

Degradación de cianuro en efluente de lixiviación de minerales auríferos, mediante *Pseudomonas pseudoalcaligenes* nativas

Cyanide degradation in gold ore leaching effluent by native *Pseudomonas pseudoalcaligenes*

Vladimir Alejandro Arias Arce^{1,a}, Daniel Florencio Lovera Dávila^{1,b}, Ismael Molina-Pereyra^{1,c},
Tito Libio Sánchez Rojas^{2,d}

Recibido: 18/06/2024 - Aprobado: 24/10/2024 – Publicado: 13/12/2024

RESUMEN

La generación de relaves con contenido de cianuro está en aumento; por ello, la búsqueda de metodologías y microorganismos para contrarrestar su impacto negativo en el medio ambiente es constante. En este estudio se utilizaron cepas de *Pseudomonas pseudoalcaligenes* aisladas de efluentes del proceso de cianuración de minerales auríferos. Inicialmente, se llevaron a cabo ensayos de tolerancia en soluciones con 250 ppm de cianuro de sodio a diferentes valores de pH, empleando una población inicial de 4.00×10^7 UFC/mL y con agitación durante 54 horas. Se observó una degradación del 39,2 % de cianuro libre (CN⁻) a un pH de 9,8. Posteriormente, se evaluó la degradación del CN⁻ durante 144 horas en medios constituidos por soluciones de efluentes del proceso de cianuración con pH de 10,5, una población bacteriana inicial de 9.94×10^8 UFC/mL y concentraciones de 80 a 700 ppm de CN⁻. Los resultados mostraron reducciones de cianuro en un rango del 55,89 al 84,79 %, representadas por las ecuaciones: $y_{80} = -0,2393x + 73,05$ y $y_{700} = -3,6439x + 617,98$, respectivamente. Por lo tanto, se determinó que la degradación del cianuro tiene relación directa con su concentración en la solución; es decir, a mayor concentración de cianuro, mayor es el porcentaje de abatimiento.

Palabras claves: biorremediación, cianuración, degradación de cianuro, minerales auríferos, *Pseudomonas pseudoalcaligenes*.

ABSTRACT

The generation of cyanide-containing tailings is increasing; therefore, the search for methodologies and microorganisms to counteract their negative impact on the environment is constant. In this study, *Pseudomonas pseudoalcaligenes* strains isolated from gold ore cyanidation effluents were used. Initially, tolerance tests were carried out in solutions containing 250 ppm sodium cyanide at different pH values, using an initial population of 4.00×10^7 CFU/mL and agitation for 54 hours. A degradation of 39.2 % free cyanide (CN⁻) was observed at pH 9.8. Subsequently, CN⁻ degradation was evaluated for 144 hours in media consisting of cyanidation process effluent solutions at pH 10.5, an initial bacterial population of 9.94×10^8 CFU/mL and concentrations of 80 to 700 ppm CN⁻. The results showed cyanide reductions ranging from 55.89 to 84.79 %, represented by the equations: $y_{80} = -0.2393x + 73.05$ and $y_{700} = -3.6439x + 617.98$, respectively. Therefore, it was determined that the degradation of cyanide is directly related to its concentration in the solution, the higher the concentration of cyanide, the higher the percentage of abatement.

Keywords: Bioremediation, cyanidation, cyanide degradation, gold ores, *P. pseudoalcaligenes*.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Lima, Perú.

2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Biología, Departamento de Microbiología y Parasitología. Lima, Perú.

a Autor para correspondencia: variasa@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7053-9656>

b E-mail: dloverad@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2815-0716>

c E-mail: ismael.molina@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8608-2291>

d E-mail: tlibior@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3853-2128>

I. INTRODUCCIÓN

Cada año se generan y descargan en presas de relaves cientos de millones de toneladas de residuos que contienen cianuro (compuesto altamente tóxico), junto con otros elementos valiosos (Dong et al., 2021). Asimismo, se forman diversas comunidades bacterianas, tanto cultivables como no cultivables, de las cuales es posible aislar y caracterizar cepas de distintos géneros, como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, entre otros (Sernaque et al., 2019). Con el fin de preservar el ecosistema de los efectos contaminantes, en la naturaleza se encuentran diversos microorganismos tolerantes a condiciones extremas, capaces de biodegradar metales tóxicos y otros contaminantes, como el cianuro (Begum et al., 2022).

