

Enfoques y Métodos para la Aplicación de Biorremediación en la Degradación de Contaminantes Ambientales

Alexa Luzmila Castro Viteri

alexacaastro@uct.edu.pe

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI

Resumen

El presente trabajo muestra uno de los estudios de los artículos descritos referentes a la aplicación de la biorremediación en diferentes ámbitos en la remediación de los recursos naturales. El tema escogido fue la biorremediación, es una tecnología que emplea procesos naturales para limpiar los sitios contaminados, los microorganismos como bacterias, hongos, plantas, algas y microalgas son capaces de neutralizar o eliminar sustancias nocivas y contaminantes presentes en el ambiente. Se realizó una revisión de diferentes artículos basados en métodos de acuerdo al organismo que efectuara la degradación del contaminante dentro de la remediación, como enfoques ómicos, tratamiento térmico, remediación microbiana, fitoremediación específicos o en consorcios con bacterias y hongos, y la remediación mediante la utilización de lombrices de tierra en la biorremediación. Finalmente se concluye que para aumentar la eficacia de la biorremediación es necesario complementarla con los enfoques ómicos o el tratamiento térmico para tener una mayor comprensión en las dinámicas microbianas y sus mecanismos de acción, además, de tener un control adecuado de la temperatura aumenta la biodisponibilidad de los contaminantes y actividad metabólica de los microorganismos en condiciones ambientales adversas. Además, los diferentes microorganismos empleados aprovechan las capacidades que poseen para lograr la degradación de los diferentes contaminantes.

Palabras clave: Biorremediación, fitoremediación, microorganismos, enfoques ómicos

Abstract

The present work shows one of the studies of the articles described referring to the application of bioremediation in different areas in the remediation of natural resources. The theme chosen was bioremediation, it is a technology that uses natural processes to clean contaminated sites, microorganisms such as bacteria, fungi, plants, algae and microalgae are capable of neutralizing or eliminating harmful substances and contaminants present in the environment. A review of different articles was carried out based on methods according to the organism that carried out the degradation of the contaminant within the remediation, such as omic approaches, thermal treatment, microbial remediation, specific phytoremediation or in consortia with bacteria and fungi, and remediation through Use of earthworms in bioremediation. Finally, it is concluded that to increase the effectiveness of bioremediation, it is necessary to complement it with omics approaches or thermal treatment to have a better understanding of microbial dynamics and their mechanisms of action, in addition, having adequate temperature control increases bioavailability. of pollutants and metabolic activity of microorganisms

in adverse environmental conditions. In addition, the different microorganisms used take advantage of the capacities they possess to achieve the degradation of the different contaminants.

keywords: Bioremediation, phytoremediation, microorganisms, omics approaches

1. Introducción

La revolución industrial ha traído consigo una serie de cambios tecnológicos, económicos, culturales y socioculturales en la población mundial. Estos cambios bajo el concepto de producción de bienes y servicios han provocado mediante las actividades antropogénicas la generación de diversos contaminantes e impactos significativos en el medio ambiente. La perspectiva mundial está presentando una preocupación por estos efectos que se están presentando como el cambio climático y el calentamiento global, dando la búsqueda de diferentes tecnologías para la recuperación de las diferentes fuentes naturales contaminadas, teniendo dentro de la biotecnología la biorremediación.

La biorremediación es un proceso biotecnológico que emplea el conjunto de diferentes técnicas para la utilización de la habilidad de microorganismos naturales o modificados genéticamente, para recuperar los ambientes contaminados, la degradación de contaminantes o sustancias tóxicas que han sido trasladadas al medio ambiente en cantidades significativas como resultantes de las diferentes actividades antropogénicas, entre los diferentes de contaminantes existentes este proceso puede eliminar los hidrocarburos aromáticos policíclicos, petróleo, pesticidas, clorofenoles, metales pesados, colorantes, sulfatos, farmacéuticos o antibióticos, entre otros.

