojó como resultado un rendimiento del 91% en condiciones de tiempo controlado (1h), con pH de 8 (El pH en la cáscara de café no es ácido como en los cultivos o en la bebida, por ejemplo). Con una relación de 10mg/L de CN y dosis de 1g adsorbente (cáscara del café). Si bien tiene un rendimiento menor que la degradación bacteriana es preciso tener en cuenta que el método de adsorción tomó menos tiempo, es decir, la degradación bacteriana del género pseudomona tiene un rendimiento del 96% al cabo de 9 días vs. El rendimiento del método de adsorción a partir de un medio acuoso por la cáscara de café es de 91% en 1 hora. In vitro en los dos casos.</p> <p>Con lo cual, sería interesante analizar con diferentes concentraciones el rendimiento de la cáscara de café como adsorbente de CN.</p>
<p><i>Luffa Cylindrica</i></p>	<p>Material adsorbente de origen natural para retener ion cianuro en medio acuoso; los ensayos realizados se llevaron a cabo a través de la aplicación de un diseño</p>	<p>La <i>Luffa Cylindrica</i> es conocida coloquialmente en Colombia</p>

<p>como un adsorbente natural de ion cianuro en acuoso medio (Arana , González , Navarrete , & Caicedo , 2017)</p>	<p>experimental tipo factorial, evaluando variables como pH y tiempo de contacto en dos niveles. Las condiciones adecuadas para retener el ion cianuro fueron pH de 9,0 y un tiempo de contacto de 10 minutos, el comportamiento adsorbente – adsorbato se representa por la isoterma de Freundlich, el modelo cinético de adsorción se ajusta a pseudo-segundo orden. Se obtuvieron porcentajes de retenciones de ion cianuro hasta del 98.0% (Arana , González , Navarrete , & Caicedo , 2017).</p>	<p>como estropajo y pertenece a la familia cucurbitácea.</p> <p>Experimentalmente, las condiciones óptimas para que se desarrolle la adsorción del ión de cianuro en medio acuoso a través de la <i>Luffa Cylindrica</i> es con un pH de 9.0 y un tiempo de equilibrio de 10 minutos en superficies heterogéneas, es decir, fue preciso manipular el material reduciendo su tamaño, posteriormente se lavó el material y se secó a 80°C por lo que fue posible lograr valores de retención (adsorción) del 98,2% lo cual indica que es un excelente método para tratar ARI, si lo comparamos con la degradación bacteriana del género pseudomona y con la adsorción de la cáscara de café en medio acuoso; la <i>Luffa Cylindrica</i>, presenta mayor rendimiento, casi del 100%, en menor tiempo y con un pH más alto, suponiendo que el ARI no solo provenga de minería aurífera sino de otros procesos como galvanización, fotografía y siderurgia y con ello el efluente a tratar sea más alcalino.</p>
<p>Determinación de la tolerancia a plomo (pb), cadmio (cd) y mercurio (hg) de <i>pistia stratiotes</i> "hu ama", <i>eichhornia crassipes</i> "putu. putu" y <i>lemna minor</i> "lentejita" (Gómez C. , 2013)</p>	<p>Por un período de 3 semanas que duró la observación. También se adicionó 180 g. de lenteja de agua (<i>Lemna sp</i>) como peso escurrido a cada ensayo. Al adicionarse cianuro en la solución (altas concentraciones). Algunos iones presentes en la solución (p.e. Fe y Cu) forman compuestos con el cianuro, por tanto, disminuyen su concentración. El cianuro muestra su toxicidad a altas concentraciones (ensayos f, g y h) sobre la lenteja de agua perdiendo ésta su coloración y volviéndose blanquecina (en el transcurso del proceso), y la solución se toma de color amarillo-naranja por presencia de compuestos nitrogenados en alta concentración y formación de precipitado blanco. Los factores más determinantes en la toxicidad de la lenteja de agua fueron la concentración de cianuro, pH, CND y OD. El</p>	<p>La lentejita de agua <i>lemna minor</i> es una macrófita flotante con lo cual su capacidad para adsorber nutrientes mayores y por tanto aumentar su biomasa, capacidad de cobertura y adsorción dependen casi exclusivamente de la disponibilidad del contaminante y el pH, así como del medio si es lentico o lotico, para el caso debe ser léntico. Para esta macrófita la temperatura no es relevante pero el tiempo de retención sí lo es.</p> <p>La investigación se desarrolló en un periodo de 3 meses y con un pH entre 7 – 10 arrojando resultados óptimos de</p>