El cianuro de sodio (NaCN) es un compuesto químico ampliamente utilizado en las plantas de procesamiento de minerales auríferos; en consecuencia, se generan abundantes efluentes sólidos y líquidos que contienen cianuro en diversas formas y compuestos, los cuales producen impactos negativos en el medio ambiente (Anning et al., 2019; Anand & Pandey, 2022). Entre los microorganismos destacados en la biodegradación del cianuro se encuentran *Streptococcus sp.* C33 y *Bacillus sp.* A74 (Marin, Ochoa & Prado, 2010), *Pseudomonas parafulva* NBRC 16636 (Moradkhani et al., 2018), *Escherichia coli* y *Pseudomonas fluorescens* (Martínez & Hernández, 2022). Con el uso de la cepa *Bacillus subtilis* se ha logrado degradar el 100 % del cianuro libre en solución sintética con 500 mg/L de concentración (Rosario et al., 2023).

La biorremediación o biodegradación involucra reacciones que convierten el radical cianuro en moléculas orgánicas o inorgánicas más simples, las cuales pueden ser fácilmente metabolizadas a amonio y dióxido de carbono o metano (Sáez et al., 2019). Muchas especies microbianas (bacterias, hongos y algas), así como las plantas, pueden catalizar la degradación del cianuro y/o facilitar la formación de subproductos menos dañinos, hasta alcanzar límites aceptables (Gurbuz et al., 2004). Existen diversas enzimas producidas por microorganismos que emplean el cianuro como sustrato (Gupta et al., 2010; Tuya, 2014; Tiong et al., 2015). Todas estas opciones se presentan como tecnologías limpias y alternativas para la protección del medio ambiente (Del Carpio et al., 2007).

Varias especies microbianas pueden degradar compuestos de cianuro en productos menos tóxicos a través de diferentes rutas metabólicas, cuyas enzimas son producidas por microorganismos que usan el cianuro como sustrato. Los métodos biológicos para el tratamiento del cianuro, además de ser rentables, no generan contaminación ambiental (Dwivedi et al., 2018). Las *Pseudomonas alcalófilas* están siendo muy estudiadas para su aplicación en la remediación de diversos efluentes, especialmente aquellos de la minería aurífera, donde el NaCN es utilizado ampliamente. Por ello, es esencial definir su tolerancia a diversas concentraciones de cianuro y a factores como el pH, la temperatura y el tamaño del inóculo (Luque-Almagro, 2004; Khamar & Mahmudy, 2015). La identificación de las reacciones de oxidación y reducción, así como de microorganismos aerobios y anaerobios, ha permitido evaluar las ventajas y desventajas de la biorremediación de

cianuro en suelos y aguas (Gordillo, 2018). La degradación microbiológica del cianuro se ha planteado frecuentemente como una alternativa a los métodos convencionales, con beneficios económicos y ambientales (Mosher & Figueroa, 1996). Álvarez et al. (2023) evaluaron el potencial de biodegradación del cianuro en condiciones alcalinas utilizando una cepa nativa de *Bacillus subtilis* aislada de una mina de oro. De igual forma, Alvarado et al. (2022) identificaron varios géneros de bacterias capaces de degradar cianuro en condiciones alcalinas.

Para contrarrestar los efectos negativos del cianuro, existen varias metodologías y microorganismos cuya eficacia depende de diversos factores ambientales (Agurto & Arzapalo, 2021). Con la bacteria *Klebsiella sp.* ART1 en reactores aireados se logró degradar hasta el 98 % de cianuro a productos menos tóxicos (Copari et al., 2020). Mekuto et al. (2014) afirmaron que todos los microorganismos aislados de aguas residuales con cianuro pertenecían al género *Bacillus*. Asimismo, describen la capacidad de estos microorganismos para tolerar y degradar altas concentraciones de CN^- , convirtiéndolo parcialmente en amonio. Sin embargo, también señalan el efecto inhibitorio sobre la degradación del cianuro, ya que los microorganismos prefieren utilizar el amonio sobre el cianuro, lo cual reduce la eficacia en la biodegradación (Panay et al., 2020). En el estudio realizado por Cotrina y Mamani (2022), se lograron altas tasas de degradación de cianuro en efluentes cianurados mediante *Pseudomonas fluorescens*.

Las *Pseudomonas pseudoalcaligenes* puede utilizar el cianuro y sus derivados como fuente de nitrógeno para su crecimiento, permitiendo la biodegradación de residuos industriales cianurados (Luque-Almagro et al., 2016; Ibáñez et al., 2017) y el abatimiento de cianuro en aguas residuales de la industria joyera (Cabello et al., 2018; Ibáñez, 2019).

II. MATERIALES Y MÉTODO

El estudio se realizó con soluciones acuosas remanentes de los procesos de cianuración de minerales de oro y plata, depositadas en la relavera de la Compañía Minera Aurífera Cuatro de Enero S.A., ubicada en Caravelí, Arequipa, Perú (Arias et al., 2023).