Biorremediación se sustenta en base a la capacidad natural que poseen los diferentes microorganismos para incorporar los contaminantes en sus procesos metabólicos y usarlos como fuente de energía o carbono, en el cual esta técnica de acuerdo al organismo que efectúe la degradación del contaminante, puede clasificarse en remediación microbiana, es el uso de microorganismos como las bacteria, cianobacterias y hongos para el aprovechamiento del metabolismo xenobiótico microbiano para degradar o transformar los contaminantes; fitorremediación, es el empleo de plantas, algas, microalgas y los sus microorganismos asociados y la degradación enzimática mediante el empleo de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas; además, se da la aplicación en asociación con enfoque omicos y térmicos para aumentar la eficacia de la biorremediación.

2. Estado del arte

La biorremediación al ser compleja se puede usar múltiples métodos y enfoques dependiendo de los criterios elegidos para mejorar su capacidad y eficacia en la degradación de las sustancias contaminantes.

De acuerdo a, Sharma et al. (2022), a partir del empleo de enfoques "ómicos" en la biorremediación, se amplía la comprensión de los elementos que afectan el desarrollo, el metabolismo, la dinámica y la actividad de las comunidades microbianas nativas en áreas contaminadas. Estos enfoques ómicos son la metatranscriptómica, estudia la expresión génica de los microbios en entornos naturales; metaproteómica, estudia todas las proteínas en comunidades microbianas y microbiomas de fuentes ambientales; y metabolómica estudia

los procesos químicos que involucran metabolitos y también el perfil de los metabolitos; son importantes para determinar la naturaleza, el comportamiento y las funciones de las comunidades microbianas intrínsecas presentes en los sistemas de contención de la contaminación de diferentes sustancias nocivas de varias fuentes. El uso de estos diversos enfoques brindan conocimientos fundamentales sobre las comunidades microbianas y los mecanismos subyacentes en la biorremediación de contaminantes ambientales, para una mayor éxito en la ejecución de esta técnica. De la misma manera, Gaur et al. (2022), propone la estrategia de microbiorremediación mediante el empleo de enfoque metaómico como la metagenómica, la metatranscriptómica y la metaproteómica, para la remediación de las fuentes de agua y suelo contaminados con aceite móvil (automóviles y diferentes máquinas). El enfoque metaómico considera y analiza la diversidad y la dinámica de la comunidad microbiana, para seleccionar los microorganismos específicos de los sitios (nativos) contaminados, que pueden ayudar con una mayor efectividad de remediación, ya sea su aplicación individual o en consorcios, se tiene el registro del aumento de la biodisponibilidad, por lo tanto, biodegrada los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) presentes en el aceite móvil y de diferentes componentes del petróleo crudo.

De forma similar, Wang et al. (2022), presenta los fundamentos de la biorremediación mejorada térmicamente (TEB), debido a que se ha observado que el aumento de la temperatura dentro de un rango adecuado puede promover el enriquecimiento de enzimas, la producción de polisacáridos extracelulares y biosurfactantes, y mejorar la biorremediación para abordar los rebotes de contaminantes en la remediación de aguas subterráneas. Por ende, “TEB” aumenta la biodisponibilidad de los contaminantes y actividad metabólica de los microorganismos en condiciones ambientales adversas, en este caso el TEB se ha aplicado como una tecnología de carácter biológico posterior al tratamiento térmico, para abordar los rebotes de contaminantes en la remediación de aguas subterráneas y es necesario para que sea más efectivo debe seleccionarse teniendo como objetivo la temperatura óptima que se requiere para la descontaminación. Por otro lado, la remediación microbiana es ampliamente utilizada por su capacidad metabólica xenobiótica microbiana para degradar, transformar o acumular las sustancias nocivas específicas o en general.