	<p>pH cambió de 7,6 a 10,3 en promedio (ensayos: f, g y h); así mismo el CND se incrementó en el ensayo h disminuye el CND (3ra semana) por la formación de compuestos estables. Como todo organismo requiere de oxígeno, durante el proceso se tuvo concentraciones significativamente bajas de Oxígeno Disuelto, llegando a producirse procesos anaerobios (ensayos blancos y a) donde la concentración de oxígeno fue mínima. La temperatura no tuvo mucha influencia porque se trabajó en un ambiente cerrado para evitar la formación de HCNg y evitar la contaminación de los ensayos (Gómez C. , 2013).</p>	<p>adsorción a través de macrófitas flotantes.</p> <p>Si bien la disponibilidad de la lenteja de agua es amplia y variada, casi en cualquier agua eutrofizada de Colombia es posible encontrarla y sin ningún costo, el proceso de adsorción toma un tiempo extenso si lo comparamos con métodos como degradación bacteriana con bacterias de genero pseudomona o si lo comparamos con métodos de adsorción con <i>Luffa Cylindrica</i> o cáscara de café. Podría ser un método de tratamiento de agua residual industrial contaminada con cianuro como complemento mas no ser el principal dado el amplio tiempo que se toma la macrófita en adsorber, aun cuando es eficiente, se considera que en términos de procesos productivos podría impactar.</p>
<p>Estudio: Degradación de tiocianato por hongos aislados de ambientes mineros y evaluación de su capacidad degradativa. (Medina, y otros, 2012) Hongo</p>	<p>El tiocianato (-SCN) es un intermediario de la conversión del cianuro por una reacción de adición de azufre. De un total de 58 mohos aislados, se obtienen 4 mohos con excelentes capacidades de degradar tiocianato y que pueden ser utilizados en biorremediación. La capacidad degradativa de estas cepas fue en promedio 10,05 mg de -SCN con una velocidad de 28,77 mg. L-1.h-1. Dos cepas fueron identificadas fenotípica y molecularmente como <i>Fusarium trincictum</i> usando el marcador ITS del gen rDNA. (Medina, y otros, 2012)</p>	<p>Las cepas de mohos aislados de Junín fueron mejores degradadoras de -SCN que las de Tumbes., el enriquecimiento con -SCN aumentó la degradación de las cepas, obteniendo resultados positivos al aislar las cepas en medios mínimos con -SCN, pH neutro para el aislamiento de bacterias. (Medina, y otros, 2012)</p>