2.1. Procedencia del efluente y toma de muestra

Se extrajeron 10 muestras: 4 en puntos de alimentación y 6 en diferentes puntos de la relavera, con un volumen total aproximado de 30 litros. Las muestras se transportaron siguiendo las recomendaciones de Ashbolt (2015). La determinación del contenido de cianuro libre se realizó mediante titulación volumétrica, utilizando una solución de nitrato de plata y yoduro de potasio.

2.2. Tolerancia de la cepa *Pseudomonas pseudoalcaligenes* activada

La evaluación de la tolerancia se realizó en un medio mínimo M9 (Luque-Almagro, 2004), utilizado en varios estudios previos. Khamar et al. (2015) aislaron diversos microorganismos a partir de residuos del tratamiento de minerales auríferos y determinaron su tolerancia en soluciones de hasta 350 ppm de cianuro. En el presente

estudio, se evalúa la tolerancia sometiendo la cepa a un medio mínimo compuesto por 0.005 % de K_2HPO_4 , 0.2 % de Na_2SO_4 , 0.003 % de $NaCl$ y 0.1 % de $MgSO_4$ (Morillo y Guevara, 2015), complementado con cianuro de sodio hasta alcanzar 250 ppm de CN^- y con valores de pH de 9.8, 10.0, 10.5, 11.0 y 11.3.

Los ensayos se realizaron en matraces agitados sobre una plataforma (Orbit Shaker) a 150 rpm durante 54 horas, en un medio compuesto por 100 mL de M9C y 10 mL de cepa activa, con una población bacteriana inicial de 4.00×10^7 UFC/mL. Se evaluó el crecimiento de la población y la degradación del cianuro.

2.3. Degradación de cianuro en el efluente de cianuración

El conocimiento y manejo de las variables determinan en gran medida el grado de destrucción del radical cianuro en medios acuosos. En estudios realizados por Morillo y Guevara (2015), se menciona que la degradación del CN^- a altas concentraciones es influenciada por la temperatura y el pH, siendo muy favorable a 36 °C y a un pH de 9.5.

Los ensayos de degradación se realizaron en matraces de 500 mL sobre agitadores de plataforma a 150 rpm, añadiendo 200 mL de solución de proceso de cianuración con diferentes concentraciones de CN^- y 20 mL de cepa activa con una población de 9.94×10^8 UFC/mL. Las concentraciones de cianuro utilizadas fueron: 80, 235, 390, 545 y 700 ppm.

III. RESULTADOS

3.1. Tolerancia con 250 ppm de CN^-

Durante los ensayos de tolerancia de la bacteria al cianuro, se observaron incrementos en la población durante las primeras horas de contacto bacteriano, pasando de 4.00×10^7 a 2.52×10^8 UFC/mL a pH 9.8 en aproximadamente 18 horas. Posteriormente, la población se redujo progresivamente. Este comportamiento fue similar a mayores valores de pH. A pH 11.3 la población se redujo a 6.50×10^6 UFC/mL después de 54 horas de procesamiento. Las fases de latencia y crecimiento estuvieron unificadas, mostrando una tendencia al crecimiento; no se apreció la fase estacionaria, pero sí la fase de muerte o disminución (ver Figura 1).

La cinética de la degradación del cianuro, por acción de las *P. pseudoalcaligenes*, en un medio mínimo de sales, complementado con solución de NaCN (250 ppm), se evaluó a pH de: 9.8, 10.0, 10.5, 11.0 y 11.3, durante el periodo de 54 horas, reduciéndose a: 152, 162, 170, 171 y a 183 ppm de CN^- , respectivamente. El control negativo (sin inoculación de cepa) para la misma concentración de CN^- se llevó a cabo a pH 10.5, observándose la degradación del cianuro de 250 a 230 o sea una reducción de 8 % en el mismo periodo de tiempo.

Bajo las condiciones evaluadas, la degradación del CN^- en el periodo de tiempo ensayado fueron de: 39.22, 35.21, 32.02, 34.07 y 27.03%, a partir de soluciones con pH de: 9.8, 10.0, 10.5, 11.0 y 11.3, respectivamente.