En el artículo realizado por Vaishnav et al. (2022), menciona las perspectivas de la aplicación de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) como una solución potencial para abordar la contaminación por nitrilo en el suelo, debido a que este grupo de bacterias promueven el crecimiento de las plantas y las protegen de diferentes estreses abióticos y bióticos. El grupo de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal aprovechan su actividad nitrilasa para sobrevivir a niveles deficientes de nutrientes y pueden degradar los compuestos de nitrilo (NC) y utilizarlos como fuente de nitrógeno, simultáneamente, las bacterias nitrificantes presentes en el suelo también puede utilizar el amoníaco liberado como subproducto de la degradación del nitrilo y convertirlo en la forma utilizable de nitrógeno. Por medio del uso de las técnicas de perfilado y secuenciación de alto rendimiento en la comunidad microbiana específica asociada con la actividad de nitrilasa en un entorno vegetal específico son utilizados para mejorar la productividad de los cultivos en suelos contaminados con nitrilo, y convertirlos en compuestos útiles para las plantas en la remediación del suelo.

En el caso del reemplazo de productos sintéticos por productos elaborados en base a microorganismos, los autores Y.J. Ng et al. (2022), presentan la aplicación de los biosur-

factantes para reemplazar los surfactantes sintéticos en aplicaciones que incluyen la recuperación mejorada de petróleo y tratamiento de aguas residuales. Los biosurfactantes son elaborados mediante la síntesis de las moléculas de surfactante a partir de fuentes microbianas como las bacterias *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp. y *Botrytis* cinérea. Además, tienen la capacidad para usarse en condiciones de alta temperatura y alta salinidad como agente mejorado para la recuperación de petróleo pesado y por ende poseen una mayor capacidad de biodegradación, digestibilidad y biocompatibilidad dándole un uso más adecuado para tratar el medio ambiente contaminado por derrames de petróleo; también, son usados en el tratamiento de suelos contaminados, ya que son eficaces para eliminar el fluoranteno (hidrocarburo aromático policíclico derivado del alquitrán) mediante la utilización de biosurfactantes ramnolípidos en conjunto con el proceso de vermi-remediación, el proceso consiste en que las lombrices de tierra son las encargadas de remediar el suelo contaminado y los biosurfactantes en alterar la especiación del fluoranteno, obteniendo una mejora en la eliminación de este contaminante.

Por otro lado, Kumar et al. (2022), menciona la identificación de *Bacillus cereus* en la degradación de lignina Kraft (KL) a partir de lodos activados, mediante su participación en la producción de las enzimas lignina peroxidasa-LiP, manganeso peroxidasa-MnP y lacasa las cuales tienen una gran influencia en la degradación del subproducto lignina Kraft de la industria papelera. Se obtuvo que *B. cereus* ligninolítico es capaz de degradar la lignina Kraft mediante la utilización de su sistema enzimático ligninolítico, teniendo una mayor actividad enzimática para lacasa seguida de peroxidasa-MnP y peroxidasa-LiP, teniendo una reducción de contaminantes lignina Kraft - 72,5 %, color - 62,0 %, y un 80 % en su toxicidad. En el artículo se determinó que *B. cereus* puede considerarse un candidato potencial para su uso en el tratamiento de efluentes de fábricas de papel, incluido el KL y sus derivados. De la misma manera, Zhang et al. (2021), introduce el proceso de precipitación de carbonato inducida por microbios (MICP) basado en el licor de lisis de bacterias (BLL) para la degradación del lodo de decapado de acero inoxidable (SSPS); el cual contiene grandes cantidades de metales como calcio (Ca), hierro (Fe) y cantidades significativas de metales pesados como cromo (Cr), níquel (Ni) y zinc (Zn), causando graves efectos en el medio ambiente. La precipitación de carbonato inducida por microbios (MICP) es una técnica de biomineralización que presenta las reacciones bioquímicas como la hidrólisis de la urea y la formación de sales de carbonato, el microorganismo utilizado para realizar el proceso de biorremediación es *Sporosarcina pasteurii* que es una bacteria productora de ureasa. Obteniendo la reducción de la concentración de lixiviación del cromo y la bacteria presenta en su comportamiento un patrón anfótero para el Cromo, en cambio en el Níquel y Calcio es un patrón catiónico. Por otra parte, otro método usado es la fitorremediación para la descontaminación de los suelos, la depuración de las aguas residuales o la limpieza del aire interior, mediante el empleo de plantas, ya sean algas, microalgas y en consorcio con sus microorganismos asociados.