<i>Fusarium trincictum</i>		
<p>El género fúngico <i>Trichoderma</i> y su relación con los contaminantes orgánicos e inorgánicos.</p> <p>(Argumedo, Alarcon, Ferrera , & Peña, 2009)</p>	<p>El hongo <i>Trichoderma</i> sp. Se ha empleado para la detoxificación de cianuro ya que posee don enzimas (rodanasa y cianuro de hidratasa) capaces de degradarlo. Además, la adición de glucosa como fuente de carbono alternativa al medio contaminado incrementa la velocidad de degradación del cianuro por la cepa mencionada.</p> <p>(Argumedo, Alarcon, Ferrera , & Peña, 2009)</p>	<p>Es viable utilizar la <i>Trichoderma spp.</i> Siempre y cuando se combine con mixturas arvenses y trigo. Haciendo alusión al potencial uso de cepas del grupo <i>Trichoderma</i> en procesos de biorremediación a través de la detoxificación de cianuro.</p> <p>(Argumedo, Alarcon, Ferrera , & Peña, 2009)</p>
<p>Reseña: <i>Eichhornia crassipes</i>, su invasividad y potencial fitorremediador</p>	<p><i>Eichhornia cras sipes</i>, conocido como jacinto de agua se caracteriza por ser una especie muy productiva, pero invasiva a lo largo de mundo, siendo muy difícil su erradicación; sin embargo, debido a su alta capacidad de absorber contaminantes de cuerpos de agua es utilizada hoy en día como planta pionera en procesos de fitorremediación de cuerpos de agua. (Guevara Granja & Ramirez, 2015)</p>	<p>Las amplias características de <i>Eichhornia crassipes</i> median frente a los procesos de fitorremediación, ya que tiene la capacidad de depurar y acumular metales pesados. Por su alta proliferación se recomienda su uso en humedales artificiales, para su manejo y control. (Guevara Granja & Ramirez, 2015)</p>
<p>Monografía: Microalgas: aplicaciones e innovaciones en el</p>	<p>El uso de microalgas permite la remoción del fósforo, iones, nitritos y nitratos del agua, debido a que lo usan como fuente de energía, disminuyendo así la probabilidad de eutrofización del agua. Adicionalmente, estos</p>	<p>Se ha reportado que los géneros <i>Nannochloropsis</i> sp., <i>Neochloris</i> sp. y <i>Schizochytrium</i> sp. presentan un rendimiento productivo de generación de lípidos que varía desde el 31 al 77%. Adicionalmente, se ha encontrado que</p>

<p>tratamiento de aguas contaminadas y producción de combustibles. (Ayala, 2015)</p>	<p>microorganismos pueden usar químicos residuales e integrarlos a su metabolismo, remover metales pesados y cianuro mediante adaptación y de la misma forma, tolerar compuestos altamente toxigénicos presentes en aguas contaminadas provenientes de diversas fuentes. (Ayala, 2015)</p>	<p><i>Botryococcus braunii</i> puede producir entre un 25 a un 75% de biocombustibles. No obstante, la inversión en infraestructura es elevada, debido a la complejidad de los procesos de producción. (Ayala, 2015)</p>
--	--	--

Elaborado por autor

5.4.2 Ventajas y desventajas de tratamientos de biorremediación más eficientes

Tabla 7 Ventajas y desventajas de la biorremediación de cianuro

BIORREMEDIACIÓN CN	TIPO	TIEMPO	EFICIENCIA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i>	Degradación biológica	8 días	90%	Es un tratamiento muy económico y con una alta eficiencia frente a tratamiento químicos que pueden tener el mismo rendimiento.	Es una técnica probada in vitro y precisa un medio controlado para controlar el crecimiento microbiano
<i>Pseudomonas fluorescens,</i> <i>Pseudomonas alcaligenes,</i> <i>Acinetobacter,</i> <i>Enterobacter</i> <i>Bacillus</i>	Degradación biológica	9 días	96%	Es un tratamiento muy económico y con una alta eficiencia frente a tratamiento químicos que pueden tener el mismo rendimiento, además analiza la capacidad de degradación biológica de diferentes géneros	Algunos contaminantes resultan ser resistentes a la técnica empleada. La bacteria del género pseudomona requiere especial precaución dada su facilidad de propagación.

				de bacterias.	
Cáscara de café	Adsorción	1 hora	91%	<p>Es una de las técnicas más eficientes en remoción de CN. No precisa un tiempo superior a 1h lo que facilita el tratamiento y el uso de espacios. El aprovechamiento de la cáscara de café obedece a la relación de 10mg/L de CN y dosis de 1g adsorbente.</p> <p>Puede ser una solución para el aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas</p>	Solo ha sido probada in vitro en condiciones controladas (pH 8)