Figura 1
Variación de la población de *P. pseudoalcaligenes* en un medio mínimo de sales, complementado con 250 ppm de CN^-

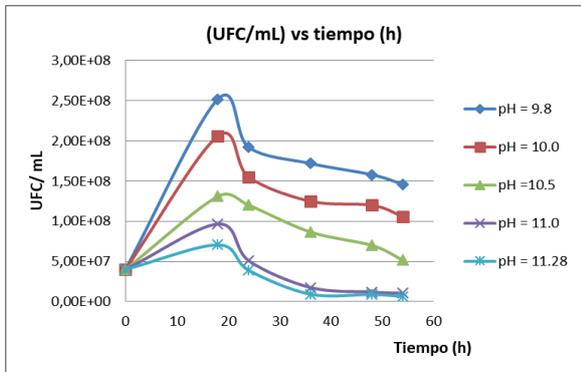


Figura 2
Degradación del CN^- por las bacterias *P. pseudoalcaligenes*

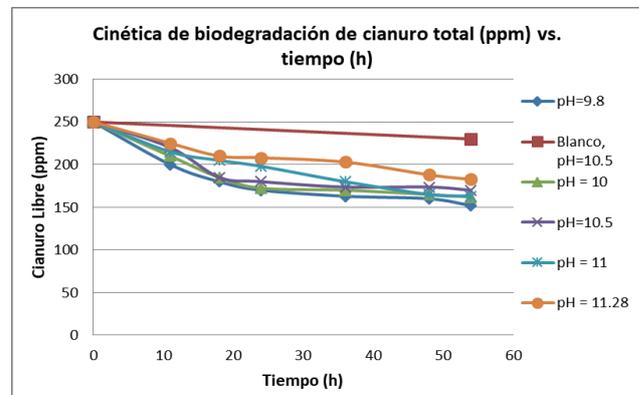
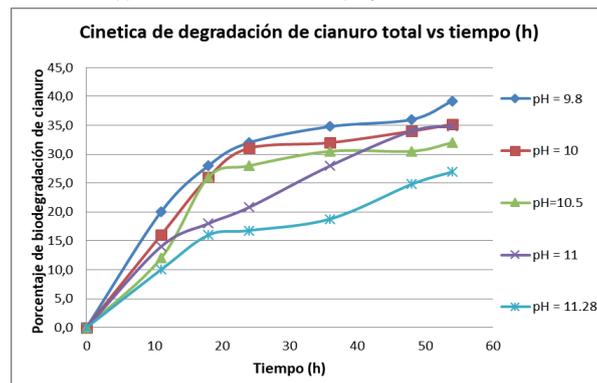


Figura 3
Degradación del CN^- por las *P. pseudoalcaligenes* a partir de un contenido inicial de 250 ppm, a diferentes valores de pH y durante 54 horas



3.2. Degradación del CN⁻ en efluente de proceso de cianuración

Para la degradación de cianuro, inicialmente se cultivaron las cepas en un medio mínimo de sales durante 48 horas, con la finalidad de preparar las soluciones líquidas. Las que estaban compuestas por efluente del proceso de lixiviación de minerales con distintas concentraciones de cianuro, la cepa bacteriana *Pseudomonas pseudoalcaligenes* y ajustadas a un pH de 10.5.

En todos los casos, se observó un rápido descenso de la población bacteriana. Durante las primeras 48 horas de tratamiento, aproximadamente el 80 % de la población inicial se perdió, alcanzando concentraciones de 2.68×10^6 y 5.40×10^6 UFC/mL en los medios que contenían inicialmente 80 y 700 ppm de CN⁻, respectivamente.

La cinética de biodegradación del cianuro está directamente relacionada con su concentración inicial en la

solución. En la Figura 5 se observa una reducción de 700 a 106.5 ppm, lo que corresponde a un abatimiento del 84.79 %. En el otro extremo, la concentración disminuyó de 80 a 35.3 ppm, con una reducción del 55.89 %. Estos resultados se representan mediante las ecuaciones lineales (1) y (2), ambas con pendientes negativas.

$$y_{700} = -3.6439x + 617.98 \tag{1}$$

$$y_{80} = -0.2393x + 73.05 \tag{2}$$

En el control negativo, realizado sin la inoculación de la cepa bacteriana, bajo los mismos parámetros, se observó la reducción de 700 a 614 ppm de CN⁻ equivalente a 12.28 % de reducción.

La degradación del cianuro durante 144 horas fue de: 55.89, 76.43, 79.07, 82.36 y 84.79%, ensayados a concentraciones iniciales de: 80, 235, 390, 545 y 700 ppm de CN⁻, respectivamente.