En el artículo realizado por Chandel et al. (2022), menciona la aplicación de los sistemas de microalgas para recuperar los recursos de aguas residuales y la degradación de antibióticos y contaminantes farmacéuticos simultáneamente, ya que las microalgas tienen como principales mecanismos la bioadsorción, degradación y acumulación involucradas en la remoción de contaminantes. Estos sistemas de microalgas se usan mediante consorcios de algas-bacterias, en el cual se tiene en cuenta las relaciones sinérgicas y mutualistas in-

volucradas, sus necesidades individuales en términos de nutrientes y condiciones físicas son diferentes entre sí; se construyeron consorcios de algas con *Chlorella* sp., *Merismopedia* sp., *Closteriopsis* sp., teniendo como resultado la eliminación de alrededor del 74,68 % de diclofenaco, 91,73 % de estradiol y 78,47 % de triclosán durante el crecimiento de las microalgas. Y consorcios de algas-hongos, en donde los miembros fúngicos que metabolizan moléculas orgánicas y las liberan en materia orgánica, mientras que las algas apoyan la formación de consorcios, la supervivencia de los miembros individuales y metabolizan nutrientes inorgánicos (nitrógeno y fósforo) para la fotosíntesis y liberan oxígeno y moléculas orgánicas. Los miembros fúngicos también degradan moléculas orgánicas grandes y contaminantes con la ayuda de una amplia gama de enzimas intracelulares y extracelulares que eliminan los metales pesados y los contaminantes a través de la biosorción.

De igual forma, por la preocupación que representa el problema de las aguas residuales con una alta carga de materia orgánica, como las derivadas de la agricultura, la industria o los desechos de alimentos, o donde hay pesticidas o herbicidas presentes, teniendo en forma dominante el fósforo orgánico disuelto (DOP), ya que comúnmente la mayoría de las aguas residuales, contienen el fósforo inorgánico disuelto (DIP) es la forma dominante de fósforo, Sutherland and A. Bramucci, (2022), evalúan el potencial que presentan las microalgas de aguas residuales para la biorremediación de fósforo orgánico disuelto (DOP), para remediar los daños en el medio ambiente receptor, como la eutrofización y proliferación de algas nocivas y el impacto negativo en los valores estéticos, recreativos y económicos del cuerpo de agua. En el estudio se seleccionó a *Desmodesmus communis*, *S. obtusus*, *Coelastrum* sp., *K. subsolitaria* y *Tetrademus dimorphus*, cinco especies de microalgas que tienen la capacidad de producir fosfatasa alcalina, la enzima responsable de hidrolizar el fósforo. En donde las tasas de eliminación de DOP en las cinco especies, en todos los tratamientos, oscilaron entre 17 y 91 %. Con la excepción de *D. communis*, la eficiencia de eliminación de nutrientes de DOP por unidad de biomasa sugirió una absorción lujosa de fósforo en la célula de microalgas. Además, las microalgas eliminaron el 5 % del fósforo orgánico, en cada caso, y el fósforo inorgánico hidrolizado se asimiló en las células de las microalgas y se convirtió en biomasa o se almacenó internamente. Se llegó a la conclusión, que para las aguas residuales con bajo contenido de fósforo inorgánico y fósforo orgánico, los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en microalgas pueden ofrecer un mecanismo rentable para la eliminación y recuperación del fósforo orgánico disuelto de las aguas residuales.

Asimismo, Mankiewicz et al. (2022), plantea y analiza las relaciones entre las especies de plantas y el diseño del medio de crecimiento (hidropónico y orgánico), para el reemplazo de los sistemas de manejo de aire mecánicos (ventilación y aire acondicionado) con los sistemas activos basados en plantas para tener compensaciones entre el secuestro de CO₂ a través de la fotosíntesis y la producción de CO₂ por zonas de raíces metabólicamente activas, que pueden remediar los compuestos orgánicos volátiles (COV) en el aire. En el estudio se utilizó las especies de plantas *Epipremnum aureum* o potus, alta tolerancia al estrés hídrico y se usa en paredes verdes interiores; *Brassica narinosa* o tatso, alta densidad de nutrientes; y *Oxalis stricta* o acedera tiene alta dureza y tolerancia al estrés. Teniendo como medios de crecimiento el mineral puramente expandido en medios hidropónicos de arcilla aumentados con carbón activado (HAC), medio hidropónico idéntico aumentado en su lugar con biocarbón (HBC) y el medio de cultivo que utiliza un fertilizante orgánico (GS). Se obtuvo que las concentraciones de CO₂ a lo largo del desarrollo de la planta revelaron

entradas de CO₂ decrecientes dentro de la cámara a lo largo del tiempo, lo que indica la evolución de los balances de fotosíntesis/respiración, también se presenta un inconveniente para la planificación a largo plazo, el mantenimiento, financiamiento y estrategias de reemplazo de plantas para la disponibilidad de agua y las tasas de flujo de aire. Por lo que, se tiene como consideración final la comprensión de la influencia que el diseño de los medios de crecimiento podría tener sobre estas la disponibilidad de agua, las tasas de flujo de aire y el desarrollo de las plantas para el desempeño de la biorremediación que la selección de especies proporciona.

Por otra parte, el empleo de lombrices de tierra para la biorremediación es otro método estudiado y utilizado, teniendo como ejemplo el artículo realizado por Wang et al. (2022), presentaron el funcionamiento que presenta la lombriz de tierra *Eisenia fetida* para la remediación del suelo contaminado con Selenio (Se), aprovechando la capacidad de las lombrices de tierra para cambiar la estructura y las propiedades del suelo a través de actividades como la excavación y la producción de heces, y la asimilación de metales pesados e hidrocarburos a través de la absorción dérmica e intestinal. Donde resultó que la lombriz de tierra *Eisenia fetida* mostró una alta tolerancia al selenito y su eficiencia en la acumulación de selenio en sus tejidos; además, contribuyó indirectamente a la remediación de selenio mediante los cambios en las comunidades microbianas del suelo, elevando la diversidad y riqueza bacteriana en el suelo y aumentando la abundancia de géneros funcionales reductores de selenio en el suelo, como las *Pseudomonas* (tipo I) y *Aeromonas* (tipo II) que tuvieron una presencia de gran cantidad en los humus de lombriz mostrando una gran tolerancia a niveles elevados de selenio; también, *Aeromonas* y *A. caviae* exhibieron una mayor capacidad para eliminar el selenito a través de la acumulación y *A. hydrophila* y *A. veronii* fueron más efectivas en la volatilización de selenio.

3. Discusión y análisis

En base a la literatura revisada, se menciona, que la biorremediación es un proceso biotecnológico complejo que contiene una amplia gama de aplicaciones mediante la utilización de diferentes microorganismos específicos o en consorcios para degradar o reemplazar los contaminantes que son expuestos a los diferentes recursos naturales como el agua superficial o subterránea, el suelo y del subsuelo. Además, algunos microorganismos utilizados degradan los contaminantes usándolos como fuente de aliento y energía, algunos de los contaminantes que se tratan con esta técnica son los solventes, plaguicidas, farmacéuticos, el petróleo y algunos derivados. Por ende, se presenta la conveniencia de asociar enfoques ómicos con la biorremediación para mejorar la eficacia de esta, al tener una mayor comprensión de los elementos que afectan el desarrollo, el metabolismo, la dinámica y la actividad de las comunidades microbianas nativas en áreas contaminadas, mediante el acceso a los conocimientos fundamentales sobre las comunidades microbianas y los mecanismos subyacentes en la biorremediación de contaminantes ambientales. Entre estos enfoques se mencionan a metatranscriptómica, metaproteómica, metabolómica y metaómico, este último se utilizó para la remediación de las fuentes de agua y suelo contaminados con aceite móvil, en donde aumento de la biodisponibilidad, logrando la biodegradación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) presentes en el contaminante. Por consiguiente, es importante para un desarrollo eficaz de la biorremediación tener un adecuado control de la temperatura es-

pecífica para que los microorganismos utilizados se desarrollen en condiciones adecuadas, por lo que, se presenta la biorremediación mejorada térmicamente (TEB), ya que el aumento de la temperatura dentro de un rango adecuado promover el enriquecimiento de enzimas, la producción de polisacáridos extracelulares y biosurfactantes, aumentando la biodisponibilidad de los contaminantes y actividad metabólica de los microorganismos en condiciones ambientales adversas.

Un factor importante es la remediación microbiana por su capacidad metabólica xenobiótica microbiana para degradar, transformar o acumular diferentes contaminante, teniendo en los diferentes artículos descritos la utilización rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) para abordar la contaminación por nitrilo en el suelo, aplicación de biosurfactantes elaborado a base *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp. y *Botyris* cinérea para el reemplazar los surfactantes sintéticos derivados del petróleo, aplicación de *Bacillus cereus* en la degradación de lignina Kraft (KL) y el proceso de precipitación de carbonato inducida por microbios (MICP) basado en el licor de lisis de bacterias (BLL) para la degradación del lodo de decapado de acero inoxidable (SSPS); en cada caso presentado se evidencia la utilización de diferentes bacterias para tener un resultado eficaz y factible en la degradación de contaminantes específicos por la diversidad que tienen las comunidades microbianas para ser utilizados en las diferentes procesos de biorremediación.

La fitorremediación es otro factor importante por la facultad que presentan en la descontaminación de los suelos, la depuración de las aguas residuales y la limpieza del aire interior, como las microalgas que presentan mecanismos de bioadsorción, degradación y la acumulación involucrados en la remoción de contaminantes, teniendo a los sistemas de microalgas conformados por *Chlorella* sp., *Merismopedia* sp., *Closteriopsis* sp., son utilizados para recuperan los recursos de aguas residuales y la degradación de antibióticos y contaminantes farmacéuticos simultáneamente mediante la construcción de consorcios de algas con *Chlorella* sp., *Merismopedia* sp., *Closteriopsis* sp.; y miembros fúngicos; también, que las cinco especies de microalgas *Desmodesmus communis*, *S. obtusus*, *Coelastrum* sp., *K. subsolitaria* y *Tetrademus dimorphus*, tienen la capacidad de producir fosfatasa alcalina, la enzima responsable de hidrolizar el fósforo, y así degradar el fósforo orgánico disuelto (DOP) presente de manera abundante en las aguas residuales. Las especies de plantas *Epipremnum aureum* o potus, *Brassica narinosa* o tatso y *Oxalis stricta* o acedera son empleadas para la elaboración de sistemas activos basados en plantas para el reemplazo de los sistemas de manejo de aire mecánicos (ventilación y aire acondicionado), obteniendo remediación de los compuestos orgánicos volátiles (COV) en el aire, pero se busca que se continúe profundizando para aumentar la rentabilidad de estos sistemas.

La utilización de lombrices para la biorremediación es igualmente importante ya que aprovecha la capacidad de las lombrices de tierra para cambiar la estructura y las propiedades del suelo a través de actividades como la excavación y la producción de heces, para la asimilación de metales pesados e hidrocarburos a través de la absorción dérmica e intestinal de la lombriz, como la utilización de la lombriz de tierra *Eisenia fetida* para la remediación del suelo contaminado con Selenio (Se), mediante el empleo de comunidades microbianas del suelo como las *Pseudomonas* (tipo I), *Aeromonas* (tipo II), *Aeromonas*, *A. caviae*, *A. hydrophila* y *A. veronii*, las cuales remediaron el suelo contaminado con selenio y selenito.

4. Conclusiones

- La utilización de las tecnologías ómicas y tratamientos térmicos en la biorremediación aumenta la eficacia de la técnica, mediante la comprensión de los elementos que afectan el desarrollo, el metabolismo, la dinámica y la actividad de las comunidades microbianas nativas en áreas contaminadas para su empleo adecuado al degradar los contaminantes, además, el aumento de la temperatura dentro de un rango adecuado promueve el enriquecimiento de enzimas, la producción de polisacáridos extracelulares aumentando la biodisponibilidad de los contaminantes.
- La remediación microbiana al presentar una capacidad metabólica xenobiótica permite degradar, transformar o acumular diferentes contaminantes de acuerdo al microorganismo utilizado, como en el caso del grupo rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) que degrada los compuestos de nitrilo, los biosurfactantes elaborado a base *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp. y *Botrytis* cinérea para reemplazar a los derivados de petróleo, *Bacillus cereus* en la degradación de lignina Kraft (KL) y el proceso de precipitación de carbonato inducida por microbios (MICP) basado en el licor de lisis de bacterias (BLL) para la degradación del lodo de decapado de acero inoxidable (SSPS).
- La fitorremediación son utilizados en la descontaminación de los suelos, depuración de las aguas residuales y la limpieza del aire interior mediante los sistemas de microalgas para la remediación de los recursos de aguas residuales de los contaminantes farmacéuticos o antibióticos y los sistemas activos basados en plantas para el reemplazo de los sistemas de manejo de aire mecánicos (ventilación y aire acondicionado) para la remediación de los compuestos orgánicos volátiles (COV).
- El empleo de las lombrices de tierra para la biorremediación aprovecha la capacidad de las lombrices para cambiar la estructura y las propiedades del suelo a través de actividades de excavación y la producción de heces, para una mayor asimilación de los diferentes contaminantes como los metales pesados e hidrocarburos a través de la absorción dérmica e intestinal de la lombriz.

Referencias

- Chandel, N., Ahuja, V., Gurav, R., Kumar, V., Tyagi, V., Pugazhendhi, A., . . . Bhatia, S. (2022). Progress in microalgal mediated bioremediation systems for the removal of antibiotics and pharmaceuticals from wastewater. *Science of the Total Environment*, 825, 153895.
- Kumar, R., Singh, A., Maurya, A., Yadav, P., Yadav, A., Chowdhary, P., Raj, A. (2022). Effective bioremediation of pulp and paper mill wastewater using *Bacillus cereus* as a possible kraft lignin-degrading bacterium. *Bioresource Technology*, 352, 127076.
- Mankiewicz, P., Borsuk, A., Ciardullo, C., Hénaff, E., Dyson, A. (2022). Developing design criteria for active green wall bioremediation performance: Growth media selection shapes plant physiology, water and air flow patterns. *Energy and Buildings*, 260, 111913.

- Ng, Y., Lim, H., Khoo, K., Chew, K., Chan, D., Bilal, M., . . . Show, P. (2022). Recent advances of biosurfactant for waste and pollution bioremediation: Substitutions of petroleum-based surfactants. *Environmental Research*, 212, 113126.
- Pooja Sharma, S. P. (2022). Omics approaches in bioremediation of environmental contaminants: An integrated approach for environmental safety and sustainability. *Environmental Research*, 211, 10.
- Sutherland, D., Bramucci, A. (2022). Dissolved organic phosphorus bioremediation from food-waste centrate using microalgae. *Journal of Environmental Management*, 313, 115018.
- Vaishnav, A., Kumar, R., Singh, H., Sarma, B. (2022). Extending the benefits of PGPR to bioremediation of nitrile pollution in crop lands for enhancing crop productivity. *Science of the Total Environment*, 826, 154170.
- Vivek Kumar, G., Gaur, V., Sharma, P., Gupta, P., Dwivedi, S., Srivastava, J., . . . Parra-Saldívar, R. (2022). Sustainable strategies for combating hydrocarbon pollution: Special emphasis on mobil oil bioremediation. *Science of The Total Environment*, 832, 155083.
- Wang, Q., Guo, S., Ali, M., Song, X., Tang, Z., Zhang, Z., . . . Luo, Y. (2022). Thermally enhanced bioremediation: A review of the fundamentals and applications in soil and groundwater remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 433, 128749.
- Wang, Y., Wang, Z.-J., Huang, J.-C., Chachar, A., Zhou, C., He, S. (2022). Bioremediation of selenium-contaminated soil using earthworm *Eisenia fetida*: Effects of gut bacteria in feces on the soil microbiome. *Chemosphere*, 300, 134544.