<i>Luffa Cylindrica</i>	Adsorción	10 minutos	98,2%	<p>Junto con la cáscara de café resultan ser las herramientas más eficientes en porcentaje de remoción y tiempo de ejecución, aún cuando su método es físico químico a través de adsorción resulta ser una solución a los residuos orgánicos agrícolas, así como al manejo de las ARI contaminadas con CN, sobre todo porque el costo del material es bajo y asequible.</p>	<p>Solo ha sido probada in vitro y las condiciones adecuadas para retener el ion cianuro fueron pH de 9,0 un tiempo de equilibrio de 10 minutos en superficies heterogéneas manipulando el material para reducir su tamaño</p>	
	<i>Lemna minor sp</i>				<p>Debido a que <i>lemna minor</i> y <i>eichhornia crassipes</i> son macrófitas flotantes conocidas por su alta capacidad de depuración de CN y metales pesados. En algunos casos son</p>	<p>Requiere un periodo más prolongado si lo</p>

	<i>Eichhornia crassipes sp</i>	Fitorremediación	3 semanas	El autor no informa	conocidas como plantas invasoras” resultan de fácil propagación y acceso. Su capacidad para adsorber nutrientes mayores y por tanto aumentar su biomasa, capacidad de cobertura y adsorción dependen casi exclusivamente de la disponibilidad del contaminante y el pH, así como del medio si es lentic o lotico. Resulta ser una solución para recuperar humedales donde se ha propagado en exceso ya que se puede extraer de estos ecosistemas contribuyendo a minimizar la eutrofización.	comparamos con otras técnicas de degradación biológica o adsorción mencionadas anteriormente. Solo ha sido probado in vitro.
<i>Fusarium trincictum</i> <i>Trichoderma</i>	Degradación fúngica	El autor no informa	El autor no	Las cepas de hongos <i>Trichoderma sp</i> y <i>Fusarium trincictum sp</i> se ha empleado para la detoxificación de cianuro porque poseen enzimas capaces de degradarlo con lo cual se convierte en una	Para el caso del hongo <i>Trichoderma</i> debe combinarse con mixturas arvenses y trigo lo cual implicaría revisar en la literatura si pueden ser residuos orgánicos y no alimento, propiamente	

			informa	técnica útil y económica para detoxificación de CN en aguas residuales, podría ser usada como complemento de otra técnica de biorremediación o fitorremediación.	dicho. El autor no reporta eficiencia ni tiempo de ejecución, habría que revisar en más literatura al respecto de detoxificación fúngica para determinar su viabilidad.
<i>Nannochloropsis</i> sp., <i>Neochloris</i> sp. y <i>Schizochytrium</i> sp.	Microalgas	El autor no informa	Rendimiento varía entre 31% – 77%	El uso de microalgas permite la remoción que va desde fósforo, iones, nitritos y nitratos del agua, metales pesados y cianuro debido a que lo usan como fuente de energía, disminuyendo así la probabilidad de eutrofización del agua. El uso de microalgas <i>nannochloropsis</i> sp., <i>Neochloris</i> sp., <i>schizochytrium</i> sp., <i>arthrospira platensis</i> sp y <i>arthrospira máxima</i> sp es muy frecuente en	Requiere una alta inversión en infraestructura y mano de obra y la eficiencia reportada es muy variable, con lo cual habría que revisar más literatura para determinar eficiencia y tiempo de remoción y así tener una conclusión más

				el tratamiento de aguas residuales industriales y con residuos lácteos en plantas de tratamiento europeas.	aproximada.
--	--	--	--	--	-------------

Elaborado por autor

6. Conclusiones

Al evaluar el estado del arte de la capacidad de biodegradación de los microorganismos en aguas residuales industriales contaminadas con cianuro (ARI) fue posible concluir que:

De los tratamientos convencionales indagados los siguientes son los que logran degradar CN; el peróxido de hidrogeno H_2O_2 , es el tratamiento más adecuado para la remoción de cianuro libre porque remueve un alto porcentaje del contaminante. Por otro lado, el ácido de caro se hidroliza naturalmente generando carbonato y amonio utilizando el ozono como ayudante para el proceso de oxidación y remoción. También resulta ser más factible a nivel técnico, económico y ambiental.

En relación con los diferentes tipos de biorremediación se determinó que las *Pseudomonas fluorescens*, posee una alta capacidad de degradación siendo la opción más adecuada para el tratamiento de aguas contaminadas con cianuro. Entre los diferentes resultados de las aplicaciones de estos microorganismos se encontró una viabilidad importante frente a los métodos de remediación biológicos, siendo la mejor alternativa para biodegradar los compuestos contaminantes presentes en aguas residuales industriales.