Figura 4
Disminución de la población de *P. pseudoalcaligenes* en solución residual de procesos de cianuración

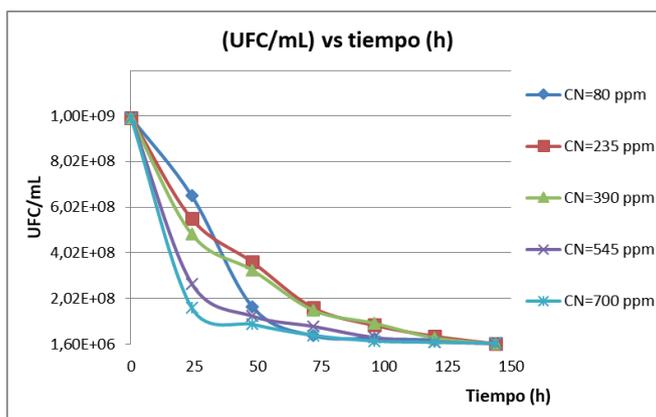


Figura 5
Representación lineal del abatimiento de cianuro en efluentes residuales de lixiviación que contienen distintas concentraciones de CN⁻

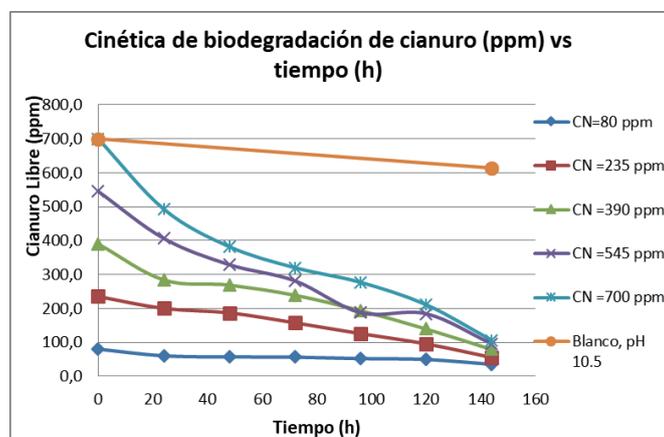
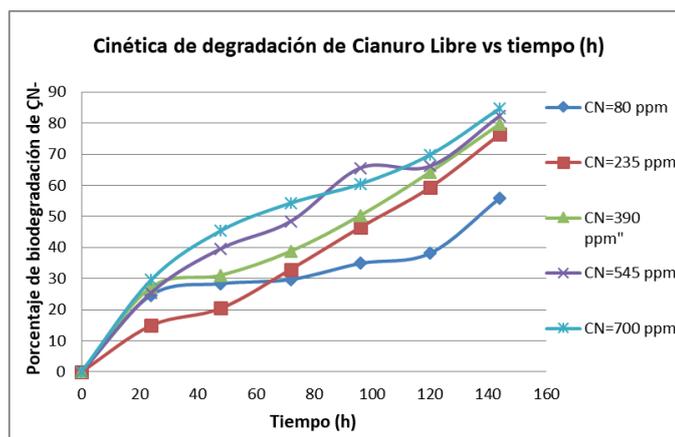


Figura 6
Degradación del CN^- en efluentes a pH 10.5



IV. DISCUSIÓN

Los procesos de tratamiento fisicoquímicos permiten degradar el radical cianuro a sus formas simples a costos relativamente bajos; sin embargo, los métodos microbiológicos ofrecen alternativas altamente viables y respetuosas con el medio ambiente (Akcil et al., 2003; Cabello et al., 2018; Alvillo et al., 2021). En los residuos generados por la actividad industrial, resulta de interés identificar nitrilasas capaces de degradar el cianuro, ya que estas no requieren sustratos secundarios ni cofactores para la hidrólisis de los derivados orgánicos del cianuro (Park et al., 2017). Sin embargo, este mecanismo no ha sido ampliamente abordado.

Se ha observado que la cinética más favorable para la degradación del CN^- ocurre en las primeras horas de procesamiento, como se evidencia en el estudio de Marín et al. (2010). Este proceso, sin embargo, conlleva una reducción significativa de la población bacteriana, que disminuye con el tiempo, por lo que es necesario identificar las causas de esta disminución y buscar optimizar el proceso. La capacidad de las bacterias para tolerar altas concentraciones de cianuro aún no está completamente definida, pero se sabe que está directamente relacionada con el contenido de este compuesto en la solución. Entre las variables de interés destacan la temperatura, el pH (Morillo & Guevara, 2015) y la concentración de nutrientes orgánicos (Moradkhani et al., 2018).

En el caso de *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, la única fuente de nitrógeno para su actividad metabólica es el radical cianuro o cianato. Su degradación implica la identificación de una enzima que facilite su hidrólisis y/o conversión a amonio y dióxido de carbono (Sáez et al., 2019). Los enfoques ómicos, como la genómica, la transcriptómica, la metabolómica y la proteómica, están permitiendo una mejor regulación y optimización de los procesos de remediación (Kaur et al., 2021).

