

Bioremediation as a water treatment for heavy metal removal: A systematic literary review 2015-2025

Osorio-Paredes Liney¹, Olivares-Peña Juana Doreismith²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c22922@utp.edu.pe, c25141@utp.edu.pe

Abstract– The presented systematic review analyzes the influence of bioremediation of heavy metals as a water treatment technique from 2015 to 2025. The main and specific objectives were to assess the contribution of bioremediation in the removal of chemical pollutants from water, as well as its impact from a sustainable and effective perspective. An in-depth exploration was conducted in the Web of Science database, using specific keywords and inclusion and exclusion parameters. The results indicate that bioremediation techniques are sustainable and efficient methods, with heavy metal adsorption values reaching up to 100% when using biological organisms, improving water quality for reuse or safe discharge into the environment. However, limitations were also identified, such as the performance of microorganisms depending on the adsorbate or adsorbent biomaterials, which may be affected by factors such as pH, temperature, and high concentrations of toxic substances. The need for the application of nanoparticles or optimized microorganisms may be limited by regulations and have a negative ecological impact. The contribution of this review to the literature is significant, highlighting both the advantages and limitations of bioremediation. Future research is suggested to delve deeper into the optimization of bioremediation execution conditions, to improve the resistance and adsorption capacity of biological organisms, the use of nanotechnology to enhance the process, and the development of strategies for the recovery and recycling of adsorbed metals.

Keywords: bioremediation, water treatment, heavy metals, phytoremediation, biosorption.

La Biorremediación como Tratamiento de Agua para remoción de Metales Pesados: Una Revisión Sistemática Literaria 2015-2025

Osorio-Paredes Liney¹, Olivares-Peña Juana Doreismith²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c22922@utp.edu.pe, c25141@utp.edu.pe

Resumen– La revisión sistemática presentada analiza la influencia de la Biorremediación de metales pesados, como técnica de tratamiento de agua 2015-2025. Los objetivos principal y específicos fue evaluar la contribución de la biorremediación en la eliminación de contaminantes químicos del agua, así como su impacto bajo la perspectiva sostenible y eficaz. Se realizó una exploración profunda en la base de datos Web of Science, utilizando palabras clave específicas y parámetros de inclusión y exclusión. Los resultados indican que las técnicas de biorremediación son métodos sustentables y eficientes, cuyos valores de adsorción de metales pesados llega hasta un 100%, al utilizar organismos biológicos mejorando la calidad del recurso hídrico para su reutilización o descarga segura en el ambiente. Sin embargo, también se identificaron limitaciones, como el rendimiento de los microorganismos según el adsorbato o biomateriales adsorbentes, los cuales pueden estar sujetos a factores como pH, temperatura y concentración alta de sustancias tóxicas, o la necesidad de aplicación de nanopartículas o microorganismos optimizados, puede estar limitado a normativas y tener un impacto ecológico negativo. La contribución de esta revisión a la literatura es significativa, destacando tanto las ventajas como las limitaciones de la biorremediación. Se sugiere la realización de futuras investigaciones que indaguen a profundidad el tema de la optimización de las condiciones de ejecución de la biorremediación, para mejorar la resistencia y capacidad de adsorción de los organismos biológicos, el uso de la nanotecnología para mejorar el proceso, el desarrollo de estrategias para la recuperación y reciclaje de los metales adsorbidos.

Palabras clave: biorremediación, tratamiento de agua, metales pesados, fitorremediación, biosorción

I. INTRODUCCIÓN

La existencia de contaminantes emergentes genera preocupaciones respecto a la salud y la seguridad ambiental. Las plantas tradicionales de tratamiento de aguas residuales o de potabilización no están bajo un diseño que elimine estos contaminantes [1], los que pueden ser compuestos orgánicos presentes en el agua, como productos farmacéuticos y de cuidado personal, aditivos alimentarios, pesticidas, plastificantes, detergentes, desinfectantes [2], y los metales pesados se consideran uno de los contaminantes más tóxicos en el ambiente por tener efectos nocivos a nivel de toda la cadena trófica, en especial el Cd, Cr y Hg son relevantes debido su persistencia y toxicidad [3]. La contaminación del agua en el mundo pone a la salud de la persona en un riesgo inclemente, de acuerdo con la OMS. Una inquietud es la contaminación del agua por razón de contaminación en niveles elevados de arsénico inorgánico, plomo y cadmio, por la gran repercusión de los mismos en la salud, lo que conlleva a enfermedades cardiovasculares, cáncer y diabetes mellitus [4].

El impacto ambiental generado por los contaminantes sobre los cuerpos hídricos causa un impacto negativo, siendo tratada por métodos convencionales (como coagulación, floculación, sedimentación, etc.) con eficiencias de entre el 30% y 60%. Mientras que, con tratamientos terciarios (como oxidación avanzada, uso de peróxido de hidrógeno, luz UV, entre otros), se logran eficiencias de entre el 80% y 95% [5].

Sin embargo, estas tecnologías que se aplican en la actualidad tienen ciertas limitaciones como los subproductos tóxicos y altos costos de operación [6]. Por ello es de interés creciente estudiar nuevas tecnologías para la depuración de aguas residuales, y lograr incrementar la eficiencia en la eliminación de contaminantes y reducir los costos de operación asociados. Teniendo en cuenta esto, surge como un tratamiento alternativo la biorremediación, que ha presentado un auge de investigación en los últimos años [7].

La biorremediación es un proceso en el que hongos, bacterias, plantas (fitorremediación) o biorreactores de membrana anaeróbicos o aeróbicos se utilizan para tratar y mantener en condiciones naturales un medio ambiente alterado por contaminantes. Por ser un tratamiento biológico se conoce como una técnica amigable con el medio ambiente, eficiente y rentable para mejorar la calidad de los residuos que se generan [8]. La existencia de contaminantes emergentes genera preocupaciones respecto a la salud y la seguridad ambiental. Entre las ventajas de la Biorremediación está la restauración in situ a bajo costo y la ausencia de contaminación secundaria, lo cual es considerado como un atributo para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la acuicultura [9].

En Ecuador se estudió la evaluación de la eficiencia de remoción de mercurio, fosfatos, sulfatos y nitratos del agua residual provenientes de la actividad minera a través de un proceso de fitorremediación mediante el uso de las microalgas *Pleurococcus* sp., *Chlorella* sp. y *Scenedesmus* sp. El género de microalga con el que mayor porcentaje de remoción de mercurio se obtuvo fue *Pleurococcus* con el 86%; mientras que, en la remoción de sulfatos, fosfatos, y nitratos, el consorcio de microalgas alcanzó resultados de remoción de contaminantes mayores al 76%, 93% y 97%, respectivamente [10].