El uso forzado de cianuro en la industria minera exige el uso de tecnologías de asequibles económico y ambientalmente para minimizar y mitigar impactos ambientales negativos.

También se estableció el estado del arte de las metodologías aplicadas para el tratamiento de aguas residuales industriales contaminadas con cianuro utilizando microorganismos en estudios de caso en América y otros países, como:

El reactor biológico rotatorio es un nuevo sistema de tratamiento biológico que maneja procesos microbianos con *pseudomonas* eficientes a la hora de remover cianuro, además de ser resistentes frente a sustancias contaminantes Compuestos cianurados, metales pesados y condiciones ambientales adversas, tales como pH ácido o alcalino, temperatura y concentraciones altas de

sustancias tóxicas e inhibitorias. Este sistema de tratamiento biológico ha demostrado tener éxito tanto a escala laboratorio como en operaciones a gran escala, como Homestake Mining Co. en Canadá. (Jaramillo & Arenas , 2016)

Finalmente, de las diferentes opciones de tratamientos de agua residual industrial (ARI) y con base en la comparación de los resultados descritos, se puede afirmar que las técnicas de tratamiento biológico, por lo general requieren una alta inversión inicial pero los costos de operación y mantenimiento son más bajos que los tratamientos convencionales (químicos) mientras que los métodos de tratamiento químicos sólo pueden tratar a la porción de cianuro residual y transformarlo en amoníaco. Los sistemas de tratamiento biológico no solamente tratan cianuro, tiocianato y cianato sino también amoníaco y nitrato con el aporte adicional a la recuperación biológica del agua residual y minimización del impacto ambiental negativo.

7. Bibliografía

- Agencia de Noticias UN , U. (23 de Octubre de 2013). Cuencas de Cali requieren urgente atención ambiental y política. *Agencia de Noticias UN*, pág. 423.
- Agudelo , L., Macías , K., & Suárez , A. (2015). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 2, núm. 1, 57-65.
- Alfonso , D. (2018). *Emisiones de material particulado de los vehículos en Bogotá. Estrategias de gestión ambiental para su mitigación* . Bogotá D.C :
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/38114/DOCUMENTO%20DIANA%20MELISA%20ALFONSO.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- Arana , J., González , S., Navarrete , L., & Caicedo , O. (2017). Luffa Cylindrica as a natural adsorbent of cyanide ion in aqueous médium. *Bdigital Portal de revistas UN* , 210 - 215 .
- Arenas , C., Jaramillo , M., & Rincón , A. (2015). *Planteamiento y evaluación de un tratamiento biológico para agua residual proveniente de proceso de minería aurífera* . Manizales :
<http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1322/Mateo%20Alejandro%20Jaramillo%20Londo%C3%B1o.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Argumedo, R., Alarcon, A., Frerrera , R., & Peña, J. (2009). *El género fúngico Trichoderma y su relación con los contaminantes orgánicos e inorgánicos*. Obtenido de Scielo: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000400006
- Ayala, E. (2015). *MICROALGAS: APLICACIONES E INNOVACIONES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS Y LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES*. Obtenido de Uniandes:
https://www.researchgate.net/publication/278676397_MICROALGAS_APLICACIONES_E_INNOVACIONES_EN_EL_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_CONTAMINADAS_Y_LA_PRODUCCION_DE_BIOCOMBUSTIBLES

- Bell , L., DiGangi , J., & Weinberg , J. (2014). *Introducción a la contaminación por mercurio y al convenio de minamata sobre mercurio para las ONG*. América Latina y el Caribe : https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-booklet-hg-update-v1_6a-es-web.pdf.
- Cardona, E. (2015). *Microorganismos Potenciales degradadores de Cianuro en residuos de minería de oro*. Obtenido de Bdigital: <http://www.bdigital.unal.edu.co/51440/1/75108346.2016.pdf>
- Carmona, M. (2016). *Estudio del papel de los genes cio en la resistencia al cianuro de "Pseudomonas pseudoalcaligenes" CECT5344*. Bogotá : <http://dehesa.unex.es/handle/10662/3836>.
- Castillón , F. (2015). DOsificación de cloro y peróxido de hidrógeno en el tratamiento de aguas cianuradas en minera LAYTARUMA S.A. En F. Castillón . Lima, Perú: http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/3963/1/castillon_hf.pdf.
- CORANTIOQUIA , C. (2016). *Manual de producción y consumo sostenible. Minería de oro*. Antioquia: <http://www.corantioquia.gov.co/SitePages/girh.aspx>.
- Depci , T., Onal , Y., & Prsbey , K. (2014). Apricot stone activated carbons adsorption of cyanide as revealed from computational chemistry analysis and experimental study. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2511 - 2517.
- Díaz , I., & Suárez , L. (2016). *UNA ESTRATEGIA PEDAGÓGICA Y DIDÁCTICA, BASADA EN EL TRABAJO PRÁCTICO DEL ANÁLISIS BROMATOLÓGICO Y TOXICOLÓGICO DE LA FARIÑA, ALIMENTO OBTENIDO A PARTIR DE LA Manihot Sculenta Krantz "YUCA BRAVA"*. Bogotá D.C : <http://repositorio.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/9133/TE-06356.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Díaz, I. L., & Suarez, L. A. (s.f.). *Trabajo de grado*. Obtenido de UNA ESTRATEGIA PEDAGÓGICA Y DIDÁCTICA, BASADA EN EL TRABAJO PRÁCTICO DEL ANÁLISIS BROMATOLÓGICO Y TOXICOLÓGICO DE LA FARIÑA, ALIMENTO OBTENIDO A PARTIR DE LA Manihot Sculenta Krantz: <http://repositorio.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/9133/TE-06356.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dreckmann , K., Sentíes , A., & Núñez , M. (2013). *Manual de prácticas de laboratorio Biología de algas* . En *Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa* (págs. 13 - 15). Mexico : <http://publicacionescbs.izt.uam.mx/DOCS/biologiadealgas.pdf>.

- Dreyfus , G. (2009). El mundo de los microbios. En *El mundo de los microbios 4a ed.* (págs. 44 - 62). México.
- Fernández , B. (2007). *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina* . España : https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/31849/UOV0080TBFP_1.pdf?sequence=1.
- Gallardo , J. (2014). *Procesos fotográficos artesanales y libro de artista* . España : http://art2investigacion-en.weebly.com/uploads/2/1/1/7/21177240/gallard_js.pdf.
- Garzón , J., Hernández , C., & Rodríguez , J. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 309 - 318.
- Gebresematia, M., Gabbiye, N., & Omprakash, S. (2017). Sorption of cyanide from aqueous medium by coffe husk: Response surface methodology . *Journal of Applied Research and Technology* , 27 - 35.
- Gómez , C. (2013). *DETERMINACION DE LA TOLERANCIA A PLOMO (Pb), CADMIO (Cd) Y MERCURIO (Hg) DE Pistia stratiotes "HU AMA", Eichhornia crassipes "PUTU. PUTU" Y Lemna minor "LENTEJIT A"*. Iquito - Perú : <http://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2949/T%20615.9%20G68.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Gómez , P. (2012). Degradación de cianuros mediante oxidación química en efluentes industriales. En P. Gómez . España: http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/3986/6/TFM_PatriciaGomezLeiva.pdf.
- Gonzalez, R., Perez, V., & Martinez, N. (2016). *Humedales subsuperficiales horizontales en la depuración de aguas oleosas. Cinética de remoción de DQO*. Obtenido de Mendeley, Afinidad: Revista de Química Teórica y Aplicada, 73(573), 50–54.: <https://www.mendeley.com/catalogue/humedales-subsuperficiales-horizontales-en-la-depuraci%C3%B3n-aguas-oleosas-cin%C3%A9tica-remoci%C3%B3n-dqo/>
- Guerrero , J. (2015). Cianuro: Toxicidad y destrucción biológica. *Biotecnología*, 22.
- Guevara Granja, M., & Ramirez, L. J. (2015). *Eichhornia crassipes, SU INVASIVIDAD Y POTENCIAL*. Obtenido de Redalyc: <http://www.redalyc.org/pdf/4760/476047267001.pdf>
- Hampel , C., & Hawley , G. (1985). Diccionario Tecnológico de Química. Barcelona.

- INGALSA. (2009). *INGALSA INDUSTRIA GALVANIZADORA* . Obtenido de <http://www.ingalsa.net/galvanizacion.html>
- Jaramillo, M., & Arenas , C. (2016). *Planteamiento y evaluación de un tratamiento biológico para el agua residual proveniente de procesos de minería aurífera*. Manizales : <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/handle/10839/1322?locale-attribute=es>.
- Jaszczak, E., Polkowska, Ż., Narkowicz, S., & Namieśnik, J. (2017). Cyanides in the environment—analysis—problems and challenges . *Environmental Science Pollut* , 15929-15948.
- Junco Diaz, R., & Rodriguez, C. (s.f.). *Metabolismo Microbiano*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Raquel_Junco_Diaz/publication/288670427_Metabolismo_microbiano/links/5682ef7908ae19758391be87/Metabolismo-microbiano.pdf
- Landford , M. (2004). *Manual del laboratorio fotográfico* . Barcelona .
- López , N., & Lozada , R. (2011). Uso de la biorremediación para el saneamiento de sustratos contaminados por petróleo en el oriente de Venezuela . *Ecodiseño y Sostenibilidad* , 227 - 236.
- Macías, A. J., & Zambrano, C. J. (2017). *Recuperación de muestras de aguas mediante microorganismos y plantas acuáticas del acuífero salino del sitio Correagua-Manabí*. Bogotá: Bachelor's thesis, Calceta: ESPAM.
- Medina , J. (2018). En *Evaluación del porcentaje de remoción de colorante negro reactivo 5 en aguas residuales del curtido de pieles utilizando 2 hongos lignolíticos* (págs. 56-78). Riobamba, Ecuador:
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/10547/1/236T0406.pdf>.
- Medina, S., Torres, M., Duran , Y., Ramirez, R., Herrera, J., & Ramirez, P. (2012). *Degradación de tiocianato por hongos aislados de ambientes mineros y evaluación de su capacidad degradativa*. Obtenido de Scielo:
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-99332012000100010
- MERCK , S. (2014). *Ficha técnica de cianuro de potasio*. Bogotá:
https://www.javeriana.edu.co/documents/4486808/5015300/CIANURO+DE+POTASIO_MERCK.pdf/aac35440-1b82-4ba8-a316-1ce6d9f63a29?version=1.0.

MINAMBIENTE . (2015). *Resolución 0631 de 2015* . Bogotá :

file:///C:/Users/Elis/Desktop/resolucion_631_de_2015_vertimientos_minambiente.pdf.

Ministerio , A. (2015). *Resolución 0631 de 2015*. Bogotá:

https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible . (2016). *Sentencia T-622/16 Principio de precaución ambiental y aplicación para proteger el derecho a la salud de las personas*. Chocó:

http://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_participacion_al_ciudadano/sentencia_rio_atrato/Sentencia_T-622-16._Rio_Atrato.pdf.

Ome , O. (2017). *Bioestimulación de microorganismos como estrategia sustentable de pretratamiento para guas residuales industriales del procesamiento de aceite de palma: un estudio de caso en Bogotá D.C* . Bogotá :

<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13928/3/OmeBarreraOscarDanilo2018.pdf>.

Pedregosa, J. (2016). *Dialnet*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=63906>

Pontificia Bolivariana , U. (2003). Guía de producción más limpia para el sector de recubrimientos electrolíticos en Colombia.

Antioquia:

<http://www.cnpml.org/archivospublicaciones/guiapmlelectroliticos/GuiaDePMLParaSectorRecubrimientoElectroliticos.pdf>.

Poveda , R. (2014). *“EVALUACIÓN DE ESPECIES ACUÁTICAS FLOTANTES PARA LA FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES Y DE USO AGRICOLA PREVIAMENTE CARACTERIZADAS EN EL CANTÓN AMBATO , PROVINCIA DE TUNGURAHUA*. Ecuador : <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/8455>.

Quiroga , P., & Olmos , V. (2009). *Revisión de la toxicocinética y la toxicodinamia del ácido cianhídrico y los cianuros* . Buenos Aires:

https://www.researchgate.net/publication/262441449_Revision_de_la_toxicocinetica_y_la_toxicodinamia_del_acido_cianhidrico_y_los_cianuros.

Ramírez , A. (2010). Toxicidad del cianuro. Investigación bibliográfica de sus efectos en animales y en el hombre. Lima :

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37919769011>.

- Restrepo , O., Montoya , C., & Muñoz , N. (2016). DEGRADACIÓN MICROBIANA DE CIANURO PROCEDENTE DE PLANTA DE BENEFICIO DE ORO MEDIANTE CEPA NATIVA DE *P. Fluorecens*. *DYNA*, 45-51.
- Rizzotto , M. (2009). Diccionario de química general e inorgánica . En *2a ed. CORPUS* (págs. 62 - 64). Rosario, Argentina : <https://ebookcentral-proquest-com.bdigital.sena.edu.co/lib/senavirtualsp/reader.action?docID=3217352>.
- Rodriguez, A. (2017). *Biorremediación de aguas contaminadas con HAP´s y cianuro mediante sistemas biosorbentes*. Obtenido de <https://hera.ugr.es/tesisugr/2844369x.pdf>
- Rojas , N. (2004). Revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diésel y biodiesel. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes* , 58 - 68.
- Roma Paumgarten, F., Gomes-Carneiro , M., & Amado Xavier de Oliveira, A. (2017). O impacto dos aditivos do tabaco na toxicidade da da fumaça do cigarro : uma avaliação crítica dos estudos patrocinados pela indústria do fumo . *CSP Cadernos de saúde pública* , 14 - 15.
- Romero , L. (2016). *Diseño de un sistema de biofiltros para el tratamiento de aguas residuales que llegan de manera directa al humedal Neuta en el municipio de Soacha* . Bogotá : <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/8906/PROYECTO%20DE%20GRADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Ruiz, J. (2010). Viaje al asombroso mundo de los hongos. En *Colección La ciencia para todos 2da. Ed.* (págs. 50 - 58). México.
- Sánchez , L., & Andrade , A. (2009). *Determinación de la concentración letal media (CL 50-96) del cianuro, por medio de bioensayos sobre alevinos de trucha arco iris (Oncorhynchus mykiss)*. Bogotá : <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/14081>.
- Sigma-Aldrich. (2014). *Ficha técnica cianuro de sodio* . Estados Unidos : https://www.javeriana.edu.co/documents/4486808/5015300/CIANURO+DE+SODIO_SIGMA.pdf/c3f8ded8-24c6-4848-be28-95ef34fa47f8?version=1.0.
- Suárez , R. (2013). *Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos* . Bogotá : <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FINAL%20cd.pdf?sequence=1>.

- Superintendencia de Industria y Comercio. (2014). *Boletín tecnológico. Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá : http://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Propiedad%20Industrial/Boletines_Tecnologicos/Boletin_Tratamiento_aguas_20140624.pdf.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). *Guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón* . Córdoba, Montería : http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Guia_orientacion_correcto_manejo_vertimientos.pdf.
- VALENCIA, U. P. (2012). *Servicio Integrado de Prevención y Salud Laboral* . Obtenido de https://www.sprl.upv.es/D7_7_14_1_b.htm
- varela, G., & Grotiuz, G. (2008). *fisiología y metabolismo microbiano*. Obtenido de <http://www.higiene.edu.uy/bacvir/materiales/cefa/2008/FisiologiayMetabolismoBacteriano.pdf>
- Vásquez , M., Guerrero , J., & Quintero , A. (2010). Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados . *Revista Colombiana de Biotecnología* , 141 - 157.
- Velasquez, J. (2016). *Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación*. Obtenido de UNAD: <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa>