



Microorganismos empleados para la biorremediación de efluentes mineros con cianuro

Microorganisms used for the bioremediation of mining effluents with cyanide

HUGO APAZA-AQUINO^{1,2}, YOSSELIN P. ROJAS-MACHACA^{1,2}, ENEIDA MAMANI-MAMANI^{1,2} y VIANEY D. CHURA-PALLI^{1,2}

RESUMEN

Uno de los mayores problemas ambientales que se tiene es referente a los efluentes mineros con cianuro. Por su alto grado de toxicidad, ocasiona impactos altamente significativos en el ecosistema en general. A pesar de que existen diversas tecnologías para su tratamiento, la biorremediación es una alternativa potencial por ser amigable con el medio ambiente. En este trabajo se tiene como objetivo principal analizar los principales microorganismos empleados para llevar a cabo procesos de biorremediación de efluentes mineros con cianuro. Para esto se realizó una revisión de las distintas fuentes de información de microorganismos biorremediadores de cianuro. Hallándose que se reportan una amplia diversidad de microorganismos que se pueden emplear como agentes biológicos potenciales para biorremediar el cianuro, entre las que sobresalen las del género de *Pseudomonas* y *Bacillus*; los principales factores que se debe tener en cuenta para lograr altas eficiencias son el pH, temperatura, nutrientes, concentración de la biomasa y concentración de cianuro. La biorremediación empleando microorganismos cada vez va tomando mayor posición para remediar contaminantes como el cianuro, pero aun así en el Perú faltan mayores estudios a nivel piloto y planta para demostrar su eficiencia que se logra a nivel laboratorio.

¹Universidad Nacional de Juliaca. Juliaca, Perú

²Asociación de Investigación Científica BIOSS. Juliaca- Perú

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite: **Compartir**-copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, **Adaptar**-remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

Hugo Apaza-Aquino, Yoselin P. Rojas-Machaca, Encida Mamani-Mamani y Vianey D. Chura-Palli

Palabras clave: *Bacillus*; biorremediación; cianuro; minería de oro; *Pseudomonas*.

ABSTRACT

One of the biggest environmental problems is related to mining effluents with cyanide, due to its high degree of toxicity, it causes highly significant impacts on the ecosystem in general. Although there are various technologies for its treatment, bioremediation is a potential alternative because it is friendly to the environment. The main objective is to analyze the main microorganisms used to carry out bioremediation processes of mining effluents with cyanide. A review of the different sources of information on cyanide bioremediation microorganisms was carried out. Finding that a wide diversity of microorganisms that can be used as potential biological agents to bioremedy cyanide are reported, among which those of the genus of *Pseudomonas* and *Bacillus* stand out; the main factors that must be taken into account to achieve high efficiencies are pH, temperature, nutrients, biomass concentration and cyanide concentration. Bioremediation using microorganisms is increasingly taking a position to remedy contaminants such as cyanide, but even so in Peru there is a lack of further studies at the pilot and plant level to demonstrate its efficiency, which is achieved at the laboratory level.

Keywords: *Bacillus*; bioremediation; cyanide; gold mining; *Pseudomonas*.

INTRODUCCIÓN

La actividad minera es de gran importancia en el desarrollo económico de muchos países en todo el mundo (Sosa y Argota, 2017), principalmente la extracción de minerales auríferos; debido a su alto valor comercial. Para la obtención de este metal precioso se realizan actividades que involucran técnicas de procesamiento (Gordillo, 2018), entre las principales técnicas se encuentra la lixiviación con cianuro, la cual se caracteriza por ser económica y de fácil manejo (Valenzuela, 2017); sin embargo, el cianuro es considerado como un elemento tóxico de acción rápida que provoca efectos irreversibles (Boadi et al., 2009) cuando se tiene un manejo inadecuado y falta de conocimiento sobre el peligro potencial que tiene sobre la salud de los seres vivos. Existen diversas tecnologías que se emplean para tratar el cianuro. Tecnologías que comprenden métodos químicos, electroquímicos, fotoquímicos y biológicos para eliminar el cianuro (Kuyucak y Akcil, 2013). En los últimos años cada vez más se está dando importancia a sistemas de trata-

mientos biológicos; entre estos, sobresale la biorremediación.

La biorremediación en los últimos años ha cobrado mayor interés; la biorremediación es el uso del metabolismo de microorganismos para eliminar contaminantes (Sharma, 2012), es un proceso natural (Lovasoa et al., 2017), una técnica eficiente y económica en la desintoxicación de los residuos de lixiviación de cianuro (Díaz y Caizaguano, 1999), además causa un impacto menos negativo al medio ambiente (Deloya, 2012). Los métodos aplicados en la biorremediación puede utilizarse en el lugar de la contaminación o en la contaminación retirada del lugar original (Sharma, 2012). El potencial de la tecnología de la biorremediación depende de la existencia de una población de bacterias que degradan el cianuro, la disponibilidad de cianuro como contaminante y factores ambientales (Lovasoa et al., 2017). Entre los principales factores a tener en cuenta son: pH, temperatura y la toxicidad de los contaminantes, a fin de garantizar una tecnología competitiva con las actuales estrategias de remediación química y física que se emplean para combatir la contaminación por cianuro (Baxter y Cummings, 2006).

La degradación de cianuro por microorganismos puede ocurrir tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas (Natarajan, 2018). Se ha demostrado que los microorganismos poseen una variedad de actividades catabólicas que pueden aprovecharse para remediar el cianuro y los nitrilos inorgánicos (Baxter y Cummings, 2006), debido a que estas utilizan el cianuro como fuente de carbono o nitrógeno, en la que lo asimilan, lo metabolizan y posteriormente lo degradan en porcentajes de hasta del 97 %; lo que podría indicar su efectividad y beneficio ambiental para este tipo de tratamientos (Cartagena, 2019). Para el tratamiento con microorganismos se aíslan generalmente a partir de residuos de cianuración industrial (Díaz y Caizaguano, 1999) o aislados de casi cualquier condición ambiental (Sharma, 2012). Entre los microorganismos que degradan el cianuro están: Streptococcus sp. (Cartagena, 2019), Pseudomonas fluorescens (Gordillo, 2018), Pseudomonas alcalófilas (Castillo y Vega, 2018), Pseudomonas pseudoalcaligenes (Zapata y Bermúdez, 2015), Klebsiella sp., (Copari et al., 2020).

Esta revisión tiene como objetivo principal analizar los principales microorganismos empleados para llevar a cabo procesos de biorremediación de efluentes mineros con cianuro, mediante la revisión de las distintas fuentes de información.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión exhaustiva de fuentes primarias de información, consultando bases de datos especializados en el área ambiental y de biotecnología. El criterio de selección para la búsqueda de información, en principio se realizó de acuerdo a las palabras clave asociadas al estudio. La calidad de los artículos seleccionados fue procesada mediante indicadores como el factor de impacto; así como la variabilidad, fiabilidad y validez de los artículos; considerándose la relevancia del tema en materia de biorremediación empleando microorganismos. En base a la revisión de la literatura científica existente se generaron tablas y gráficos a partir de fuentes de información primaria, realizando un contraste con los estudios preexistentes, para lo cual se empleó el paquete de Microsoft Office Word y Excel 2013.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Empleo del cianuro para extraer el oro

Existen diversas tecnologías para extraer el oro, pero dentro de estas resalta la extracción con el cianuro. El cianuro ha sido utilizado en la extracción de metales desde el siglo XVII y actualmente se utiliza en la recuperación de oro en todo el mundo (Gutierrez, 2018). Esta sustancia química se emplea para extraer minerales de baja ley y mineral que no es de fácil tratamiento mediante procesos físicos convencionales como la trituración y la separación por gravedad (Saa-vedra, 2018).

La extracción de oro en el Perú principalmente es por la técnica de lixiviación, tal como se aprecia en la Figura 1. La lixiviación consiste en la disolución de oro del mineral molido en una solución diluida de cianuro que por lo general es NaCN o KCN en presencia de cal y oxígeno (Corilloca y Vargas, 2020); existen dos formas de procesamiento: la lixiviación en tanque y la lixiviación en pila Logsdon et al. (2001).

Efectos en la salud por exposición al cianuro

El cianuro de hidrógeno y las sales alcalinas de cianuro pueden entrar al cuerpo por inhalación, ingestión y absorción a través de la piel (Egekeze y Oehme, 1980; Estrada et al., 2019; Kuyucak y Akcil, 2013). Estos compuestos cianurados son venenos muy activos y de acción rápida,

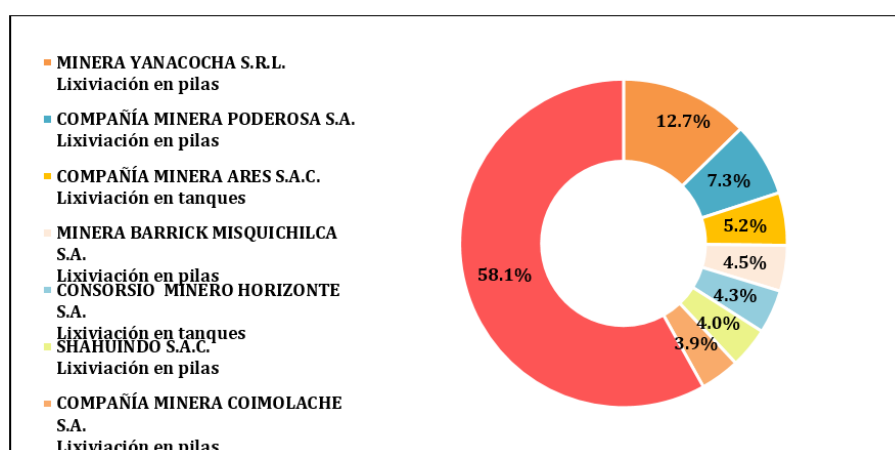


Figura 1. Tecnologías empleadas y producción de oro por las diversas minerías de oro en Perú. Elaborado en base a los datos de MINEM (2020).

la gravedad de los efectos sobre la salud depende del tiempo de exposición y la dosis principalmente (Candeias et al., 2019; Kuyucak y Akcil, 2013). De acuerdo a ATSDR (2006) "el cianuro produce efectos tóxicos a niveles iguales o mayores de 0, 05 miligramos de cianuro por decilitro de sangre (mg/dL), y casos fatales a niveles de 0, 3 mg/dL". Si la exposición es breve, pero en concentraciones altas, se genera daños cerebrales y cardíacos; si la exposición se da por un largo tiempo, a concentraciones bajas, se pueden presentar: dificultad para respirar, vómito, dolor de cabeza, alteraciones en la sangre seguido de convulsiones y pérdida de conocimiento, el ingreso del cianuro a la piel es más lento y al estar en contacto directo produce irritación, llagas y úlceras, siendo un riesgo potencial para las personas que lo manipulan constantemente (Agudelo et al., 2010; ATSDR, 2006; Candeias et al., 2019).

Tratamientos para tratar cianuro

Con el transcurrir del tiempo se han desarrollado diversas tecnologías para eliminar el cianuro que incluyen métodos químicos, biológicos, electroquímicos y fotoquímicos (Kuyucak y Akcil, 2013). Entre los tratamientos químicos se tienen: Cloración alcalina, proceso de oxidación del peróxido de hidrógeno (Gaviria y Meza, 2006; Kuyucak y Akcil, 2013), proceso SO₂/Aire (INCO), procesos de precipitación de hierro/cobre, procesos de precipitación de sulfuro de hierro (FeS), Sulfidización-Acidificación-Reciclaje-Espesamiento (SART), proceso de acidificación y recuperación de cianuro, acidificación-volatilización-regeneración (AVR) o proceso Mills-Crowe para la recuperación de cianuro Kuyucak y Akcil (2013). Por su parte, el trata-

miento de oxidación fotocatalítico es una tecnología que asegura la destrucción de cianuro sin generarse compuestos intermedios extremadamente tóxicos, como es el caso del cloruro de cianógeno en la cloración (Blanco et al., 2001). A pesar de existir diversas tecnologías, cada una tiene sus ventajas y desventajas; por ejemplo, el compuesto oxidante peróxido de hidrógeno tiene un 92,7 % remoción de cianuro libre en 45 minutos y la remoción de cianuro por el método biológico alcanza el 73,7 % (Jumbo y Nieto, 2014). En los últimos años se ha dado mayor énfasis en encontrar soluciones más ecoamigables. Una de estas tecnologías es el mecanismo enzimático y bioquímico que tiene por objetivo generar una reacción química para transformar el cianuro a cianato no tóxico (Gupta et al., 2010).

Biorremediación del cianuro

La biorremediación del cianuro es un método de tratamiento ampliamente estudiado debido a que las especies vegetales y microorganismos tienen la capacidad para degradar los compuestos simples y complejos del cianuro, tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas (Akcil y Mudder, 2003; Boucabeille et al., 1994), convirtiéndolos en otros compuestos menos tóxicos y más estables que tengan niveles ambientalmente aceptables (Akcil y Mudder, 2003; Deloya, 2012; Lovasoa et al., 2017). Es por ello que este método es considerado respetuoso con el ambiente y rentable desde el punto de vista económico (Botz et al., 2016).

Los microorganismos que llegan adaptarse a condiciones en las que está presente el cianuro, logran degradarlo. Razanamahandry et al. (2016) mencionan que los microorganismos que biodegradan el cianuro tienen sistemas enzimáticos específicos que les permiten desarrollarse en ambientes con alta concentración de cianuro, las bacterias utilizan este compuesto como nutriente para su crecimiento, ya sea como fuente únicamente de nitrógeno o también de carbono (Bouari, 2012). Existen bastantes microorganismos con esta capacidad de biodegradar, pero entre las que más destacan, son las especies y géneros que se muestra en la tablas 1 y 2.

Pero cuando se realiza procesos de biorremediación se debe tener en cuenta algunos factores; la temperatura, el pH, el oxígeno, la disponibilidad de nutrientes y la concentración del cianuro son los principales factores que se deben tener en consideración en el proceso de biorremediación para garantizar una correcta eficiencia (Deloya, 2012; Singh et al., 2018). La biorremediación puede aplicarse a gran escala y en presencia de diferentes contaminantes cianurados, ya sean líquidos y/o gaseosos (Lovasoa et al., 2017); sin embargo, la elección de un solo género de mi-

croorganismo o mixto es importante, por las ventajas que tiene utilizar un consorcio de especies bacterianas (Jandhyala et al., 2005).

Bacterias biorremediadoras de cianuro

La biorremediación por bacterias se da en la conversión de los contaminantes orgánicos solubles en energía, masa celular y otros subproductos menos tóxicos (Akcil y Mudder, 2003). La biodegradación del cianuro por las bacterias degradadoras de cianuro, se aíslan de las aguas residuales de la minería y de las aguas residuales que contienen tiocianato (Razanamahandry et al., 2019); también pueden ser aislados de casi de cualquier condición ambiental Sharma (2012). El potencial de la biorremediación depende de la existencia de una población de bacterias que degradan el cianuro, la disponibilidad del cianuro como contaminante y factores ambientales (Lovaso et al., 2017): como el pH, temperatura, la toxicidad de los contaminantes (Baxter y Cummings, 2006) y oxígeno (Deloya, 2012). A partir de ello se puede desintoxicar el cianuro a niveles ambientalmente aceptables y en subproductos menos dañinos (Akcil y Mudder, 2003).

Tabla 1. Degradación de cianuro por bacterias según género

Nº	Géneros de bacterias	Formas de cianuro	Remoción de cianuro	Tiempo	Referencia
1	<i>Halomonas</i>	Cianuro	75 %	96 h	(Khamar et al., 2015)
2	<i>Pseudomonas</i>	Cianuro	-	-	(Akcil y Mudder, 2003)
3	<i>Bacillus</i>	Cianuro	97 %	15 días	(Cornejo, 2016)
4	<i>Alcaligenes</i>	Cianuro	97 %	15 días	(Cornejo, 2016)
5	<i>Rhodococcus</i>	Cianuro	97 %	15 días	(Maniyam et al., 2019)
6	<i>Lactobacillus</i>	Cianuro	-	-	(Gupta et al., 2018)
8	<i>Clostridium</i>	Cianuro	-	-	(Gupta et al., 2018)
9	<i>Cellulomonas</i>	Cianuro	-	-	(Gupta et al., 2018)

Tabla 2. Degradación de cianuro por bacterias según especies

Nº	Especies de bacterias	Formas de cianuro	Remoción de cianuro	Tiempo	Referencia
1	<i>Pseudomonas</i> sp.	Cianuro	>1 ppm	70 h	(Akcil y Mudder, 2003)
2	<i>Pseudomonas putida</i>	Cianuro	80, 60 %	48 h	(Singh et al., 2018)

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 2. Degradación de cianuro por bacterias según especies

Nº	Especies de bacterias	Formas de cianuro	Remoción de cianuro	Tiempo	Referencia
3	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	Cianuro	80, 60 %	48 h	(Singh et al., 2018)
4	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Cianuro	87 %	15 días	(Agudelo et al., 2010)
5	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Tiocianato libre	78 %	200 h	(Mekuto et al., 2016)
6	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Cianuro	98 %	236 h	(Restrepo et al., 2006)
7	<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i>	Cianuro	78, 60 %	240 h	(Jumbo y Nieto, 2014)
8	<i>Pseudomonas alcalófilas</i>	Cianuro	34 %	54 h	(Castillo y Vega, 2018)
9	<i>Thiobacillus</i> sp.	Tiocianato y cianuro libre	79 – 98 %	150 h	(Mekuto et al., 2017)
10	<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Cianuro	79 %	15 días	(Agudelo et al., 2010)
11	<i>Serratia</i> sp.	Tiocianato y cianuro libre	>99, 9 %	7 días	(Mekuto et al., 2017)
12	<i>Bacillus</i> sp.	Cianuro libre	89, 50 %	8 días	(Mekuto et al., 2013)
13	<i>Bacillus safensis</i>	Cianuro libre	44, 30 %	48 h	(Mekuto et al., 2013)
14	<i>Bacillus pumilus</i>	Cianuro	70 %	3 días	(Vargas-Serna, 2020)
15	<i>Bacillus lichenformis</i>	Cianuro libre	44, 30 %	48 h	(Mekuto et al., 2013)
16	<i>Bacillus tequilensis</i>	Cianuro libre	44, 30 %	48 h	(Mekuto et al., 2013)
17	<i>Rhizobium</i> sp.	Cianuro	85, 37 %	72 h	(Calle Del Aguila, 2017)
18	<i>Trichoderma</i> spp	Cianuro	95, 50 %	15 días	(Arévalo, 2018)
19	<i>Halomonas</i> sp.	Cianuro de sodio	33, 97 %	7 días	(Calixto, 2018)
20	<i>Streptococcus</i> sp.	Cianuro	91 %	-	(Cartagena, 2019)

Proceso de biodegradación del cianuro

Para la degradación del cianuro, los microorganismos producen los cofactores necesarios que catalizan las vías de degradación; la perinat es uno de los cofactores para la degradación del cianuro (Mahendran et al., 2020). Existen cinco vías diferentes en la biodegradación del cianuro; como la vía hidrolítica, la vía oxidativa, la vía reductora, la vía de sustitución y la vía de síntesis (Khamar et al., 2015). Las primeras tres vías siguen la conversión de cianuros en moléculas simples (orgánicas o inorgánicas) y otras dos vías se ocupan de la utilización de cianuro como fuente

de carbono y nitrógeno (Mahendran et al., 2018). En la figura 2 se aprecia una representación básica sobre el mecanismo de asimilación del cianuro en el microorganismo. De acuerdo a Botz et al. (2016), mencionan que mediante el proceso aeróbico, el cianuro, el tiocianato, el nitrito y el amoníaco se oxida a nitrato; mientras que en el proceso anaeróbico, el nitrato y el nitrito se eliminan como gas nitrógeno.

Tabla 3. Eliminación de constituyentes en procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos

Tratamiento biológico aeróbico	Tratamiento biológico anaeróbico
Cianuro	Nitrato
Amonio	Nitrito
Tiocianato	Metales
Nitrito	
Metales	

Fuente: Botz et al. (2016)

Biorreactores

Uno de los principales aspectos a tener en cuenta en los procesos de biorremediación es la configuración del biorreactor. Los biorreactores consisten en una gran cámara donde ocurren reacciones bioquímicas en condiciones ambientales controladas para obtener importantes compuestos biológicos (Jaibiba et al., 2020), a través de las cuales se da la conversión de los compuestos de alimentación en productos de biotransformación deseados o en compuestos menos dañinos para el ambiente (Kumar et al., 2020). Los biorreactores que son utilizados para el proceso de degradación del cianuro y sus compuestos están diseñados para proporcionar un ambiente adecuado que garantice las condiciones óptimas para el desarrollo de los microorganismos Copari et al. (2020); Jaibiba et al. (2020).

Los tipos de biorreactores que se emplean según Jaibiba et al. (2020) incluyen: biorreactores aeróbicos, biorreactores anaeróbicos, biorreactores de flujo pistón, biorreactores de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente, fotobiorreactores, biorreactores de membrana inversa, biorreactores de membrana sumergida, biorreactores de lecho fluidizado, biorreactores de lecho empacado, biorreactores de lodo activado, biorreactores de membrana y biorreactores de células inmovilizadas.

Los biorreactores batch o discontinuos se utilizan para las reacciones llevadas en el laboratorio (Gómez, 2010). En su funcionamiento no existe flujo de entrada ni de salida, simplemente es un biorreactor con un agitador que homogeniza la mezcla (Muñoz, 2009) tal como se aprecia en la figura 2. En cambio, los biorreactores continuos rara vez se utilizan en laboratorios Gómez (2010); el funcionamiento se basa en una entrada y salida de un flujo de materia de forma continua durante todo el período de operación Grau (1999).

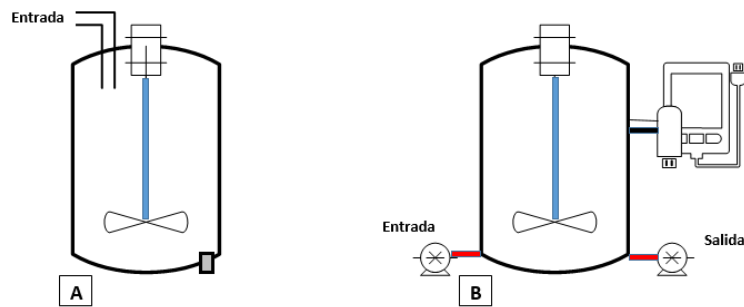


Figura 2. Configuración básica de reactores. (A) Reactor régimen batch y (B) reactor de régimen continuo.

Factores a controlar en el proceso de biorremediación

En los procesos de biorremediación es determinante controlar los factores como la composición del medio, concentración inicial de cianuro, adición de sustratos, pH, temperatura, oxígeno y tiempo; de estos dependerá la eficiencia del proceso de biorremediación del cianuro. Los biorreactores se caracterizan por una alta eficiencia de degradación porque realizan el monitoreo y el control de estos parámetros que son muy importantes; para ello se utilizan sensores y elementos de control incorporado (Abraham et al., 2017; Mekuto et al., 2017), ya que de estos depende el rendimiento óptimo del proceso. De acuerdo a Lovasoa et al. (2017) las condiciones óptimas de temperatura oscilan entre 25 a 50 °C; pero la mayoría está alrededor de 30 °C para bacterias y 43 °C para hongos. En cuanto al valor de pH oscila entre 5, 2 a 10, 5 para bacterias y 6 a 8, 5 para hongos. Por otra parte, para la especie de *Klebsiella* sp. se comprobó que presenta una excelente biodegradación de cianuro entre 25 a 35 °C, en concentraciones iniciales de cianuro de 100 a 500 ppm y que crece a un pH neutro y alcalino (Khamar et al., 2015; Razanamahandry

et al., 2016). No todas las condiciones de trabajo son iguales, por eso es importante optimizar los factores mencionados en base a modelos y experimentos in vitro e in situ.

Ventajas y desventajas de la biorremediación con microorganismos

Las ventajas que presentan la biodegradación del cianuro son más económicas por cuanto no se requiere de reactivos químicos. Es un método sencillo, causa un impacto menos negativo al medio ambiente, ya que se basa en la acción de microorganismos autóctonos. Siendo un proceso natural de gran sencillez con modificaciones ambientales (Deloya, 2012) y es una técnica eficiente en la desintoxicación de los residuos de lixiviación de cianuro (Díaz y Caizaguano, 1999). Por otro lado, las desventajas de este tipo de tratamiento es que presenta un proceso lento que es difícil de optimizar y controlar en tratamientos in situ a gran escala (Srivastava, 2021).

CONCLUSIONES

Existen diversas tecnologías para tratar los efluentes mineros con cianuro, pero la biorremediación va tomando mayor importancia por los resultados que se obtienen y porque es una tecnología amigable con el medio ambiente. Hay una amplia diversidad de microorganismos que se pueden emplear como agentes biológicos potenciales para biorremediar el cianuro, entre las que sobresalen las del género de *Pseudomonas* y *Bacillus*. Trabajar con microorganismos resulta complicado si no se tiene experiencias preliminares principalmente por los factores que se debe tener en cuenta para lograr altas eficiencias como pH, temperatura, nutrientes, concentración de la biomasa y concentración de cianuro; por eso son importantes los procesos de acondicionamiento y adaptación de los microorganismos que se vayan a emplear con la finalidad de optimizar el proceso acorde a las condiciones propias del lugar de estudio; razón por la que se opta por trabajar con microorganismos nativos, aminorando de esta manera el tiempo requerido para establecer las condiciones óptimas de los factores a operar. Los microorganismos tienen gran capacidad para remediar este tipo de efluentes, pero aún así, es una tecnología limitada, debido al tiempo que tarda y por el volumen de efluente que se trata.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abraham, E.; Gupta, S.; Jung, S. y McAfee, E. 2017. Bioreactor for Scale-Up: Process Control. In Mesenchymal Stromal Cells, 139 – 178. Elsevier. <<https://doi.org/10.1016/>

[B978-0-12-802826-1.00006-4](#)>

Agudelo, R.; Betancur, J. y Jaramillo, C. 2010. «Biotratamiento de residuos cianurados y su relación con la salud pública». *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 281: 7 – 20. <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12016345001>>

Akcil, A.; Karahan, A. G.; Ciftci, H.; y Sagdic, O. 2003. «Biological treatment of cyanide by natural isolated bacteria *Pseudomonas* sp.». *Minerals Engineering*, 167: 643–649. <<https://doi.org/10.1016/S0892-68750300101-8>>

Akcil, A. y Mudder, T. 2003. «Microbial destruction of cyanide wastes in gold mining: Process review». *Biotechnology Letters*, 256: 445 – 450. <<https://doi.org/10.1023/A:1022608213814>>

Arévalo, P. A. 2018. Determinación de la capacidad de degradación de cianuro proveniente de la industria minera del cantón cuenca con *Trichoderma* spp. Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador.

ATSDR. 2006. Resumen de salud pública Cianuro. División de Toxicología y Medicina Ambiental Natural. <https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs8.pdf>

Baxter, J. y Cummings, S. P. 2006. «The current and future applications of microorganism in the bioremediation of cyanide contamination». *Antonie van Leeuwenhoek, International Journal of General and Molecular Microbiology*, 901: 1 – 17. <<https://doi.org/10.1007/s10482-006-9057-y>>

Blanco, J.; Malato, S.; Estrada, C. A.; Bandala, E. R.; Gelover, S. and Leal, T. 2001. «Purificación de aguas por fotocatalisis heterogénea: Estado del arte». In *Eliminacion de Contaminantes por Fotocatalisis Heterogénea*, 39.

Boadi, N. O.; Twumasi, S. K. y Ephraim, J. H. 2009. «Impact of cyanide utilization in mining on the environment». *International Journal of Environmental Research*, 31: 101 – 108. <<https://doi.org/10.22059/ijer.2009.37>>

Botz, M. M.; Mudder, T. I. y Akcil, A. U. 2016. «Cyanide Treatment?: Physical , Chemical , and Biological Processes». In *Gold Ore Processing*, 619 – 645. Elsevier B.V. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00035-9>>

- Bouari, A.R. 2012. Bioremediation of cyanide contaminated water [Tuskegee university].<http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=242>Consulta:[23 – 10 – 2020]
- Boucabeille, C.; Bories, A.; Ollivier, P. y Michel, G. 1994. «Microbial degradation of metal complexed cyanides and thiocyanate from mining wastewaters». Environmental Pollution, 84(1): 59 – 67.<[https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)90071-X](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90071-X)>
- Calixto, F. A. 2018. Tratamiento de efluentes cianurados por Halomonas spp provenientes de la minera artesanal de Huamachuco - La Libertad . Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Peru.
- Calle Del Aguila, M. 2017. «Efecto de concentración y tiempo de residencia de Rhizobium sp en biodegradar cianuro del efluente minero El Toro, Huamachuco». Universidad César Vallejo, 31: 1 – 9. <<http://revistas.ucv.edu.pe/index.php/INNOVACION/article/view/1704/1382>>
- Candeias, C.; Ávila, P.; Coelho, P. y Teixeira, J. P. 2019. Mining activities: Health impacts. In Encyclopedia of Environmental Health 2nd ed., 415 – 435. Elsevier Inc. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11056-5>>
- Cartagena, M. 2019. Biorremediación en aguas residuales contaminadas con cianuro y mercurio generadas en el proceso de la minería aurífera en Colombia, a partir de una revisión bibliográfica entre los años 2008 – 2018. Tesis de grado, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- astillo, Y. y Vega, R. 2018. Determinación de parámetros óptimas en la biorremediación de efluentes cianurado de minerales auríferos, utilizando Pseudomonas alcalófilas. Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú.
- Corilloca, N. L. y Vargas, K. F. 2020. Empleo de sistemas clorurados en reemplazo del cianuro para el procesamiento de minerales refractarios de oro en la unidad minera Pucamarca - CIA Minera Minsur. Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Copari, A. B.; Carpio, M. y Cáceda, C. J. 2020. «Optimización de factores fisicoquímicos en la biodegradación de cianuro por Klebsiella sp.ART1, en biorreactor aireado». Ciencia and Desarrollo, 19(26): 20 – 31. <<https://doi.org/10.33326/26176033.2020.26.929>>

- Cornejo, M. de L. 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.
- Deloya, A. 2012. «Tratamiento de desechos del cianuro por biorremediación». *Revista Tecnología En Marcha*, 252, 61. <<https://doi.org/10.18845/tm.v25i2.317>>
- Díaz, X. y Caizaguano, R. 1999. «Bioremediation of cyanide leaching residues». *Process Metallurgy*, 9: 595 – 605.
- Egekeze, J. O. y Oehme, F. W. 1980. «Cyanides and their toxicity: A literature review». *Veterinary Quarterly*, 22: 104 – 114. <<https://doi.org/10.1080/01652176.1980.9693766>>
- Estrada, A. F.; Zuluaga, M. y Berrouet, M. C. 2019. «Intoxicación por cianuro, perspectiva desde urgencias: reporte de dos casos y revisión de la literatura». *Medicina UPB*, 382: 168 – 176. <<https://doi.org/10.18566/medupb.v38n2.a09>>
- Gaviria, A. C. y Meza, L. A. 2006. «Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa mineros nacionales, municipio de Marmato, Caldas». *Dyna*, 73149: 31 – 34.
- Gómez, C. G. 2010. Reactores químicos. In *Introducción al Diseño de Reactores*, 1 – 5. Universidad Industrial de Santander.
- Gordillo, M. 2018. Biodegradación de cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería de oro. Tesis de especialidad, Fundación Universidad de América, Bogota, Colombia.
- Grau, M. D. 1999. Estudio del comportamiento de reactores discontinuos y semicontinuos: modelización y comprobación experimental , 1-17. Universidad Politecnica de Catalunya. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6463/02_grauVilalta_capitol_1.pdf>
- Gupta, N.; Balomajumder, C. y Agarwal, V. K. 2010. «Enzymatic mechanism and biochemistry for cyanide degradation: a review». *Journal of Hazardous Materials*, 1761 – 3: 1 – 13. <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.038>>

- Gupta, P.; Sreekrishnan, T. R. y Shaikh, Z. A. 2018. Application of hybrid anaerobic reactor?: Treatment of increasing cyanide containing effluents and microbial composition identification. 226 December 2017:448 – 456. <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.023>>
- Gutierrez, F. R. 2018. Análisis del proceso de eliminación de sustancias tóxicas de efluentes contaminados con cianuro en plantas metalúrgicas de obtención del oro. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Jaibiba, P.; Vignesh, S. N. y Hariharan, S. 2020. Working principle of typical bioreactors. In *Bioreactors*, 145 – 173. Elsevier Inc. <<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821264-6.00010-3>>
- Jandhyala, D. M.; Willson, R. C.; Sewell, B. T. y Benedik, M. J. 2005. «Comparison of cyanide-degrading nitrilases». *Applied Microbiology and Biotechnology*, 683: 327 – 335. <<https://doi.org/10.1007/s00253-005-1903-8>>
- Jumbo, P. X. y Nieto, D. A. 2014. «Tratamiento químico y biológico de efluentes mineros cianurados a escala laboratorio». *Maskana*, 510: 133 – 139. <<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/545>>
- Khamar, Z.; Makhdoumi-Kakhki, A. y Mahmudy, M. H. 2015. «Remediation of cyanide from the gold mine tailing pond by a novel bacterial co-culture». *International Biodeterioration and Biodegradation*, 99, 123 – 128. <<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.01.009>>
- Kumar, N.; Pandey, S.; Pratap, R.; Muzamil, K.; Yadav, M.; Thanki, A. y Kumar, T. 2020. «Bioreactor and bioprocess technology for bioremediation of domestic and municipal wastewater». *Bioremediation of Pollutants*, 251 – 273. <<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819025-8.00011-9>>
- Kuyucak, N. y Akcil, A. 2013. «Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes». *Minerals Engineering*, 50 – 51: 13 – 29. <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.027>>
- Logsdon, M. J.; Hagelstein, K. y Mudder, T. I. 2001. El Manejo del cianuro en la extracción de oro. In *International Council on Metals and the Environment*.

- Lovasoa, C. R.; Hela, K.; Harinaivo, A. A. y Hamma, Y. 2017. «Bioremediation of soil and water polluted by cyanide: A review». *African Journal of Environmental Science and Technology*, 116: 272 – 291. <<https://doi.org/10.5897/AJEST2016.2264>>
- Mahendran, R.; Sabna, B. S.; Thandeeswaran, M.; Vijayasathy, M.; Angayarkanni, J. and Muthusamy, G. 2020. «Microbial (Enzymatic) Degradation of Cyanide to Produce Pterins as Cofactors». *Current microbiology*, 1 – 10.
- Mahendran, R.; Thandeeswaran, M.; Kiran, G.; Arulkumar, M.; Ayub, K. A.; Jabastin, J.; Janani, B.; Anto, T. y Angayarkanni, J. 2018. «Evaluation of Pterin, a Promising Drug Candidate from Cyanide Degrading Bacteria». *Current Microbiology*, 756: 684 – 693. <<https://doi.org/10.1007/s00284-018-1433-0>>
- Maniyam, M. N.; Ibrahim, A. L. y Cass, A. E. G. 2019. «Enhanced cyanide biodegradation by immobilized crude extract of Rhodococcus UKMP-5M». *Environmental Technology United Kingdom*, 403: 386 – 398. <<https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1393015>>
- Mekuto, L.; Jackson, V. A. y Obed, S. K. 2013. «Biodegradation of Free Cyanide Using Bacillus Sp. Consortium Dominated by Bacillus Safensis, Lichenformis and Tequilensis Strains: A Bioprocess Supported Solely with Whey». *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, 0502. <<https://doi.org/10.4172/2155-6199.s18-004>>
- Mekuto, L.; Ntwampe, S. K. O.; Kena, M.; Golela, M. T. y Amodu, O. S. 2016. «Free cyanide and thiocyanate biodegradation by Pseudomonas aeruginosa STK 03 capable of heterotrophic nitrification under alkaline conditions». *3 Biotech*, 61: 1 – 7. <<https://doi.org/10.1007/s13205-015-0317-2>>
- Mekuto, L.; Ntwampe, S. K. O.; Utomi, C. E.; Mobo, M.; Mudumbi, J. B.; Ngongang, M. M. y Akinpelu, E. A. 2017. «Performance of a continuously stirred tank bioreactor system connected in series for the biodegradation of thiocyanate and free cyanide». *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 52, 1936 – 1945. <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.03.038>>
- MINEM. 2020. *Anuario minero 2019* (D. Hoyos, V. Aguinaga, V. Carranza, D. Ramirez, F. Valdivia, & C. Abanto (eds.); Primera ed). <<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2019/AM2019.pdf>>

- Muñoz, R. 2009. Uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales municipales en el entorno de la Laguna de Tamiahua, Veracruz. Tesis de grado, Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México. <http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/munoz_c_r/capitulo3.pdf>
- Natarajan, K. A. 2018. Biotechnology for Gold Mining, Extraction, and Waste Control. In *Biotechnology of Metals*. <<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804022-5.00008-6>>
- azanamahandry, L. C.; Onwordi, C. T.; Saban, W.; Bashir, A. K. H.; Mekuto, L.; Malenga, E.; Manikandan, E.; Fosso-Kankeu, E.; Maaza, M. y Ntwampe, S. K. O. 2019. «Performance of various cyanide degrading bacteria on the biodegradation of free cyanide in water». *Journal of Hazardous Materials*, 380 June. <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120900>>
- Razanamahandry, L. C.; Andrianisa, H. A.; Karoui, H.; Kouakou, K. M. y Yacouba, H. 2016. «Biodegradation of free cyanide by bacterial species isolated from cyanide-contaminated artisanal gold mining catchment area in Burkina Faso». *Chemosphere*, 157, 71 – 78. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.020>>
- Restrepo, O. J.; Montoya, C. A. y Muñoz, N. A. 2006. «Degradación microbiana de cianuro procedente de plantas de beneficio de oro mediante una cepa nativa de *P. Fluorecens*». *Dyna*, 73149: 46 – 51.
- Saavedra, J. 2018. Degradación del cianuro de sodio por bacterias aisladas de efluentes cianurados de la zona minera artesanal, Huamachuco - La Libertad. Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú. <<http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/10934>>
- Sharma, S. 2012. «Bioremediation: Features, Strategies and applications». *Asian Journal of Pharmacy and Life Science*, 22: 202 – 213.
- Singh, U.; Arora, N. K. y Sachan, P. 2018. «Simultaneous biodegradation of phenol and cyanide present in coke-oven effluent using immobilized *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas stutzeri*». *Brazilian Journal of Microbiology*, 491: 38–44. <<https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.12.013>>

Hugo Apaza-Aquino, Yoselin P. Rojas-Machaca, Encida Mamani-Mamani y Vianey D. Chura-Palli

Sosa, R. G. y Argota, G. 2017. «Predicción ecotoxicológica ante concentraciones no deseadas de cianuro libre en efluentes mineros-auríferos». *Campus*, 2224: 179 – 186. <<https://doi.org/10.24265/campus.2017.v22n24.03>>

Srivastava, A. K.; Singh, R. K. y Singh, D. 2021. Chapter 20 - Microbe-based bioreactor system for bioremediation of organic contaminants: present and future perspective. In *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants*. 241 – 253. Elsevier Inc. <<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821199-1.00020-1>>

Valenzuela, J. P. 2017. Biorremediación por medio de tratamiento microbiológico de las aguas residuales de la empresa AIC para la reducción de metales pesados y cianuros. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Ibarra, Ecuador.

Vargas-Serna, C. L.; Carmona-Orozco, M. L. y Panay, A. J. 2020. «Biodegradation of cyanide using recombinant *Escherichia coli* expressing *Bacillus pumilus* cyanide dihydratase». *Revista Colombiana de Biotecnología*, 221, 27 – 35. <<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.79559>>

Zapata, E. J. y Bermúdez, Y. 2015. Estado del arte de la biodegradación de cianuro en aguas residuales industriales. Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá Colombia.

Fecha de recepción: 04/11/2020

Fecha de aceptación: 17/04/2021

Correspondencia

Hugo Apaza Aquino

hapaza89@gmail.com