

REVISIÓN DOCUMENTAL DE MICROORGANISMOS CAPACES DE DEGRADAR CIANURO PRESENTE EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

DOCUMENTARY REVIEW OF MICROORGANISMS CAPABLE OF DEGRADING CYANIDE PRESENT IN INDUSTRIAL WASTEWATER

Elis Joanna Zapata Alfonso

Ingeniera ambiental Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2142-6997>

ejzapataa@unadvirtual.edu.co

RESUMEN

Contextualización: Los cuerpos de agua sufren un problema importante gracias a la ausencia de control de vertimientos. Los drenajes de minería aurífera generan acidificación en las fuentes hídricas y en ecosistemas estratégicos, lo que provoca un deterioro ambiental alarmante. El objetivo de esta revisión es aportar una fuente de consulta sobre tratamientos eficientes para la recuperación de fuentes hídricas. En ese sentido, se pretende documentar los tratamientos biológicos, a través del uso de microorganismos capaces de degradar el cianuro en aguas residuales industriales.

Vacío de conocimiento: La contaminación en fuentes hídricas genera impactos ambientales severos debido a la toxicidad de los contaminantes y su persistencia. ¿podría la biorremediación con microorganismos, contribuir con la mitigación de impactos ambientales a través del uso de sistemas de tratamiento de aguas residuales que optimicen el resultado del efluente final sin generar subproductos?

Propósito del estudio: Se consultó información relevante sobre los diferentes grupos de bacterias del género *Pseudomonas sp.* debido a su eficiencia en la degradación de cianuro (CN) debido a que estos grupos de bacterias son capaces de usarlo como fuente de nitrógeno y carbono, metabolizándolo para obtener productos menos tóxicos, amoníaco y carbonato. **Objetivo general:** Identificar microorganismos eficientes capaces de degradar cianuro presente en aguas residuales industriales. **Objetivo**

específico: Documentar información sobre tratamientos biológicos con microorganismos con el fin de contribuir con la recuperación de fuentes hídricas.

Metodología: Se realizó una amplia revisión bibliográfica en las bases de datos Mendeley, ScienceDirect, Scielo y Scopus a través de E-Biblioteca y del Sistema Nacional de Bibliotecas, acerca de tratamientos biológicos. Como resultado, se obtuvo un universo de datos que, depurado, arrojó 37 artículos. Se consultó acerca de estudios de tratamientos biológicos con microorganismos para identificar el género bacteriano más eficiente.

Resultados y conclusiones: Resultados. Las poblaciones microbianas son capaces de degradar cianuro (CN) con eficiencia. Si se comparan con tratamientos químicos, las bacterias son más eficientes porque no generan subproductos tóxicos. Las bacterias del género *Pseudomona pseudoalcaligenes sp.*, *Pseudomonas fluorescens sp.* y *alcaligenes sp.*, demostraron eficiencia superior al 90%. **Conclusiones.** La implementación de tratamientos biológicos es una herramienta útil, económica y asequible para procesos de recuperación de fuentes hídricas contaminadas con cianuro.

Palabras clave: Biorremediación; Cianuro; Agua residual industrial; Mercurio; Minería aurífera; Microorganismo.

ABSTRACT

Contextualization: Industrial wastewaters suffer a significant problem because of the absence of control of waste dumping. Gold mining drains generate acidification at the sources and in different strategic ecosystems, causing alarming environmental deterioration. The objective of this article is to provide a source of consultation about an effective treatment in the recovery of water sources. In this sense, it is intended to document biological treatments, with the use of microorganisms, which are capable of degrading cyanide industrial wastewater.

Knowledge gap: Pollution in water sources generates severe environmental impacts due to the toxicity of pollutants and their persistence. ¿Could bioremediation with microorganisms contribute to the mitigation of environmental impacts through the use of wastewater treatment systems that optimize the result of final effluent without generating by-products?

Purpose of the study: Relevant information was consulted on different groups of bacteria of the *Pseudomona sp.* genus due to its efficiency in cyanide degradation (CN). These bacteria can use cyanide as a source of nitrogen and carbon, metabolizing it to obtain fewer toxic products, such as ammonia and carbonate. **General objective:** Identify microorganisms capable of degrading cyanide present in industrial wastewater. **Specific objective** Keep record about biological treatments with microorganisms, to contribute to the recovery of water sources.

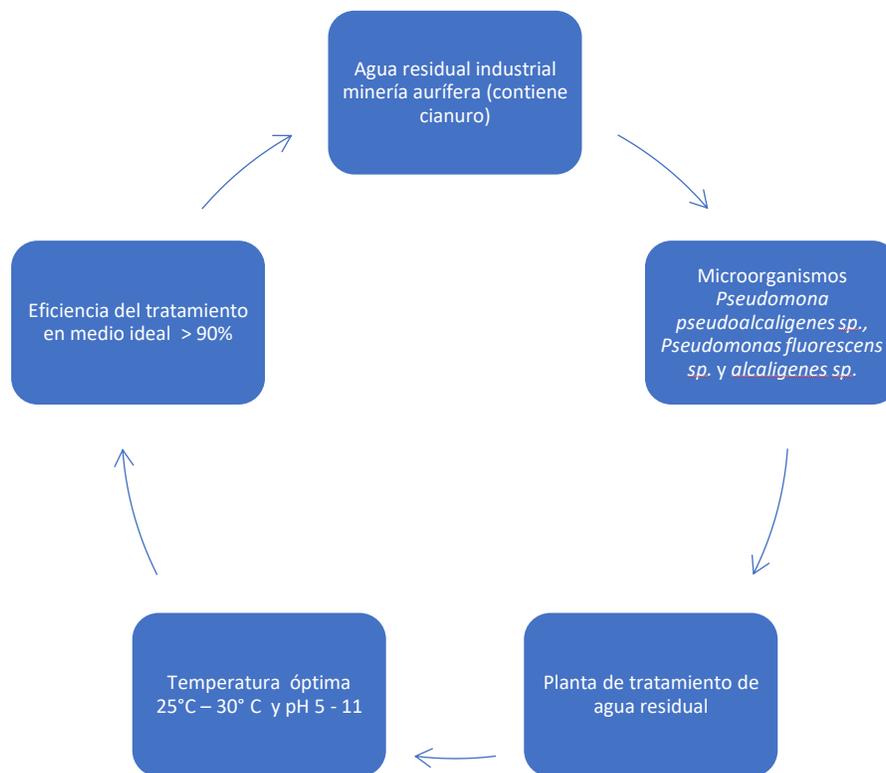
Methodology: An extensive bibliographic review was carried out in Mendeley, ScienceDirect, Scielo and Scopus databases on the E-Library and the National Library System. As a result, a universe of data was obtained that, refined, yielded 37 articles. Studies of biological treatments with microorganisms were consulted to identify the most efficient bacterial genus.

Results and conclusions: Results. Microbial populations can degrade cyanide (CN) efficiently. If we compared with chemical treatments, bacteria are more efficient because they do not generate toxic by-products. Bacteria of the genus *Pseudomona pseudoalcaligenes sp.*, *Pseudomonas fluorescens sp.* and *alcaligenes sp.* demonstrated efficiency greater than 90%. **Conclusions.** The implementation of biological treatments is a useful, economic, and affordable tool in the process of recover water sources contaminated with cyanide.

Keywords:

Bioremediation; Cyanide; Industrial wastewater; Mercury; Gold mining; Microorganism

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: Autora

1. INTRODUCCIÓN

El cianuro es un compuesto químico inorgánico y una sal derivada del ácido cianhídrico (Rizzotto , 2009). El cianuro de sodio (NaCN) y el cianuro de potasio (KCN) disuelven la plata y el oro por lo que son usados como lixiviante en la industria de la minería aurífera (CORANTIOQUIA, 2016) y, como reactivo o insumo, en la industria metalúrgica para galvanización, fotográfica, tabacalera (Roma, Gomes, & Amado, 2017), militar y siderúrgica en tratamientos térmicos y en la limpieza de metales (Rizzotto , 2009). De acuerdo con (Sistema de Información Minero Colombiano , 2020) el promedio de la producción de oro reportada durante los últimos 5 años es de 37.8Tn/año. Para lixiviación de oro es usada una solución cianurada de 0,05gr/100 ml agua. Para extraer 1 gr/oro se requieren aproximadamente 1000 lt/agua.

El cianuro es un compuesto químico, potencialmente tóxico para animales acuáticos. De acuerdo con la ficha técnica del cianuro de potasio (KCN) y cianuro de sodio (NaCN), estos son muy tóxicos para organismos acuáticos, dafnias, otros invertebrados acuáticos y macrófitas (Pontificia Universidad Javeriana, 2014) además, muy tóxico para humanos (Oliveira, França, & Rocha, 2015); en casos de inhalación, ingesta o contacto cutáneo. La dosis mínima letal por ingesta son 2,86mg/kg y 0,051 mg/l por inhalación – polvo/niebla (Pontificia Universidad Javeriana, 2014). Asimismo, para el caso del mercurio (Hg) de acuerdo con (Hosseini, Bagher Nabavi, & Parsa, 2013) es muy tóxico para algunas especies de peces porque exhibe mayor concentración en tejidos musculares, hígado y branquias (Medina, Torres, Durán, Ramírez , & Herrera, 2012).

De acuerdo con lo anterior es clasificado como sustancia de interés sanitario según la Resolución 0631 de 2015 (Ministerio Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) El límite permisible para vertimiento de aguas residuales no domésticas (ArnD) contaminadas con cianuro es de 1mg/L para la industria minera. Según el Ingeniero geógrafo y profesor de la Universidad Nacional de Colombia el deterioro de las cuencas hidrográficas del territorio nacional (Montealegre , 2013) depende en gran medida del uso de cianuro y mercurio como amalgamadores para la minería aurífera.

Son el NaCN y KCN, los compuestos químicos usados como lixiviante. A su vez, la mezcla de los dos compuestos sumados el mercurio (Hg) (Pontificia Universidad Javeriana, 2012) dan como resultado biomagnificación y bioacumulación (Vargas & Marrugo, 2019). Al usarse cianuro (CN) para la lixiviación de oro y mercurio (Hg) como reactivo, se obtiene un subproducto; metilación de mercurio (CH₃)₂ Hg (Sánchez & Andrade , 2009). Asimismo, de acuerdo con (Bell , DiGangi, & Weinberg, 2014) este se biomagnifica en los tejidos de todos los organismos superiores presentes en la cadena trófica (Kehrig, y otros, 2017) afectando dafnias, peces y otros organismos acuáticos (Sánchez & Andrade , 2009).

En este sentido, el objetivo del estudio es identificar microorganismos capaces de degradar cianuro en ARI con el fin de aportar una fuente de consulta sobre sistemas de tratamiento a través de biorremediación. Para contribuir con la recuperación de fuentes hídricas, sobre todo, en departamentos como Antioquia, Bolívar, Caldas y Chocó, donde de acuerdo con (Goñi, Sabogal , & Asmat , 2014) la minería aurífera informal, es especialmente predominante

2. METODOLOGÍA

Al realizarse la revisión bibliográfica se utilizó como motor de búsqueda, bases de datos, tales como: Mendeley, ScienceDirect, Scielo y Scopus a través de E-Biblioteca y del Sistema Nacional de Bibliotecas de la Universidad Nacional de Colombia acerca de tratamientos biológicos con microorganismos. Como resultado, se obtuvieron más de 70 registros entre tesis, artículos científicos y notas periodísticas. Sin embargo, y con el fin de tener en cuenta solo publicaciones que no superaran los 12 años, se depuraron los artículos que no cumplieran con estas características dejando menos de 40 artículos en total para consultar con más detalle, sobre todo, porque el resultado final deberían ser los microorganismos con el mejor rendimiento; para este caso las bacterias debido a su eficiencia en procesos de biorremediación.

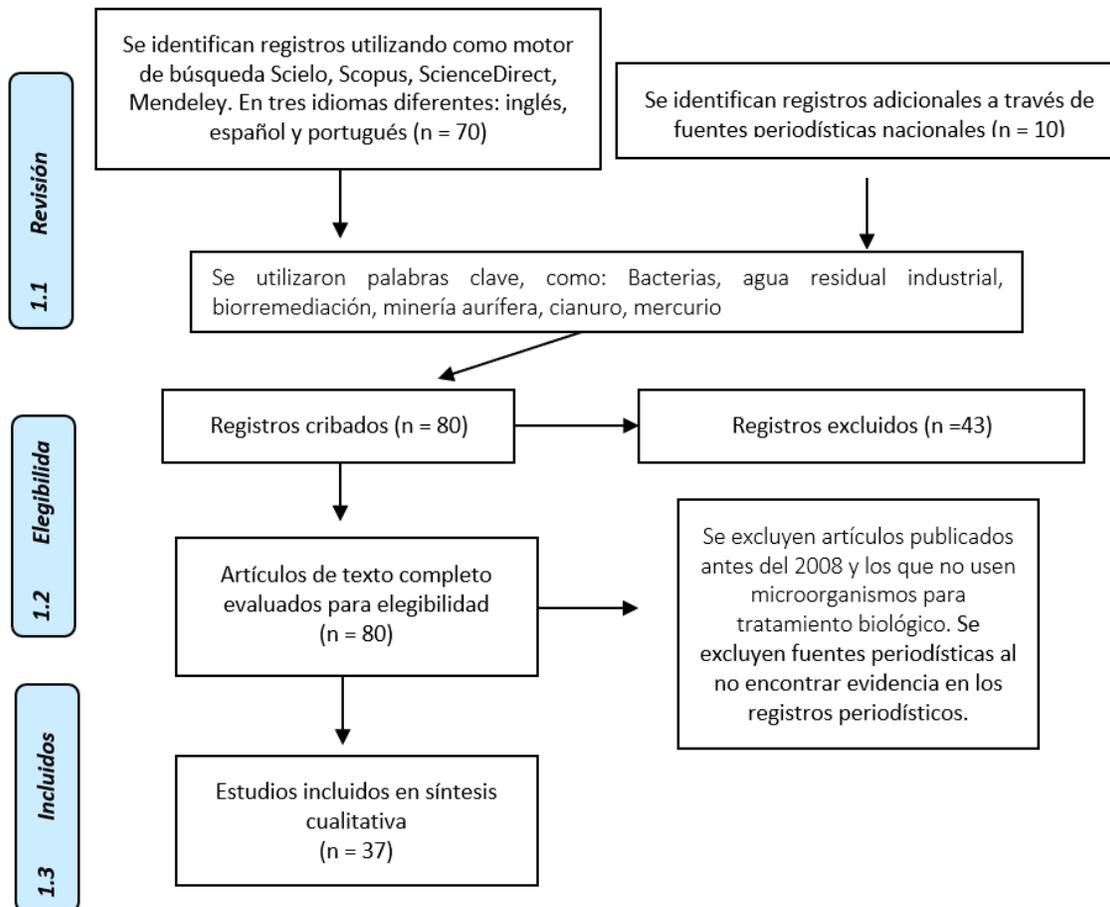


Figura 1. Metodología empleada para la elaboración del artículo de revisión **Fuente:** Autora

Tabla 1. Trabajos representativos de biorremediación de cianuro proveniente de distintas fuentes ¹

BIORREMEDIACIÓN CN	TIEMPO	EFICIENCIA	FACTORES MÁS RELEVANTES	AUTOR
<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes sp.</i>	8 días	90%	"La bacteria <i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> requiere un mínimo de CN como fuente de nitrógeno y otros compuestos como fuente de carbono" lo que la hace resistente, asequible y fácilmente propagable.	(Carmona , 2016)
<i>Pseudomonas fluorescens sp., Pseudomonas alcaligenes sp.</i>	5 días	96%	La bacteria del género <i>Pseudomonas</i> es muy eficiente, sin embargo, requiere especial cuidado dada su facilidad de propagación.	(Cardona, 2015)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	15 días	<i>Pseudomonas aeruginosa sp.</i> Concentración 50mg/L - 87%	El tratamiento a través de estos microorganismos evaluados en condiciones controladas (en laboratorio) es económico, asequible, eficiente y de fácil acceso.	(Agudelo, Betancur , & Jaramillo , 2010)

¹ Trabajos representativos de biorremediación a través del uso de microorganismos degradadores de cianuro en aguas residuales industriales. La literatura consultada reporta constantemente el mismo género bacteriano y con ello los datos sobre rendimientos no varían por lo que la autora decide listar solo los más relevantes.

			<p><i>Thiobacillus ferrooxidans</i></p> <p>Concentración</p> <p>500mg/L –</p> <p>79%</p>	
<i>Escherichia Coli</i> <i>Streptococo</i>	7 días	30%	<p>El propósito de la investigación fue identificar bacterias capaces de degradar CN. En ese proceso identificó las bacterias gram negativa del género <i>Streptococo</i> y <i>Escherichia Coli</i> logrando determinar, en laboratorio, que su capacidad de remoción es del 30%. Con ello, debido a su capacidad degradadora es posible la utilización en procesos de biorremediación, sin embargo, debido a que su rendimiento es bajo con respecto a otros géneros precisa ser complementado con otros tratamientos.</p>	(Rodallega , 2015)
<i>Pseudomonas</i> <i>Tres cepas</i>	8 días	<p>Reducción del sulfato 48%</p> <p>Porcentaje más alto de reducción de CN fue del 34% con</p>	<p>En la investigación se evaluaron parámetros que contribuyeran con la optimización de procesos de biorremediación de relaves de cianuración a través de la "adición de nutrientes y el empleo de bacterias sulfato reductoras (BSR)" con el fin de estimular la reducción de sulfatos. Sin embargo, los autores concluyeron que debido a que cada relave tiene diferentes características físico - químicas esto incide directamente en el crecimiento de las poblaciones microbianas, las requisiciones en cuanto</p>	(Hurtado & Berastain , 2012)

		adición 0,1 mM acetato de sodio	a nutrientes que mejoren sus resultados en biorremediación.
<i>Pseudomonas stutzeri</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Pseudomonas aureoginosa</i>	7 días	99%	En la valoración de la concentración bacteriana de <i>Pseudomonas</i> esta no parece ser relevante, ya que, en los tres tratamientos con sus respectivas réplicas, donde la autora valora variables como concentración bacteriana, tiempo, degradación CN; esta no incide en el resultado final. Por ejemplo, en todos los casos al cabo de 7 días el rendimiento fue el mismo. Los autores evaluaron diferentes cepas de bacterias del género <i>Pseudomonas sp.</i> entre las que estuvieron <i>Pseudomonas fluorescens sp.</i> , <i>Pseudomonas aureoginosa sp.</i> , <i>putida</i> , <i>Pseudomona Acidovorans sp.</i> para lo cual logró concluir tras realizar más de 30 ensayos que la cepa <i>P. fluorescens</i> es la más eficiente ya que es capaz de degradar cianuro en un 99%.
			(Carpio , 2014) (Roshan, Gaur, & Balomajumderb, 2009)

<i>Fusarium trincictum</i> <i>Trichoderma</i>	Autor no informa	No reporta eficiencia en la remoción de CN solo en la remoción de metales pesados 90%	Las cepas de hongos <i>Trichoderma</i> sp y <i>Fusarium trincictum</i> sp se han empleado para la degradar cianuro porque poseen las enzimas rodanasa y cianuro de hidrotasa, al igual que lo hace con metales pesados, por ejemplo, el uso de estas cepas de hongos podría ser útil para mitigar los procesos de metilación de mercurio producto del uso de cianuro y mercurio como amalgamadores para la minería aurífera. También podría ser usada como complemento de otra técnica de biorremediación.	(Argumedo, Alarcón, Ferrera, & Peña, 2009)
<i>Fusarium</i> sp., una <i>Paecilomyces</i> sp., dos <i>Cladosporium</i> sp. y <i>Bispora</i> sp.	Autor no reporta	50%	Los autores evaluaron la velocidad de degradación del tiocianato a través del uso de hongos, para ello, tras identificar las cepas más eficientes <i>Fusarium</i> sp., una <i>Paecilomyces</i> sp., dos <i>Cladosporium</i> sp. y <i>Bispora</i> sp. identificaron la velocidad de crecimiento de estas y midieron durante cada hora la degradación de tiocianato, así como la cantidad de biomasa producida, el resultado de la valoración arroja una eficiencia del 50% en procesos <i>in situ</i> .	(Medita, et al. 2012)
<i>Nannochloropsis</i> sp., <i>Neochloris</i> sp. y <i>Schizochytrium</i> sp. <i>Spirulina máxima</i> sp., <i>Spirulina platensis</i> sp. y <i>Chlorella vulgaris</i> sp	El autor no informa	El rendimiento varía de acuerdo con cada microalga	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 y <i>Spirulina máxima</i> sp., <i>Spirulina platensis</i> sp. contribuye con la remoción de NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ⁻³ y metales pesados de la laguna de Ubaque disminuyendo eutrofización del cuerpo de	(Meza, Ortíz, & Romero, 2018)

		entre 51 % – 87%	agua. La investigación se desarrolló ex - situ.	
<i>Scenedesmus sp.</i>	1 – 30 días	El rendimiento el 1er día 99.4%	La microalga tiene un mayor crecimiento, así como mayor tasa de remoción en el día cero de adición de Hg. Variables a tener en cuenta para favorecer el crecimiento de la microalga: pH 7.5 y fuentes de carbono, bicarbonato de sodio y dióxido de carbono.	(Guaque, 2018)
<i>Acinetobacter sp.</i> <i>Bacillus sp.</i> <i>Pseudomonas sp.</i>	N/A	69% Gram negativas presentes del género <i>Pseudomonas sp.</i>	Valora comunidades bacterianas presentes en pozos de lixiviación de CN identificando que la comunidad cultivable está representada en mayor medida por los géneros <i>Bacillus sp.</i> , <i>Acinetobacter sp.</i> y <i>Pseudomonas sp.</i> Esta última en mayor abundancia debido a su tolerancia y capacidad degradación CN.	(Sernaque, Cornejo, Pierre, & Mialhe, 2019)
<i>Pseudomonas sp.</i>	120 días	94%	Las autoras aislaron e identificaron cepas microbianas con capacidad degradadora de hidrocarburos totales de petróleo (TPH). El género <i>Pseudomonas sp.</i> fue predominante debido a su capacidad de degradación con un porcentaje de remoción hasta del 94% en 120 días. Las muestras fueron pre enriquecidas con – NaCl.	(Vásquez , Guerrero , & Quintero , 2010)

Autora Zapata, E. (2020). *Trabajos representativos de biorremediación de cianuro proveniente de distintas fuentes*

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión documental permitió identificar que diferentes poblaciones microbianas son capaces de degradar cianuro presente en aguas residuales industriales a través de tratamientos biológicos en medios controlados, y que éstos, pueden variar entre 5 y 9 días (Cardona, 2015). Son económicos, asequibles y eficientes pues requieren un capital de bajo costo. Sin embargo, sí requieren mano de obra capacitada para garantizar un medio controlado, sobre todo, debido al especial cuidado que precisan tener dada su facilidad de propagación. Entre otras cosas, requieren para mayor eficiencia, un medio que les propicie un pH entre 9 – 11, aun cuando su amplitud de tolerancia se encuentra entre 5 – 11. Otro factor que se debe contemplar es que las bacterias del género *Pseudomona* son gram negativas y aeróbicas, por supuesto, la disponibilidad de oxígeno garantiza su propagación y eficiencia (Ome , 2017)

De acuerdo con (Carmona , 2016), la bacteria del género *Pseudomona pseudoalcaligenes sp.* es capaz de sobrevivir en un medio alcalino y requiere de la presencia de cianuro para su crecimiento, por lo que es capaz de metabolizar las enzimas de nitrilasas y oxidasas del compuesto químico. Experimentalmente, de acuerdo con los autores, su rendimiento puede ser entre el 90% y 96%. Entre otros, (Tuya , 2014) comparó diferentes cepas de bacterias del género *Pseudomona sp.* donde se identificó que éstas tienen un mejor rendimiento, cercano al 93%, en concentraciones que varían entre los 100 – 400ml/L en medios que tengan un pH entre 5 – 11 en temperaturas de entre los 25 y 30°C. Por otro lado, de acuerdo con (Belykh, Petrov, Chikin, & Belkova , 2017), con relación al mismo grupo de bacterias del género *Pseudomona* de la cepa *alcaligenes sp.*, fue posible identificar que esta tiene tolerancia a altas concentraciones del contaminante y a las condiciones ambientales que desarrollan las comunidades microbianas.

Por otro lado, de acuerdo con (Cardona, 2015), en el mismo grupo de bacterias del género *Pseudomona* de las cepas *acinetobacter sp* y *fluorescens sp.*, los análisis arrojan como resultado que su rendimiento puede llegar al 96%. También tienen una amplia tolerancia al CN, aunque esta puede variar de acuerdo con la cepa. Incluso la tolerancia podría ser más alta. Sin embargo, resalta que son capaces de tolerar concentraciones de hasta 400 ppm.

Aun cuando se menciona que presentan una excelente tolerancia a concentraciones de CN que varían entre 100 – 400ml/L, algunas cepas de bacterias del género *Pseudomonas* son capaces de metabolizar con una eficiencia del 87% con concentraciones de 50mg/L. Así que la concentración es una variable por considerar siempre y cuando se prime la conservación del medio para propiciar y facilitar el crecimiento microbiano.

Asimismo, de acuerdo con (Cardona, 2015) las bacterias del género *Pseudomonas fluorescens* y *Pseudoalcaligenes sp.*, poseen una capacidad de degradación de CN que puede variar entre 90% y 96% en un término de 8 días. Se encontró alta viabilidad técnica en comparación con técnicas de tratamiento de aguas residuales convencionales, pero es imperativo controlar el medio en que se mantienen.

De acuerdo con (Roshan, Gaur, & Balomajumderb, 2009), las bacterias del género *Pseudomona fluorescens sp.* y *Pseudomona putida inmovilizada sp.* tienen mejor rendimiento en medios controlados. Toleran un amplio pH, entre 5 – 11 y tienen mayor probabilidad de propagarse en temperaturas que pueden variar entre los 25 y 30°C.

Según, (Rodallega , 2015) por el contrario, a lo que podría considerarse respecto de las bacterias gram negativas en términos generales, no todas resultaron ser tan eficientes en procesos de biorremediación, tal es el caso de las bacterias *Escherichia Coli* y *Streptococo sp.* los rendimientos, durante el mismo tiempo de evaluación que otras bacterias, fue distante ya que en el caso particular de estas el rendimiento no superó el 30%.

De acuerdo con (Guaque, 2018) respecto de otros microorganismos, tales como la microalga *Scenedesmus sp* esta tiene un mayor crecimiento y tasa de remoción de mercurio (Hg) en el día cero de adición. En un tiempo estimado de análisis de, entre 1 y 30 días, el primer día *Scenedesmus sp.* es capaz de remover el 99.4%. Hacia el día 15 el porcentaje de remoción es del 98.6%. En los dos casos, las variables a tener en cuenta para favorecer el crecimiento de la microalga: pH 7.5 y fuentes de carbono, bicarbonato de sodio y dióxido de carbono. El análisis de esta microalga, en biorremediación, toma relevancia debido a los procesos de bioacumulación y biomagnificación como resultado del subproducto metilación de mercurio (CH₃)₂ Hg.

En cuanto a los hongos de las cepas *Trichoderma sp* y *Fusarium trincictum*, de acuerdo con (Medina, Torres, Durán, Ramírez , & Herrera, 2012) son útiles para controlar y mitigar los impactos ambientales en cuerpos de agua generados por procesos de metilación de mercurio producto del uso de cianuro y mercurio como amalgamadores para minería aurífera.

Para finalizar, usualmente los tratamientos químicos suelen ser más eficientes en cuanto al tiempo de remoción del CN. Por ejemplo, en la oxidación electrolítica al cabo de 1 hora se obtiene el primer resultado de remoción mientras que, con tratamiento biológico a través de bacterias del género *Pseudomona*, la degradación de CN es evidente al cabo de 5 días. Sin embargo, en este último, las bacterias usan el CN como fuente de nitrógeno y carbono; metabolizándolo. Y el resultado, subproductos menos tóxicos como amoniaco y carbonato (Mekuto, Ntwampe, & Akcil, 2016).

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con el Informe sobre el Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente presentado por (Contraloría General de la República, 2018) asegura que, por lo menos, 17 de los 32 departamentos de Colombia, están bajo riesgo de contaminación por vertimientos con aguas residuales industriales producto de lixiviación de minería aurífera. Para el caso, solo por mencionar un ejemplo, la contaminación del río Atrato y su correspondiente sentencia T622/16, principio de precaución ambiental y aplicación para proteger el derecho a la salud de las personas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

Las aguas residuales industriales contaminadas con cianuro requieren tratamientos que optimicen los procesos desde la viabilidad técnica, económica y ambiental de manera

que cumplan con las políticas públicas de desarrollo sostenible pero además contribuyan con salvaguardar la salud de la población.

Si bien, las bacterias del género *Pseudomonas sp.* son una alternativa económica, sostenible y técnicamente viable para tratar aguas residuales industriales (ARI) es necesario tener en cuenta que precisa de medios controlados debido al crecimiento exponencial de las poblaciones microbianas ya que estas son capaces de metabolizar enzimas de nitrilasas y oxidasas. Además, es preciso tener en cuenta "parámetros fisicoquímicos tales como pH, temperatura y concentración de cianuro" (Cornejo, 2016). Estos parámetros inciden directamente en el rendimiento de bacterias del género *Pseudomonas sp.*

Finalmente, se resalta que, en todos los casos de valoración de microorganismos eficientes en la degradación de cianuro, estos fueron valorados en laboratorio y no en campo por lo que precisan ser evaluadas a gran escala y en plantas de tratamiento de aguas residuales contaminadas con cianuro. Por ejemplo, en planta de reactor compacto, reactor discontinuo, de lodos activados o tecnología SBR ya que la degradación microbiana depende directamente de las reacciones enzimáticas y condiciones físicoquímicas del efluente. Entre las variables están también: pH, OD y concentración de cianuro.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Primera autora: Metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, borrador original, escritura, revisión y edición

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, mi alma máter. Asimismo, al semillero de investigación ECOHIDROLOGÍA por proporcionarme las herramientas y competencias necesarias para escribir el presente artículo.

A Daniel Rodríguez Acero, mi ex profesor de pregrado. Un brillante ingeniero ambiental con una calidad humana inigualable. Que en paz descanse.

LITERATURA CITADA

Agudelo, R., Betancur, J., & Jaramillo, C. (2010). Biotratamiento de residuos cianurados y su relación con la salud pública. Revista Facultad Nacional de Salud Pública, vol.28, n.1, pp.7-20.

Argumedo, R., Alarcón, A., Ferrera, R., & Peña, J. J. (2009). El género fúngico *Trichoderma* y su relación con los contaminantes orgánicos e inorgánicos. Revista internacional de contaminación ambiental, 25, 257-269.

- Bell, L., DiGangi, J., & Weinberg, J. (2014). Introducción a la contaminación por mercurio y al convenio de Minamata sobre mercurio para las ONG. México: Red Internacional de Eliminación de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (IPEN).
- Belykh, M., Petrov, S., Chikin, A., & Belkova, N. (2017). Cyanide detoxification by microbial consortia of natural-industrial complexes of gold heap leaching. *Appl Biochem Microbiol*, 53, 331–337. <https://doi.org/10.1134/S0003683817030036>
- Cardona, E. (2015). Microorganismos potenciales degradadores de cianuro en residuos de minería de oro (tesis maestría). Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Carmona, M. (2016). Estudio del papel de los genes *cio* en la resistencia al cianuro de las *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344. España: Universidad de Extremadura.
- Carpio, M. (2014). Degradación de cianuro en efluentes líquidos cianurados por bacterias biorremediadoras en condiciones de laboratorio (tesis pregrado). Tacna, Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Contraloría General de la República. (2018). Informe sobre el estado de los recursos naturales y del ambiente. Obtenido de <https://www.contraloria.gov.co/documents/20181/1560084/Informe+sobre+el+Estado+de+los+Recursos+Naturales+y+del+Ambiente+2018.pdf/0feabaa0-2b23-4309-bc91-c6906c71a62e>
- CORANTIOQUIA. (2016). Manual de producción y consumo sostenible. Gestión del recurso hídrico minería de oro. Obtenido de https://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gesti%C3%B3n%20ambiental/Producci%C3%B3n%20y%20Consumo%20Sostenible/Manuales_GIRH/Mineria_Oro.pdf
- Cornejo, M. (2016). Biorremediación de relaves mineros con un consorcio microbiano nativo caracterizado molecularmente y productor de enzimas degradadoras de cianuro y derivados (tesis de maestría). Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes, Perú: http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/153/3/2016_Cornejo_Biorremediacion-relaves-mineros.pdf
- Garzón-Gutiérrez, J., & Rodríguez-Miranda, J. (2015). Gestión ambiental de las aguas residuales industriales con mercurio proveniente de la minería aurífera a nivel mundial: Estado del arte. Bogotá: Universidad y salud.
- Goñi, E., Sabogal, A., & Asmat, R. (2014). Minería informal aurífera en Colombia. Obtenido de Fedesarrollo; Banco Interamericano de Desarrollo : https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/368/Mineria%20informal%20aurifera%20en%20Colombia%20-%20Informe_linea_base_mineria_informal%20-%20pagina%20Fedesarrollo.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Guaque, I. (2018). Evaluación remoción mercurio en aguas contaminadas con el metal empleando la microalga *Scenedesmus* sp (tesis de maestría). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia :

<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/747/1/177811.pdf>

Hosseini, M., Bagher Nabavi, S., & Parsa, Y. (2013). Bioaccumulation of Trace Mercury in Trophic Levels of Benthic, Benthopelagic, Pelagic Fish Species, and Sea Birds from Arvand River, Iran. *Biological Trace Element Research*, N.1-3, Vol.156, pp 175–180. doi: 10.1007/s12011-013-9841-2

Hurtado, J., & Berastain, A. (2012). Optimización de la biorremediación en relaves de cianuración adicionando nutrientes y microorganismos. *Revista Peruana de Biología*, N.19, Vol.2, pp.187 - 192.

Kehrig, H., Baptista, G., Di Benedetto, A., Almeida, M., Rezende, C., Siciliano, S., . . . Moreira, I. (2017). Biomagnificación de mercurio en la cadena trófica del Delfín Moteado del Atlántico (*Stenella frontalis*), usando el isótopo estable de nitrógeno como marcador ecológico. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, N.2, Vol. 52, pp. 233-244. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572017000200004>

Medina, Torres, Durán, Ramírez, & Herrera. (2012). Degradación de tiocianato por hongos aislados de ambientes mineros y evaluación de capacidad degradativa. *Revista Peruana de Biología*, 19(1): 081 - 088.

Mekuto, L., Ntwampe, S., & Akcil, A. (2016). An integrated biological approach for treatment of cyanide wastewater. *Science of the Total Environment*, 711-720.

Meza, L., Ortíz, M. T., & Romero, M. A. (2018). La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, N.1, Vol.9, p.p 163 - 176.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Sentencia T622/16 Río Atrato. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_participacion_al_ciudadano/sentencia_rio_atrato/Sentencia_T-622-16_Rio_Atrato.pdf

Ministerio Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

Montealegre, F. (23 de octubre de 2013). Cuencas de Cali requieren urgente atención ambiental y política. *Agencia de Noticias UN*, pág. 423. Obtenido de http://m.agenciadenoticias.unal.edu.co/uploads/tx_flistaticfilecache/www.agenciadenoticias.unal.edu.co/var/www/web/agencia/nc/ndetalle/pag/1/article/cuencas-de-cali-requieren-urgente-atencion-ambiental-y-politica.htmlcache.html

Oliveira, H., França, S., & Rocha, E. (2015). Atividades de mineração e avaliação de metais em água superficial, sedimento de fundo e peixes no rio tapajós. Rio de Janeiro, Brasil: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Obtenido de Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1830/2/CCL0001-00-15%20Oliveira%20et%20al%20Capitulo.pdf>

- Ome, O. (2017). Bioestimulación de microorganismos como estrategia sustentable de pretratamiento para aguas residuales industriales del procesamiento de aceite de palma: un estudio de caso en Bogotá (tesis maestría). Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- PAUMGARTTEN, F., OLIVEIRA, A., & GOMES-CARNEIRO, M. (2017). O impacto dos aditivos do tabaco na toxicidade da fumaça do cigarro: uma avaliação crítica dos estudos patrocinados pela indústria do fumo. Rio de Janeiro, Brazil: <https://www.scielo.br/pdf/csp/v33s3/1678-4464-csp-33-s3-e00132415.pdf>
- Pontificia Universidad Javeriana. (2012). Ficha técnica Mercurio Merck S.A. Obtenido de https://www.javeriana.edu.co/documents/4486808/5015300/MERCURIO+OXIDO+ROJO_MERCK.pdf/33f3301b-152c-4b9b-9f26-7e42942e4eb5?version=1.0
- Pontificia Universidad Javeriana. (2014). Merck-Chemicals. Obtenido de Ficha técnica cianuro de potasio: https://www.javeriana.edu.co/documents/4486808/5015300/CIANURO+DE+POTASIO_MERCK.pdf/aac35440-1b82-4ba8-a316-1ce6d9f63a29?version=1.0
- Pontificia Universidad Javeriana. (2014). Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de Ficha técnica cianuro de sodio (SIGMA-ALDRICH): https://www.javeriana.edu.co/documents/4486808/5015300/CIANURO+DE+SODIO_SIGMA.pdf/c3f8ded8-24c6-4848-be28-95ef34fa47f8?version=1.0
- Posada, L., & Mosquera, S. (2017). Biodegradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales de una empresa de pinturas. Medellín, Antioquia: Universidad EAFIT .
- Rizzotto, M. (2009). Diccionario de química general e inorgánica. Rosario, Argentina : 2a ed. CORPUS, pp. 62 - 64 .
- Rodallega, S. (2015). Aislamiento y caracterización de bacterias capaces de degradar cianuro presente en tanques de almacenamiento de cianuro en una mina de oro del municipio de Buenos Aires, Cauca. Santiago de Cali, Colombia: Universidad ICESI.
- Roma, F., Gomes, M., & Amado, A. (2017). O impacto dos aditivos do tabaco na toxicidade da fumaça do cigarro: uma avaliação crítica dos estudos patrocinados pela indústria do fumo. Cadernos de saúde pública, pp. 33.
- Roshan, R., Gaur, A., & Balomajumderb, C. (2009). Cyanide in industrial wastewaters and its removal: A review on biotreatment. Journal of Hazardous Materials, pp.1-11.
- Sánchez, L., & Andrade , A. (2009). Determinación de la concentración letal media (CL50-96) del cianuro por medio de bioensayos sobre alevinos de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) (tesis pregrado). Bogotá, Colombia: Universidad de La Salle.
- Sernaque, Y., Cornejo, M., Pierre, J., & Mialhe, E. (2019). Caracterización molecular de las bacterias cultivables y no cultivables procedentes de pozas de lixiviación de oro. Revista Peruana de Biología, 26(2), 26(2), 275-282. doi: 10.15381/rpb.v26i2.16383 .

Sistema de Información Minero Colombiano . (2020). Unidad de Planeación Minero Energética UPME. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/IndicadoresEconomicos.aspx>

Tuya, D. (2014). Evaluación de la capacidad degradativa de cianuro por bacterias alcalófilas aisladas de los relaves de la planta concentradora de metales Mesapata Cátac-Ancash (tesis pregrado). Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Vargas , S., & Marrugo, J. (2019). Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta. *Acta Biológica Colombiana*, 24(2), 232- 242.

Vásquez, M., Guerrero , J., & Quintero , A. (2010). Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XII(1), 141 - 157.