En la biorremediación del arsénico el género *Bacillus* ha demostrado capacidades eficientes debido a sus diversos ciclos bioquímicos y genéticos. Esta especie ha sido objeto de diversas investigaciones debido a su capacidad de biosorción, los mecanismos moleculares que subyacen a su supervivencia y su capacidad para eliminar y desintoxicar metales pesados [11]. Por otro lado, especies como la *Chlorella* sp. y *Geitlerianema* sp. son eficientes en la eliminación de contaminantes como

metales pesados, donde su caracterización molecular reveló que son las más prometedoras para la biorremediación. Lo que asegura que se deberían utilizar consorcios de algas y bacterias para una mejora optimizada, segura y ecológica de la contaminación [12]. En el caso del vanadio autores realizaron una simulación de procesos biológicos y químicos mediante el uso de modelos informáticos, través de modelado bidimensional (2D) y tridimensional (3D) utilizando el software COMSOL 4.4 demostrando que, a mayores incrementos de velocidad y tiempo, el tiempo de conexión entre el microorganismo (*M. hirsuta*) y el metal (Vn) aumentó y condujo a un aumento de la biorremoción por parte del microorganismo [13]. Así mismo, en el país de Pakistán se recogieron muestras de aguas residuales de estanques con efluentes industriales contaminados con cadmio, zinc, cromo y plomo, los cuales fueron biorremediados por células de paramecios.

La capacidad de absorción del Paramecio sp. Fue en el siguiente orden: $Zn^{2+} > Cd^{2+} > Cu^{2+} > Pb^{2+}$. Lo que sugiere seguir realizando proyecciones de investigación a fondo utilizando técnicas moleculares avanzadas [14]. Las ventajas de la inoculación de la bacteria *Staphylococcus lentus*, resistente a metales pesados, en plantas como *Triticum aestivum* y *Helianthus annuus*, dichas bacterias mejoraron los parámetros de crecimiento, niveles de pigmentos de las plantas sometidas a crecimiento en condiciones de estrés por Cr debido a que éstas convierten el cromo hexavalente en la forma trivalente. Por ende, se afirma influencia positiva de los microbios como agentes biorremediadores de Cr en las plantas, proporcionando una mejor salud, junto con un mejor rendimiento de todas las actividades biológicas [15].

En otra investigación se estudió la eficacia de las membranas de micelio secas, para la remediación del plomo Pb^{2+} , a través de la sorción y mineralización por hifas de micelio seco en soluciones acuosas. Los isoterms de sorción revelan una alta eficiencia de eliminación de Pb^{2+} , que supera el 95%. Las pruebas de filtración de flujo cruzado continuo que emplean una membrana de micelio seca demuestran su eficacia como membrana microporosa para la eliminación de Pb^{2+} , alcanzando una eficiencia de remediación del 85-90% en las concentraciones más altas de Pb^{2+} . Estos hallazgos sugieren que las membranas de micelio seco pueden ser una alternativa viable a las membranas sintéticas en la remediación de metales pesados, con posibles aplicaciones ambientales y de tratamiento de agua [16].

En procesos industriales, como la producción de pintura, la minería y las industrias productoras de materias primas, liberan efluentes ricos en metales pesados, como Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} y Cr^{3+} . Para lo cual se estudió la eliminación de estos metales utilizando polvo de raíz de *Moringa oleifera* como adsorbente. Los parámetros óptimos son: tiempo de contacto (90 min); pH (9); dosis de adsorbente (0,6); concentración de iones metálicos (30 mg/L) para Cr y 40 mg L⁻¹ para el resto; y temperatura (50 °C) para Cu y Pb, y 70 °C para Cr y Cd. El adsorbente mostró buenas tendencias adsorptivas hacia los

iones estudiados, y podría aplicarse a escala industrial para la remediación de agua contaminada con metales [17].

Como se puede apreciar hay muchas investigaciones que son necesarias identificar qué enfoques han sido más exitosos y en qué condiciones. Realizar esta investigación ayudara a describir las mejores tecnologías, especialmente relevante para mejorar los procesos de biorremediación o para abordar contaminantes nuevos, identificar las mejores prácticas y los parámetros óptimos para implementar la biorremediación de manera más eficiente. Esto incluye aspectos como la selección de microorganismos, condiciones de temperatura, pH, nutrientes, entre otros.

Ante lo mencionado, se propone responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo contribuye la biorremediación al tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados, y qué beneficios ofrece en términos de sostenibilidad y eficacia?

Asimismo, se plantearon las siguientes preguntas complementarias implementando la estructura de PIO (Población, intervención y resultados), las cuales son:

PC1: ¿Cuál es la problemática de la contaminación del agua por metales pesados?

PC2: ¿Qué técnicas de biorremediación se utilizan específicamente para tratar aguas contaminadas con metales pesados?

PC3: ¿Cuáles son los resultados, bajo el enfoque sostenible, de la biorremediación de metales pesados en aguas contaminadas?

Por tanto, esta nueva RSL contribuirá a recopilar más información sobre la aplicación de la Biorremediación en el tratamiento de agua para la remoción de metales pesados. Es así que, el objetivo principal de esta RSL es Determinar la influencia de la Biorremediación en el tratamiento de agua para la remoción de metales pesados a través del análisis de datos obtenidos en artículos de Web of Science entre el 2015 al 2025. Asimismo, se manejaron objetivos específicos tales como: recopilar datos sobre la relación entre autores, países y palabras claves de las investigaciones, ordenar según la frecuencia en el uso de palabras, identificar el país de origen de los artículos, verificar los años de publicación, clasificar los estudios en base a su argumento según el objetivo principal de la RSL como con la problemática, impacto y las técnicas de biorremediación.

II. METODOLOGÍA

El escrito actual se desarrolló desde la perspectiva de una Revisión Sistemática de Literatura (RSL), metodología que comprende una evaluación exhaustiva, sistemática y explícita de la literatura [18] referente a la técnica de la biorremediación, que buscó responder a la interrogante de la contribución de esta técnica biológica en el tratamiento de agua para la remoción de metales pesados.

La elaboración de la RSL siguió un proceso de desarrollo estructurado que inició con el planteamiento de la pregunta especificada, con los cuales se realizó la búsqueda en la base de dato. Una vez obtenida la información se seleccionó los artículos y se obtuvo los datos, realizando un análisis crítico de la

información, difundándose los resultados del trabajo [19, 20].

El procedimiento de búsqueda para acceder a la información se llevó a cabo en la base de datos Web of Science, cuyo alcance abarca un basamento científico y tecnológico portados en documentos publicados desde el 2015 hasta el año en curso, siendo un periodo de 11 años, considerándose las variables en estudio: “biorremediación”, “tratamiento de agua” y “metales pesados”, que son palabras clave específicas.

En la metodología de la RSL, se aplicó el método PRISMA considerando la guía de DECLARACIÓN PRISMA 2020, como una herramienta que aporta a mejorar la claridad y la transparencia en la publicación de revisiones sistemáticas [21] cuya finalidad es que los datos recopilados sigan una estructura en común, con un contenido valioso y accesible para el estudio profundo de los resultados [22].

Aplicando la herramienta PRISMA 2020 se identificaron los estudios en la base de datos Web of Science, utilizando las variables de estudio “biorremediación”, “tratamiento de agua” y “metales pesados”, recuperándose 181 artículos.

Para la búsqueda en la base de datos se usó los operadores booleanos (AND) y se dispuso de la siguiente ecuación inicial de búsqueda: "bioremediation" AND "water treatment" AND "heavy metals", quedando al final, 27 artículos que cumplieron con los parámetros de inclusión y exclusión y la temática, establecida, determinándose la siguiente cadena de búsqueda final que se especifica en la Tabla I.

TABLA I
CADENA DE BÚSQUEDA FINAL DE LA BASE DE DATOS WOS

Bases de Datos	Cadena final
WOS	(ALL=("BIOREMEDIATION" AND "WATER TREATMENT" AND "HEAVY METALS")) AND ((PY=("2025" OR "2024" OR "2023" OR "2022" OR "2021" OR "2020" OR "2019" OR "2018" OR "2017" OR "2016" OR "2015") AND DT=("ARTICLE") AND LA=("ENGLISH") AND OAJ=("ALL OPEN ACCESS")) NOT (DX2NG=("21838287") OR DX2NG=("36593757") OR AU=("ZAKARIA Z") OR AU=("REFAAY DA") OR AU=("AL-KINDI S") OR AU=("PRIETO-FERNÁNDEZ F") OR AU=("O'KELLY BC") OR AU=("ABDELAZEEM R") OR AU=("PETRILLI R") OR AU=("HU SB") OR AU=("FU HY") OR AU=("TERRERO MA") OR AU=("KUMAR V") OR AU=("BEN SLAMA H") OR AU=("RADZIFF SBM") OR AU=("EL-NAGGAR NEA") OR AU=("FRANKEL ML") OR AU=("WIENER EA")))

Para el proceso de cribado, utilizamos diferentes criterios de elegibilidad propuestas por los autores de la investigación con el fin de asegurar la estandarización de los estudios incluidos en la revisión. Es importante destacar que no todos los criterios de exclusión resultaron en la eliminación de estudios, por lo que al elaborar el diagrama PRISMA, no todos los criterios presentan un número de artículos excluidos. Los detalles de los criterios se encuentran en la Tabla II.

TABLA II
PARÁMETROS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

CÓDIGO	CRITERIO
CI1	Documentos con las palabras claves Biorremediación, tratamiento de agua y metales pesados.
CI2	Documentos que contienen una o más variables de la investigación.
CE1	Documentos que estén fuera del rango entre los años 2015-2025.
CE2	Documentos que no estén en el idioma inglés.
CE3	Documentos que no presenten acceso abierto.
CE4	Documentos que no se encuentren en la categoría de artículo.
CE5	Documentos que no estén en la temática de tratamiento de agua por biorremediación.

La búsqueda completa se detalla en el siguiente flujograma de PRISMA, el cual se ve en la Fig. 1.

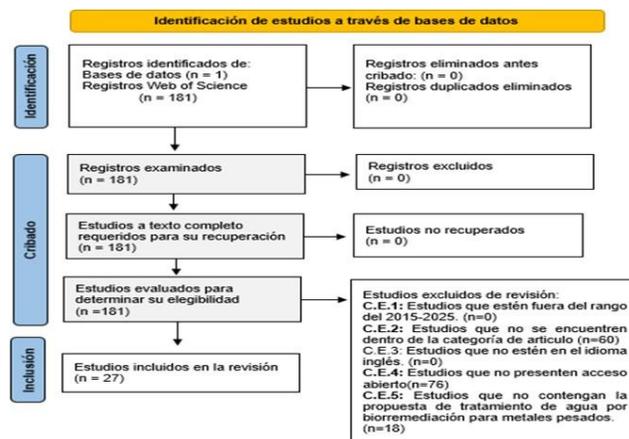


Fig. 1. Diagrama de flujo de PRISMA para la identificación de registros.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resultados Bibliometricos

En la Fig. 2, se muestra la distribución de redes de interconexión que forman 16 clústeres en general de palabras claves, por año de publicación, del periodo 2016-2024, donde la mayor incidencia son las palabras biorremediación, metales pesados, adsorción, biodegradación, microalga, tratamiento de agua, solución acuosa, lodo activado, bacillus acidophilus, nitrógeno, remediación, eliminación, cobre, todos ellos en el año 2019, las cuales se interconectan ya que son términos que encontramos de manera repetida en investigaciones, desde el año 2024 al 2025 la palabra que más se repite es absorbente, agua, pseudomonas, E coli, tratamiento biológico de agua y Anova.

Así mismo todo ello, resuelve que las palabras que mayormente se relacionan en esta RSL son biorremediación, tratamiento de agua y metales pesados, los que permiten la apertura a la búsqueda de información de relevancia, que optimice el tiempo de investigación.

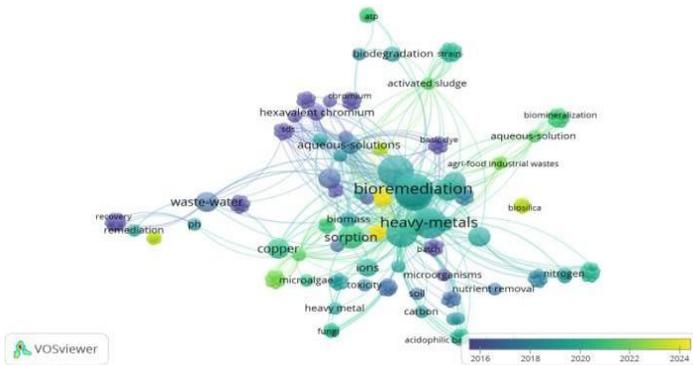


Fig. 2. Diagrama de redes de investigaciones referente al año de publicación.

En la Fig. 3, podemos apreciar que la mayor cantidad de artículos producidos en la línea de biorremediación para tratamiento de agua está entre los años 2015-2016 y el 2020 con 4 artículos, en cada año.



Fig. 3. Producción científica en los años 2015-2025.

De la Fig. 4, se observa el número de artículos que tienen sólo una publicación por revista, como es en el caso de la revista Ciencias aplicadas, Fronteras de Microbiología, Diario de Materiales Peligrosos, Geoquímica Ambiental y Salud, etc.; mientras que la Revista Desalinización y tratamiento de agua, tiene 9 artículos, siendo la mayor cantidad de publicaciones realizadas que hacen un 33% del total encontrado en la base de datos de la Web of Science, en la línea de Biorremediación como tratamiento de agua en los últimos 10 años, seguido de la revista Agua que tiene 4 artículos indexados.

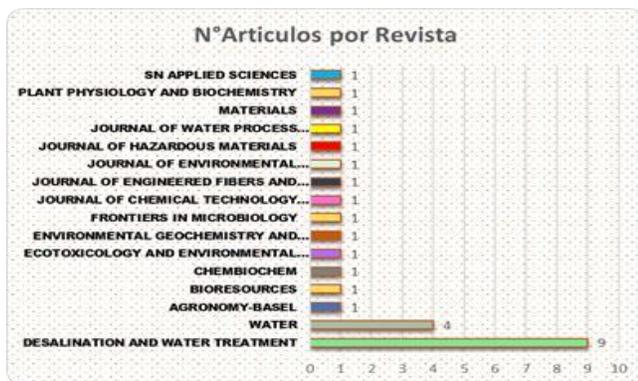


Fig. 4. Cantidad de Artículos indexados por revista.

El diagrama Three field plot presenta la asociación de tres campos diferentes que relaciona a los autores (AU) con las palabras claves usadas (DE), y el país de procedencia (AU_CO) de dicha investigación. Por ejemplo, la palabra clave más utilizada es “bioremediation” siendo China y Italia los países con mayor índice de frecuencia en utilizar dicho término. Asimismo, dichos autores “mukherjee k” y “nandi r” son los que mayor han empleado la palabra clave. También, se destaca la palabra “heavy metal” como relevante en la técnica de Biorremediación para el tratamiento de agua.

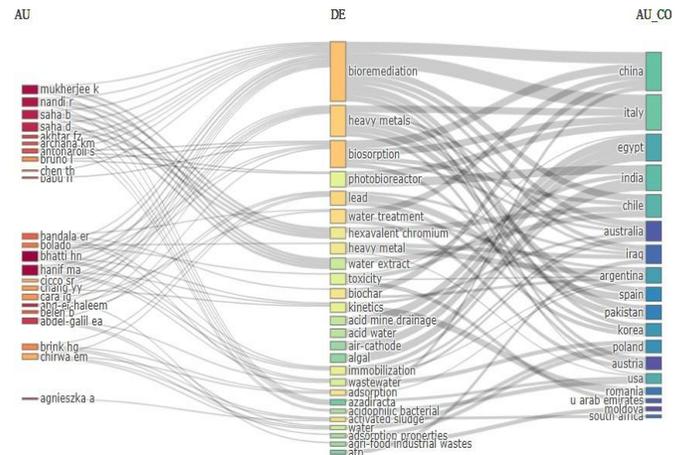


Fig. 5. Diagrama de relación de tres campos entre los autores, palabras claves y países productores de los artículos.

De la figura 6 vista, se describe la distribución de publicación de artículos en el mundo, en la línea de biorremediación como técnica biológica de tratamiento de agua, la cual se ve una mayor reproducción en los países de Italia con un 21%, China con 15%, y la India con el 10%, en Latinoamérica países como USA con 7%, Chile con 7% y Argentina con 5% en Europa países como Italia, España, Polonia, Rumania y en Asia, Iraq, China, Corea del Sur, Pakistán, la India.

Esto se interpreta que en el continente Asiático se ha realizó más investigaciones de Biorremediación para tratamiento de agua, seguido de Europa, Latinoamérica y África.

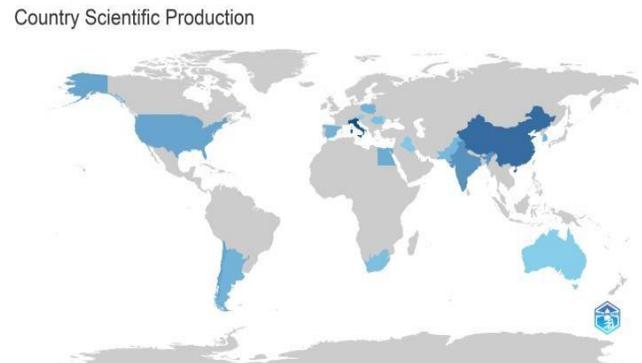


Fig. 6. Mapa de continentes con publicaciones Científicas.

B. Resultados de Contenido

En este apartado se mostró como parte de la problemática, los metales pesados en estudio por artículo, siendo los metales de mayor incidencia de contaminación en el agua, el plomo, el cobre, el zinc y el cromo hexavalente, por vertidos a nivel de industrial y transporte por segregación en residuos a nivel urbano.

TABLA III
METALES PESADOS CONTAMINANTES DE AGUA, SEGÚN INVESTIGACIONES EN ESTUDIO, ENTRE LOS AÑOS DEL 2015 - 2025

Metales Pesados y otros contaminantes	Artículos
Plomo (Pb)	[23], [24], [25],[32],[34],[35] [38],[44], [47]
Mercurio (Hg)	[23]
Cobalto (Co)	[24][40]
Cobre (Cu)	[25], [26],[30],[32],[33] [38],[41],[44], [45]
Manganeso (Mn)	[26]
Zinc (Zn)	[26],[29], [32], [37], [33], [38], [44]
Arsénico (As)	[26],[38]
Cromo (C ⁺³)	[25],[27]
Cromo (Cr ⁺⁶)	[25],[27],[37],[43],[46]
Cromo (Cr)	[29], [38]
Hierro (Fe)	[30]
Cadmio (Cd)	[30],[32],[40]
Estaño (Sn)	[37],[38]
Circonio (Zr) ⁺⁴	[31]
Antimonio (Sb)	[38]
Níquel (Ni)	[45]
Fósforo (P)	[45]
Compuestos fenólicos (aromáticos)	[43],[48]
Agua residual, contaminantes químicos y sólidos industriales	[28],[36],[39],[42]

Comprender el comportamiento de los metales pesados en el agua y cambiar su estado inestable a estable es reducirlo en un entorno controlado, que lo haga menos tóxico y este dentro de los niveles permisibles para la protección de la salud humana y el medio ambiente.

La biorremediación, al ser una técnica natural y eficiente, es una excelente opción para tratar el agua industrial o residual contaminada, permitiendo una solución ecológica, económica y sostenible a los problemas de contaminación por metales pesados. Las técnicas mencionadas línea abajo en la tabla 4 contribuyen a la depuración del agua por metales pesados, al utilizar organismos biológicos como bacterias, plantas, extractos vegetales y nanopartículas para reducir, transformar o adsorber los metales tóxicos. En términos de sostenibilidad, utiliza procesos naturales sin el uso de productos químicos peligrosos. Esta técnica puede ser muy efectiva si se combina con aditivos que aumenten su tasa de éxito, o si se aplican

métodos específicos para mejorar los procesos o tratar contaminantes emergentes, como es el caso de las nanopartículas. Todo ello implica identificar las mejores prácticas y los parámetros ideales para implementarlos de manera segura, como la elección de microorganismos adecuados, las condiciones de temperatura, pH, nutrientes y otros factores.

TABLA IV
RECURSOS Y TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN

Técnicas de Biorremediación	Artículos
Biomíneralización	[23],[44]
Biosorción	[24],[25], [26],[27],[28],[29],[30], [31], [32],[33],[36],[37],[38],[39], [40],[42],[43],[45],[46], [47]
Biosorción-Nanopartículas	[42]
Fitorremediación	[34],[35]
Remediación Nanopartículas	[41]
Bioaumentación	[48]
Biodegradación	[49]
Recursos para biorremediación	Artículos
Levaduras	[23],[25]
Hongos	[40],[42]
Bacterias	[30],[31],[36],[43],[47],[48],[49]
Algas Marinas /Microalgas	[26],[28],[32],[33],[38],[45],[46]
Microalgas y nanopartículas	[39]
Plantas	[24],[34],[35],[37],
Bacteria con Nanopartículas	[29]
Extracto acuoso aserrín	[27]
Biomaterial sintético y nanopartículas	[41],
Células de combustible microbiana	[44]

TABLA V
RECURSOS Y TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN

Influencia de la Biorremediación	Art.
Proceso ecológico que inmoviliza metales pesados en formas estables, y disminuye la dureza del agua. Remoción de Pb ²⁺ en 42-60 horas y de Hg ²⁺ en 90-102 horas, se redujo en más del 95% la concentración de Ca ²⁺ .	[23]
Remoción eficiente, eficaz y sostenible, por la máxima de biosorción que fue de 19.61 mg/g para Pb ²⁺ y 43.48 mg/g para Co ²⁺ con el uso de la planta LPJ	[24]
Remediación de los iones de metales pesados a través de hongos, en aguas residuales de industria textil según orden de prioridad: Cr ⁺³ > Pb ²⁺ > Cr ⁺⁶ > Cu ²⁺ .	[25]
Eliminación con microalgas de hasta un 32,4% de arsénico y otros metales como Cu, Mn y Zn, con eficiencias variables según condiciones ambientales. La presencia de materia orgánica y CO ₂ afectan la eficiencia del proceso.	[26]
Proceso viable con uso de aserrín, para remoción de metales pesados sin generación de residuos tóxicos. Optimización del proceso con surfactantes.	[27]
Con el crecimiento algal en un 53% en el concentrado de coque se logró la eliminación de nitrógeno y fósforo hasta el 26,1% y 68,5%. alcanzando eficiencias de eliminación de metales pesados, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y nutrientes.	[28]
La remoción de metales mediante un nanocompuesto de CuI con cultivos bacterianos acidófilos es una alternativa más sostenible, con	[29]

una eficiencia del 67% para Cr y 55% para Zn, presenta ventajas ambientales significativas.	
Bacterias adsorben y eliminan metales como Fe, Cu y Cd de soluciones acuosas. Es un método ecológico, que utiliza microorganismos naturales y no genera subproductos tóxicos. Alcanzan eficiencias de eliminación del 76,2% para Fe, 67,3% para Cu y 62,6% para Cd.	[30]
Se muestra la capacidad máxima de adsorción con 186,5 mg/g de concentración inicial de Zr^{+4} de 200 mg/l. esta es una contribución valiosa a la lista de biomateriales con alta capacidad de eficiencia.	[31]
Se logran eficiencias de eliminación de Cu, Zn, Pb y Cd de 76,3%, 95,6%, 100% y 91,2% con bacterias reductoras. Modificación de metales pesados en fases más estables. La tecnología mostró alta eficiencia, un proceso sostenible y económico.	[32]
Eliminación de contaminantes de manera eficaz. La eliminación de zinc (Zn^{2+}) y cobre (Cu^{2+}) fue del 74.4% y 81.0%, respectivamente, siendo un proceso sostenible.	[33]
Excelente biosorbente el orujo de uva para la remoción de Pb^{2+} de aguas contaminadas. Este enfoque promete ser una solución eficaz para la descontaminación de aguas.	[34]
Alta capacidad de adaptación y crecimiento de la planta acuática, siendo una opción viable y económica para la fitorremediación. Los mecanismos de eliminación de Pb^{2+} incluyen adsorción en la superficie de la planta, con menor acumulación interna.	[35]
La combinación de nanopartículas de óxido de hierro (Fe_3O_4), biochar y bacterias fotosintéticas (PSB) presenta una alternativa eficaz y sostenible. Este sistema se destaca por su capacidad de reciclaje, lo que lo convierte en una opción rentable y ecológica, esto lo posiciona como una solución prometedora de manera eficiente y ecoamigable.	[36]
El uso de extractos de plantas (como el de la flor de Sajina) junto con tensioactivos como el SDS puede aumentar significativamente la tasa de eliminación del cromo hexavalente en aguas residuales. Esto hace que el proceso de biorremediación sea eficiente, lo que es una alternativa ecológica.	[37]
Las diatomeas (un tipo de microalga) elimina contaminantes del agua de forma más eficiente, se cultivan en una biopelícula sobre una superficie de vidrio, donde se quedan adheridas de forma estable por la interacción química entre las diatomeas y el material del sustrato. Este enfoque es efectivo, ecológico y sostenible.	[38]
La combinación de microalgas muertas (<i>C. vulgaris</i>) y nanopartículas de TiO_2 es una tecnología eficaz que mejora la capacidad de adsorción de metales pesados y aumenta la descomposición de contaminantes usando luz. Esto propone un enfoque innovador y sostenible, ecológico y económico.	[39]
El hongo <i>Fusarium solani</i> , cuando se trata con radiación gamma, tiene un gran potencial para eliminar cobalto y cadmio de aguas contaminadas. Es una opción de ecológica y rentable. Este tipo de enfoque no produce residuos peligrosos y es una solución más natural	[40]
Las nanopartículas de óxidos de hierro superparamagnéticos encapsuladas en polidopamina permiten la remoción de iones de Cu^{2+} , en aguas contaminadas. Demostrando ser una alternativa viable, sostenible y ecológica.	[41]
Las nanofibras biohíbridas de hongos formadores de óxidos de manganeso mejoran la capacidad de adsorción por ser un tratamiento eficiente. Siendo sostenible debido a que utiliza recursos biológicos naturales.	[42]
La cepa <i>Pseudomonas</i> sp. JF122 muestra una alta efectividad en la reducción de Cr^{+6} a Cr^{+3} , así como biodegrada el fenol siendo un proceso sostenible, ya que no produce subproductos tóxicos, empleando un microorganismo natural, haciéndolo más económico	[43]
La microalga <i>Desmodesmus</i> sp. fue altamente eficaz en la remoción de metales pesados y fósforo del agua, logrando una significativa reducción de la contaminación. Este proceso es sostenible porque produce lípidos que pueden utilizarse para la producción de biocombustibles, creando una solución amigable con el medio ambiente y rentable.	[44]
La biomasa de <i>Spirulina platensis</i> modificada químicamente es una estrategia eficiente y ecológica para la remoción de Cr^{+6} . Esto	[45]

proporciona una solución sostenible y asequible para el tratamiento de aguas contaminadas, destacándose por su habilidad para adsorber grandes cantidades de contaminantes sin generar desechos peligrosos.	
Los cultivos bacterianos con metabolismo inhibido, constituye una opción eficiente y sostenible para tratar aguas contaminadas con metales pesados, como el plomo (Pb^{2+}). Esto presenta una alternativa ecológica, económica y efectiva en comparación con los métodos convencionales de tratamiento.	[46]
Las bacterias de <i>Pseudomonas putida</i> presentaron la mayor capacidad para descomponer contaminantes tóxicos como fenol, catecol y cresoles, y son resistentes a la toxicidad del lixiviado (líquido contaminado). Son eficaces en el tratamiento de estos contaminantes.	[47]
Los biopreparados bacterianos para eliminar contaminantes del agua en un estanque altamente contaminado esto es muy efectivo para limpiar el agua rápidamente y degradar los contaminantes, incluso en concentraciones altas. Este enfoque muestra el potencial de los biopreparados como una opción ecológica para tratar aguas contaminadas industrialmente.	[48]
Las tecnologías MFC pueden ser una opción útil y económica para tratar el drenaje ácido de minas (AMD). Al neutralizar el pH, se podría reducir la toxicidad del agua. El uso de MFC podría ser más barato que las tecnologías convencionales en aguas ácidas. Esto podría ayudar a recuperar metales pesados del agua a través de procesos de precipitación o adsorción, lo que añadiría un beneficio extra al proceso de remediación.	[49]

Las técnicas de biorremediación son métodos sustentables y eficientes para eliminar metales pesados de aguas contaminadas. La biomasa vegetal LJFP (*Lonicera japonica* flower) presentó una capacidad máxima de biosorción de 19.61 mg/g para Pb^{2+} y 43.48 mg/g para Co^{2+} , lo que demuestra buenos resultados por su bajo costo y alta capacidad de adsorción. El uso de materiales naturales y reutilizables hace que esta tecnología sea más viable en comparación con otros métodos químicos convencionales [24].

Con los hongos, como *Agaricus bitorquis*, se logró la remediación efectiva de metales como Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} y Cr^{6+} tanto en soluciones sintéticas como en efluentes reales. Se identificó que factores como el pH, la concentración inicial de los iones metálicos y el tiempo de contacto influyen significativamente. Esto sugiere que el uso de hongos de pudrición blanca inmovilizados es otra estrategia prometedora debido a su capacidad de remoción en distintos tipos de vertidos líquidos [25]. En tanto, con las bacterias Gram- negativas como *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli*, se realizaron estudios cinéticos e isotérmicos para evaluar la eficiencia del proceso, empleando modelos matemáticos como los de Langmuir y Redlich-Peterson. Utilizando células bacterianas vivas y muertas para comparar su capacidad de adsorción, encontrando que las células vivas tenían un mayor rendimiento. Estos microorganismos tienen una alta capacidad de adsorción, con eficiencias de eliminación del 76,2% para Fe, 67,3% para Cu y 62,6% para Cd, demostrando su productividad [30]. En un estudio se usó el alcohol polivinílico (PVA) y bacterias reductoras de sulfato inmovilizadas (SRB) en perlas, para la biorremediación de metales pesados, cuya eficiencia de eliminación de Cu, Zn, Pb y Cd fueron del 76,3 %, 95,6 %, 100 % y 91,2 %, respectivamente [32]. De los experimentos se mostraron que la SRB tiene un mayor rendimiento de biosorción respecto a las otras biomasa vegetales y microbianas.

Por otro lado, otras de las técnicas es la fitorremediación, que recurre a plantas y residuos agroindustriales, como el orujo de uva. Alcanzando una descontaminación de hasta el 97% de Pb a pH 5.5. Esto demuestra lo viable de utilizar residuos agroalimentarios, ofreciendo una alternativa ecológica y económica para tratar este tipo de contaminantes [34]. Finalmente se aprovecha las propiedades de las nanopartículas de óxido de hierro encapsuladas en polidopamina para tratar iones Cu^{2+} . El estudio de la isoterma de Langmuir mostró una capacidad máxima de adsorción a temperatura ambiente de 16,7 mg/g, destacando el potencial de las nanopartículas, siendo una opción innovadora por su alta capacidad adsorbente en matrices acuosas [41].

Las limitaciones de este estudio incluyen la duración del proceso, donde la técnica de biorremediación puede ser lenta según las condiciones de adaptación, en comparación con procedimientos químicos convencionales, debido a que la eficiencia de la biomasa con microorganismos o materia biológica adsorbentes puede estar influenciado por factores como pH, temperatura y concentración de sustancias tóxicas. En la aplicación de nanopartículas o microorganismos optimizados puede estar limitado a normas y tener un impacto ecológico negativo.

A nivel piloto u experimental, los resultados de difieren cuando se trabaja a gran escala, ya que puede presentar complicaciones en la parte técnica y económica.

IV. CONCLUSIONES

Los metales como el plomo, mercurio, cadmio, arsénico, cromo, zinc, y otros tipos de contaminantes, según su naturaleza, ingresan a cuerpos de agua a través de fuentes naturales y actividades humanas como la minería, la industria, la agricultura y la segregación inadecuada de desechos. La contaminación por metales pesados en el agua representa una amenaza grave para la salud humana, la vida acuática y los ecosistemas en general, y requiere soluciones efectivas para mitigar su impacto. La implementación de tecnología de tratamiento junto con políticas estrictas de regulación y educación ambiental es clave para reducir los impactos negativos en la salud y el ecosistema.

Las técnicas de Biorremediación más eficaces son la biosorción y la fitorremediación la primera por su bajo costo, comparada con otros métodos de remediación, se ha comprobado según los estudios citados, es económica, ya que emplea materiales biológicos como residuos agrícolas, algas, hongos, bacterias o biomasa de plantas que son fácilmente disponibles o desechados de otras industrias. Así las paredes celulares de algunos microorganismos o plantas tienen una gran capacidad para capturar y concentrar contaminantes, especialmente metales pesados como el plomo, el mercurio, el cobre o el cadmio. Al ser un proceso natural, no genera productos tóxicos adicionales y es respetuosa con el medio ambiente. Además, puede utilizar residuos orgánicos, contribuyendo al reciclaje y la reducción de desechos.

El impacto de la biorremediación en el tratamiento de agua contaminada por metales pesados es relevante, permitiendo la eliminación de estos contaminantes de manera eficiente con porcentajes de remoción de, Cu, Zn, Pb y Cd que es de 76,3%, 95,6%, 100% y 91,2%, mejorando la calidad del recurso hídrico, para su reutilización o descarga segura en el ecosistema. Además, el uso de biomasa vegetal, hongos, bacterias y nanopartículas, minimizan los costos operativos en comparación con métodos tradicionales como la precipitación química o la filtración por membranas, por ende, con avances de la biotecnología se puede optimizar dichos métodos mejorando su productividad para aplicarlo a nivel industrial y urbano.

Se sugiere, que la aplicación de la biorremediación no solo se limite para aguas contaminadas, sino también su uso es para tratamiento de suelos, lodos y otros tipos de desechos debido a su eficacia en la eliminación de una amplia gama de contaminantes, desde metales pesados hasta compuestos orgánicos.

REFERENCIAS

- [1] Y. Nieves, N. Parra, S. Villanueva, and M. Henríquez, *Tech note: bioremediation, enemy of cadmium*, vol. 26. Venezuela, 2019. Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70758484010>
- [2] Y. Tang *et al.*, "Emerging pollutants in water environment: Occurrence, monitoring, fate, and risk assessment," *Water Environment Research*, vol. 91, no. 10, pp. 984–991, Oct. 2019, doi: 10.1002/WER.1163.
- [3] M. E. Beltrán-Pineda and A. M. Gómez-Rodríguez, "Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión," *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 12, no. 2, pp. 172–197, Jul. 2016, doi: 10.18359/RFCB.2027.
- [4] J. Fernando Larios Meoño Carlos González Taranco Yennyfer Morales Olivares, "Las Aguas residuales y sus consecuencias en el Perú", *Revista de la Facultad de Ingeniería de la USIL*, Vol. 2, N° 2. Segundo semestre 2015. pp. 09-25
- [5] H. A. Milquez Sanabria and J. C. Montagut, "Impacto de los contaminantes emergentes en el entorno acuático y los tratamientos para el control y remoción en los cuerpos hídricos. Revisión literaria.," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 25, no. 3, Sep. 2023, doi: 10.25100/iyc.v25i3.12551.
- [6] A. Shah and M. Shah, "Characterisation and bioremediation of wastewater: A review exploring bioremediation as a sustainable technique for pharmaceutical wastewater," *Groundw Sustain Dev*, vol. 11, p. 100383, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.GSD.2020.100383.
- [7] "Vista de Biorremediación en Aguas Residuales Acuícolas_ Una Revisión".
- [8] A. Milena *et al.*, "Biorremediación en Aguas Residuales Acuícolas: Una Revisión," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 4, pp. 8538–8568, Sep. 2023, doi: 10.37811/CL_RCM.V7I4.7577.
- [9] D. Dong, H. Sun, Z. Qi, and X. Liu, "Improving microbial bioremediation efficiency of intensive aquacultural wastewater based on bacterial pollutant metabolism kinetics analysis," *Chemosphere*, vol. 265, p. 129151, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.129151.
- [10] N. Vela-García, M. C. Guamán-Burneo, and N. P. González-Romero, "Efficient bioremediation from metallurgical effluents through the use of microalgae isolated from the amazonic and highlands of Ecuador," *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 35, no. 4, pp. 917–929, 2019, doi: 10.20937/RICA.2019.35.04.11.
- [11] S. Bhowmik, S. C. Prajapati, S. Kumar, K. Priyanka, and R. Saxena, "Bioremediation of Arsenic metal from water and soil by Bacillus species-A review," *Journal of Integrated Science and Technology*, vol.

- 13, no. 2, p. 1038, Sep. 2025, doi: 10.62110/sciencein.jst.2025.v13.1038.
- [12] F. Altammar, N. El Semaary, and M. Aldayel, "The Use of Some Species of Bacteria and Algae in the Bioremediation of Pollution Caused by Hydrocarbons and Some Heavy Metals in Al Asfar Lake Water," *Sustainability*, vol. 16, no. 18, p. 7896, Sep. 2024, doi: 10.3390/SU16187896.
- [13] F. Samaei, F. Yazdian, F. Mena, and A. Hatamian-Zarmi, "Bioremediation of Vanadium from Contaminated Water in Bioreactor Using *Methylocystis hirsuta* Bacterium: Comparisons with In Silico 2D and 3D Simulations," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/su14148807.
- [14] I. Zahra *et al.*, "Bioremediation of heavy metals using a novel species of ciliate *Paramecium multimicronucleatum* isolated from industrial wastewater," *Mater Res Express*, vol. 10, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.1088/2053-1591/acc159.
- [15] N. Jamil *et al.*, "Evaluation of the Bioremediation Potential of *Staphylococcus lentus* Inoculations of Plants as a Promising Strategy Used to Attenuate Chromium Toxicity," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 20, Oct. 2022, doi: 10.3390/su142013056.
- [16] M. S. Parasnis *et al.*, "Heavy Metal Remediation by Dry Mycelium Membranes: Approaches to Sustainable Lead Remediation in Water," *Langmuir*, vol. 40, no. 12, pp. 6317–6329, Mar. 2024, doi: 10.1021/ACS.LANGMUIR.3C03811/SUPPL_FILE/LA3C03811_SI_00_2.XLSX.
- [17] B. C. Mbaeze, N. R. Ekere, C. S. Chukwu, O. K. Ominyi, and J. N. Ihechiora, "Harnessing *Moringa oleifera* root powder (MORP) for the sustainable remediation of heavy metal contaminated water," *Int J Phytoremediation*, 2025, doi: 10.1080/15226514.2024.2405627.
- [18] H. A. García-Perdomo, "Conceptos fundamentales de las revisiones sistemáticas/metaanálisis," *Urología Colombiana*, vol. 24, no. 1, pp. 28–34, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.UROCO.2015.03.005.
- [19] B. Moreno, M. Muñoz, J. Cuellar, S. Domancic, and J. Villanueva, "Revisiones Sistemáticas: definición y nociones básicas," *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*, vol. 11, no. 3, pp. 184–186, Dec. 2018, doi: 10.4067/s0719-01072018000300184.
- [20] L. M. Letelier, J. J. Manríquez, and G. Rada, "MEDICINA BASADA EN EVIDENCIA Revisiones sistemáticas y metaanálisis: ¿son la mejor evidencia?," *Revista médica de Chile*, 133 (2), 246-249, doi: 10.4067/S0034-98872005000200015
- [21] A. Ciapponi, "La declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para reportar revisiones sistemáticas," *Evidencia - actualización en la práctica ambulatoria*, vol. 24, no. 3, pp. e002139–e002139, Aug. 2021, doi: 10.51987/EVIDENCIA.V24I4.6960.
- [22] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," Mar. 29, 2021, BMJ Publishing Group, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [23] M. Eltarahony, A. Kamal, sahar zaki, and D. Abdelhaleem, "Heavy Metals Bioremediation and Water Softening Using Ureolytic *Metschnikowia Pulcherrima* and *Raoultella Planticola* Strains," Mar. 03, 2021, doi: 10.21203/rs.3.rs-233360/v1.
- [24] L. P. Lingamdinne, J. R. Koduru, R. K. Jyothi, Y. Y. Chang, and J. K. Yang, "Factors affect on bioremediation of Co(II) and Pb(II) onto *Lonicera japonica* flowers powder," *Desalination Water Treat*, vol. 57, no. 28, pp. 13066–13080, Jun. 2016, doi: 10.1080/19443994.2015.1055813.
- [25] M. A. Hanif and H. N. Bhatti, "Remediation of heavy metals using easily cultivable, fast growing, and highly accumulating white rot fungi from hazardous aqueous streams," *Desalination Water Treat*, vol. 53, no. 1, pp. 238–248, 2015, doi: 10.1080/19443994.2013.848413.
- [26] Silvia, "Bioremediation potential Heavy metals Organic Matter concentration CO2 supply HM Bioremediation by microalgae HCl 0.1 M Recovery CO2 supply Organic Matter Influence."
- [27] K. Mukherjee, R. Nandi, D. Saha, and B. Saha, "Surfactant-assisted bioremediation of hexavalent chromium from contaminated water," *Desalination Water Treat*, vol. 53, no. 3, pp. 746–751, 2015, doi: 10.1080/19443994.2013.842503.
- [28] W. Gu y G. Wang, «Absorptive process and biological activity of *Ulva prolifera* and algal bioremediation of coking effluent», *BioResources*, vol. 15, n.o 2, pp. 2605-2620, feb. 2020, doi: 10.15376/biores.15.2.2605-2620.
- [29] F. Z. Akhtar, K. M. Archana, V. G. Krishnaswamy, and R. Rajagopal, "Remediation of heavy metals (Cr, Zn) using physical, chemical and biological methods: a novel approach," *SN Appl Sci*, vol. 2, no. 2, 2020, doi: 10.1007/s42452-019-1918-x.
- [30] F. M. Mohammed and R. A. H. Nayyef, "Capacity of locally isolated bacterial species for sequestration of Cd, Cu and Fe from aqueous solutions," *Desalination Water Treat*, vol. 319, 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100540.
- [31] A. Hanif, H. N. Bhatti, and M. A. Hanif, "Removal of zirconium from aqueous solution by *Ganoderma lucidum*: biosorption and bioremediation studies," *Desalination Water Treat*, vol. 53, no. 1, pp. 195–205, Jan. 2015, doi: 10.1080/19443994.2013.837005.
- [32] X. Li *et al.*, "Enhanced biological stabilization of heavy metals in sediment using immobilized sulfate reducing bacteria beads with inner cohesive nutrient," *J Hazard Mater*, vol. 324, pp. 340–347, 2017, doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.10.067.
- [33] Q. Guo, E. R. Bandala, A. Goonetilleke, N. Hong, Y. Li, and A. Liu, "Application of *Chlorella pyrenoidosa* embedded biochar beads for water treatment," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 40, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101892.
- [34] G. Ungureanu, A. Patras, I. G. Cara, R. Sturza, and A. Ghendov- Mosanu, "Innovative Recovery of Winemaking Waste for Effective Lead Removal from Wastewater," *AGRONOMY-BASEL*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/agronomy12030604.
- [35] W. T. Zevallos, L. M. Salvatierra, D. B. Loureiro, J. Morató, and L. M. Pérez, "Evaluation of the autochthonous free-floating macrophyte *salvinia biloba* raddi for use in the phytoremediation of water contaminated with lead," *Desalination Water Treat*, vol. 103, pp. 282–289, Jan. 2018, doi: 10.5004/dwt.2018.21709.
- [36] S. Y. He, L. G. Zhong, J. J. Duan, Y. F. Feng, B. Yang, and L. Z. Yang, "Bioremediation of Wastewater by Iron Oxide-Biochar Nanocomposites Loaded with Photosynthetic Bacteria," *Front Microbiol*, vol. 8, 2017, doi: 10.3389/fmicb.2017.00823.
- [37] K. Mukherjee, R. Nandi, D. Saha, and B. Saha, "Surfactant-assisted enhancement of bioremediation rate for hexavalent chromium by water extract of *Sajina (Moringa oleifera)* flower," *Desalination Water Treat*, vol. 54, no. 2, pp. 525–532, Apr. 2015, doi: 10.1080/19443994.2014.884477.
- [38] D. Vona *et al.*, "Boronic Acid Moieties Stabilize Adhesion of Microalgal Biofilms on Glassy Substrates: A Chemical Tool for Environmental Applications," *CHEMBIOCHEM*, 2023, doi: 10.1002/cbic.202300284.
- [39] M. Blosi, A. Briigliadori, I. Zanoni, S. Ortelli, S. Albonetti, and A. L. Costa, "Chlorella vulgaris meets TiO2 NPs: Effective sorbent/photocatalytic hybrid materials for water treatment application," *J Environ Manage*, vol. 304, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114187.
- [40] A. M. Mousa, E. Abdel-Galil, and M. Zhran, "Biosorption performance toward Co(II) and Cd(II) by irradiated *Fusarium solani* biomass," Oct. 04, 2023, doi: 10.21203/rs.3.rs-3335056/v1.
- [41] G. Siciliano *et al.*, "Synthesis and Characterization of SPIONs Encapsulating Polydopamine Nanoparticles and Their Test for Aqueous Cu²⁺ Ion Removal," *Materials*, vol. 16, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/ma16041697.
- [42] Y. Park *et al.*, "Biohybrid nanofibers containing manganese oxide-forming fungi for heavy metal removal from water," *J Eng Fiber Fabr*, vol. 15, 2020, doi: 10.1177/1558925019898954.
- [43] B. J. Zhou and T. H. Chen, "Biodegradation of phenol with chromium (VI) reduction by the *Pseudomonas* sp strain JF122," *Desalination Water Treat*, vol. 57, no. 8, pp. 3544–3551, 2016, doi: 10.1080/19443994.2014.987825.
- [44] E. Leiva, E. Leiva-Aravena, and I. Vargas, "Acid Water Neutralization Using Microbial Fuel Cells: An Alternative for Acid Mine Drainage Treatment," *Water (Basel)*, vol. 8, no. 11, 2016, doi: 10.3390/w8110536.
- [45] L. Rugini, G. Costa, R. Congesti, S. Antonaroli, L. Sanità di Toppi, and L. Bruno, "Phosphorus and metal removal combined with lipid production by the green microalga *Desmodesmus* sp.: An integrated approach," *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 125, pp. 45–51, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.plaphy.2018.01.032.

- [46] S. M. Hegde et al., "Biosorption of hexavalent chromium from aqueous solution using chemically modified *Spirulina platensis* algal biomass: an ecofriendly approach," *Desalination Water Treat*, vol. 57, no. 18, pp. 8504–8513, Apr. 2016, doi: 10.1080/19443994.2015.1019370.
- [47] P. Y. Kpai, J. Nel, N. Haneklaus, E. M. N. Chirwa, and H. G. Brink, "Comparative Screening Study on the Adsorption of Aqueous Pb(II) Using Different Metabolically Inhibited Bacterial Cultures from Industry," *Water (Basel)*, vol. 15, no. 24, 2023, doi: 10.3390/w15244259.
- [48] J. Michalska, A. Pinski, J. Zur, and A. Mroziak, "Selecting Bacteria Candidates for the Bioaugmentation of Activated Sludge to Improve the Aerobic Treatment of Landfill Leachate," *Water (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2020, doi: 10.3390/w12010140.
- [49] J. Zamorska and I. Kielb-Sotkiewicz, "A Biological Method of Treating Surface Water Contaminated with Industrial Waste Leachate," *Water (Basel)*, vol. 13, no. 24, 2021, doi: 10.3390/w13243644.