V. CONCLUSIONES

Bajo los parámetros evaluados, durante el ensayo de tolerancia de la bacteria *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, se observó que la mayor degradación del cianuro ocurrió

a un pH de 9.8, alcanzando un 39.2 %, lo que representó una reducción de 250 a 152 ppm. A un pH de 11.3, la degradación fue del 27.0 %, reduciéndose de 250 a 183 ppm de CN^- . Esto evidencia que, a valores de pH más alcalinos, la degradación del cianuro libre se ve afectada.

En las distintas concentraciones de cianuro evaluadas, el descenso de la población bacteriana fue muy rápido durante las primeras 48 horas, alcanzando valores de 2.68×10^6 y 5.40×10^6 UFC/mL en soluciones que contenían inicialmente 80 y 700 ppm de CN^- , respectivamente. Se determinó una relación directa entre la población bacteriana y el cianuro libre, lo que sugiere una posible autodestrucción debido al agotamiento de nutrientes orgánicos en el medio.

El abatimiento del cianuro libre mostró una relación directa con su concentración inicial en la solución. En medios con una concentración inicial de 700 ppm, se redujo a 106.5 ppm (84.79 % de reducción), mientras que en soluciones con 80 ppm iniciales, la concentración final fue de 35.3 ppm (55.89 % de reducción). Representadas por las siguientes ecuaciones: $y_{700} = -3.6439x + 617.98$ y $y_{80} = -0.2393x + 73.05$, respectivamente.

Por otro lado, los ensayos de control negativo realizados a diferentes concentraciones de cianuro libre y a un pH de 10.5 revelaron la degradación natural del CN^- . En este caso, se registró una reducción del 8 % en un periodo de 54 horas y del 12.28 % en 144 horas, con una clara tendencia a incrementarse en periodos más prolongados y bajo condiciones extremas.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a través del Vicerrectorado de Investigación y Posgrado; por el financiamiento del proyecto de investigación N° 161601031. Asimismo, extienden su reconocimiento a los miembros del grupo de investigación en Biometalurgia, así como a los integrantes del Laboratorio de Microbiología Ambiental y Biotecnología de la Facultad de Ciencias Biológicas.

VII. REFERENCIAS

- Agurto Ludeña, A. C., & Arzapalo Marcelo, R. (2021). *Revisión sistemática y meta-análisis: Aplicación de microorganismos para la degradación de cianuro en las aguas residuales por actividades mineras auríferas*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/85740>
- Akcil, A., Karahan, A. G., Ciftci, H., & Sagdic, O. (2003). Biological treatment of cyanide by natural isolated bacteria (*Pseudomonas* sp.). *Minerals Engineering*, 16(7), 643–649. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00101-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00101-8)
- Alvarado-Lopez M.J., Garrido-Hoyos S.E., Raynal-Gutierrez M.E., El-Kassis E.G., Marrugo-Negrete J.L., Rosano-Ortega G. (2022). Native Cyanide Degrading Bacterial Consortium and Its Potential for Gold Mine Tailings Tertiary Biotechnological Treatment. *Chemical Engineering Transactions*, 94, 1441-1446. <https://www.cetjournal.it/cet/22/94/240.pdf>
- Rosario, C. G. A., Vallenar-Arévalo, A. T., Arévalo, S. J., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2023). Biodegradation of cyanide using a *Bacillus subtilis* strain isolated from artisanal gold mining tailings. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 40(1), 129–136. <https://doi.org/10.1007/s43153-022-00228-4>
- Alvillo-Rivera, A., Garrido-Hoyos, S., Buitrón, G., Thangarasu-Sarasvathi, P., & Rosano-Ortega, G. (2021). Biological treatment for the degradation of cyanide: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1418–1433. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.030>
- Anand, V., & Pandey, A. (2022). Role of microbes in biodegradation of cyanide and its metal complexes. In *Development in Wastewater Treatment Research and Processes* (pp. 205–224). *Elsevier*: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85839-7.00016-5>
- Anning, C., Wang, J., Chen, P., Batmunkh, I., & Lyu, X. (2019). Determination and detoxification of cyanide in gold mine tailings: A review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 37(11), 1117–1126. <https://doi.org/10.1177/0734242X19876691>
- Arias-Arce, V. A., Sánchez-Rojas, T. L., Castillo-Aldave, Y., & Vega-Alave, R. (2023). Aislamiento y adaptación de *Pseudomonas pseudoalcaligenes* en un efluente de proceso de cianuración de minerales auríferos. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(52), e26547. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.26547>
- Ashbolt, N. J. (2015). Microbial Contamination of Drinking Water and Human Health from Community Water Systems. *Current Environmental Health Reports*, 2(1), 95–106. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40572-014-0037-5>
- Begum, S., Rath, S. K., & Rath, C. C. (2022). Applications of Microbial Communities for the Remediation of Industrial and Mining Toxic Metal Waste: A Review. *Geomicrobiology Journal*, 39(3–5), 282–293. <https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1991054>
- Cabello, P., Luque-Almagro, V. M., Olaya-Abril, A., Sáez, L. P., Moreno-Vivián, C., & Roldán, M. D. (2018). Assimilation of cyanide and cyano-derivatives by *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344: from omic approaches to biotechnological applications. *FEMS Microbiology Letters*, 365(6). <https://doi.org/10.1093/femsle/fny032>
- Copari Mamani, A. B., Carpio Mamani, M., & Cáceda Quiroz, C. J. (2020). Optimización de factores fisicoquímicos en la biodegradación de cianuro por *Klebsiella* sp. ART1, en biorreactor aireado. *Ciencia & Desarrollo*, 26, 20–31. <https://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cyd/article/view/929>
- Cotrina, D. C., & Mamani, M. C. (2022). Biodegradación del cianuro contenido en el lixiviado de un mineral aurífero. *Revista Ciencias Biológicas y Ambientales*, 1(1). <http://www.revistas.unjbg.edu.pe/index.php/recibya/article/view/1596>
- Del Carpio H., Rueda M., Pacheco H. y Bernabe J. C. (2007). Caracterización microbiológica de *Pseudomonas pseudoalcaligenes* (ATCC 17440) y su capacidad biodegradativa de cianuro presente en relaves mineros. *Veritas*, 10(1), 132-136. <https://revistas.ucsm.edu.pe/ojs/index.php/veritas/article/view/52>
- Dong, K., Xie, F., Wang, W., Chang, Y., Lu, D., Gu, X., & Chen, C. (2021). The detoxification and utilization of cyanide tailings: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 302, 126946. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126946>
- Dwivedi, N., Balomajumder, C., & Mondal, P. (2018). Applications of Microorganisms in Biodegradation of Cyanide from Wastewater. In *Advances in Microbial Biotechnology* (pp. 301–328). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781351248914-12>
- Gordillo González, M. C. (2018). *Biodegradación de cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería de oro*. (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América). <http://52.0.229.99/handle/20.500.11839/7134>
- Gupta, N., Balomajumder, C., & Agarwal, V. K. (2010). Enzymatic mechanism and biochemistry for cyanide degradation: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1–3), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.038>
- Gurbuz, F., Ciftci, H., Akcil, A., & Karahan, A. G. (2004). Microbial detoxification of cyanide solutions: a new biotechnological approach using algae. *Hydrometallurgy*, 72(1–2), 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2003.10.004>
- Ibáñez García, M. I. (2019). *Biorremediación de residuos industriales cianurados de la joyería por la bacteria alcalófila Pseudomonas pseudoalcaligenes CECT5344*. [Tesis doctoral, Universidad de Córdoba] <http://hdl.handle.net/10396/18354> <http://hdl.handle.net/10396/18354>
- Ibáñez, M. I., Cabello, P., Luque-Almagro, V. M., Sáez, L. P., Olaya, A., Sánchez de Medina, V., Luque de Castro, M. D., Moreno-Vivián, C., & Roldán, M. D. (2017). Quantitative proteomic analysis of *Pseudomonas pseudoalcaligenes* CECT5344 in response to industrial cyanide-containing wastewaters using Liquid Chromatography-Mass Spectrometry/Mass Spectrometry (LC-MS/MS). *PLOS ONE*, 12(3), e0172908. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172908>
- Kaur, G., Kaur, D., & Gupta, S. (2021). The Role of Microorganisms in Remediation of Environmental Contaminants (pp. 421–450). https://doi.org/10.1007/978-981-15-5499-5_15

- Khamar, Z., Makhdoumi-Kakhki, A., & Mahmudy Gharai, M. H. (2015). Remediation of cyanide from the gold mine tailing pond by a novel bacterial co-culture. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 99, 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.01.009>
- Luque-Almagro, V. M. (2004). *Metabolismo del cianuro y del cianato en pseudomonas pseudoalcaligenas cect5344 aplicaciones biotecnológicas* (Doctoral dissertation, Universidad de Córdoba). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=70625>
- Luque-Almagro, V. M., Moreno-Vivián, C., & Roldán, M. D. (2016). Biodegradation of cyanide wastes from mining and jewellery industries. *Current Opinion in Biotechnology*, 38, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.12.004>
- Marín Vallejo, L. M., Ochoa Ruilova, J. A., & Prado Farfán, K. V. (2010). *Análisis comparativo in vitro de la actividad biodegradadora de bacterias del género Pseudomonas sp. y microorganismos nativos, para su uso en un proceso de biorremediación in situ de sales de cianuro* (Bachelor's thesis). <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1524>
- Martinez, S., & Aguilar Hernández, A. (2022). *El papel de los procariotas en la degradación del cianuro*. *Herreriana*, 3(2), 33–36. <https://doi.org/10.29057/h.v3i2.8162>
- Mekuto L., Jackson V.A. & Obed Ntwampe, S. K. (2014). 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 & Biodegradation*, 05(02). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.S18-004>
- Moradkhani, M., Yaghmaei, S., & Ghobadi Nejad, Z. (2017). Biodegradation of Cyanide under Alkaline Conditions by a Strain of Pseudomonas Putida Isolated from Gold Mine Soil and Optimization of Process Variables through Response Surface Methodology (RSM). *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(3), 265–273. <https://doi.org/10.3311/PPCh.10860>
- Morillo, J., & Guevara, J. (2015). Degradación de cianuro de sodio por pseudomonas sp. a dos temperaturas y tres pH. *Revista REBIOLEST*, 3(1), 23-32. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/ECCBB/article/view/892>
- Mosher, J. B., & Figueroa, L. (1996). Biological oxidation of cyanide: A viable treatment option for the minerals processing industry? *Minerals Engineering*, 9(5), 573–581. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00044-1](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00044-1)
- Panay, A. J., Vargas-Serna, C. L., & Carmona-Orozco, M. L. (2020). Biodegradation of cyanide using recombinant Escherichia coli expressing Bacillus pumilus cyanide dihydratase. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(1), 27–35. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.79559>
- Park, J. M., Trevor Sewell, B., & Benedik, M. J. (2017). Cyanide bioremediation: the potential of engineered nitrilases. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(8), 3029–3042. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8204-x>
- Rosario, C. G. A., Vallenar-Arévalo, A. T., Arévalo, S. J., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2023). Biodegradation of cyanide using a Bacillus subtilis strain isolated from artisanal gold mining tailings. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 40(1), 129–136. <https://doi.org/10.1007/s43153-022-00228-4>
- Sáez, L. P., Cabello, P., Ibáñez, M. I., Luque-Almagro, V. M., Roldán, M. D., & Moreno-Vivián, C. (2019). Cyanate Assimilation by the Alkaliphilic Cyanide-Degrading Bacterium Pseudomonas pseudoalcaligenes CECT5344: Mutational Analysis of the cyn Gene Cluster. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(12), 3008. <https://doi.org/10.3390/ijms20123008>
- Sernaque Aguilar, Y. A., Cornejo La Torre, M., Regard, J. P., & Mialhe Matonnier, E. L. (2019). Caracterización molecular de bacterias cultivables y no cultivables procedentes de pozas de lixiviación con cianuro. *Revista Peruana de Biología*, 26(2), 275–282. <https://doi.org/10.15381/rpb.v26i2.16383>
- Tiong, B., Bahari, Z. M., Lee, N. S. I. S., Jaafar, J., Ibrahim, Z., & Shahir, S. (2015). Cyanide degradation by Pseudomonas pseudoalcaligenes strain W2 isolated from mining effluent. *Sains Malaysiana*, 44(2), 233-238. http://journalarticle.ukm.my/8307/1/10_Belinda_Tiong.pdf
- Tuya Salas, J. D. (2014). *Evaluación de la capacidad degradativa de cianuro por bacterias alcalófilas aisladas de los relaves de la planta concentradora de metales Mesapata Cácat-Ancash*. [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana] <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/3641>

Contribución de autoría

Vladimir Arias Arce: conceptualización, metodología, investigación, recursos, revisión y edición, visualización, administración de proyectos y adquisición de financiamiento; Daniel Lovera Dávila: validación, análisis formal, investigación, curación de datos, redacción del borrador original y supervisión; Ismael Molina Pereyra: software, investigación, curación de datos y redacción del borrador original y supervisión; Tito Sánchez Rojas: análisis formal, recursos, curación de datos, escritura, revisión, edición y visualización.

Financiamiento

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, R.R. N° 01255-R-16. Proyecto de Investigación N° 161601031

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses.