



Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible

Contribution of bioremediation to solve pollution problems and its relationship with sustainable development

Jennyfer M. Garzón¹ orcid.org/0000-0002-2193-2304

Juan Pablo Rodríguez-Miranda^{1*} orcid.org/0000-0002-3761-8221

Catalina Hernández-Gómez¹ orcid.org/0000-0002-1287-5707

¹ Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia

Fecha de recepción: Enero 24 - 2017

Fecha de revisión: Febrero 23 - 2016

Fecha de aceptación: Agosto 11 - 2017

Garzón JM, Rodríguez-Miranda JP, Hernández-Gómez C. Revisión del aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. Univ. Salud. 2017;19(2):309-318. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rus.171902.93>

Resumen

Introducción: La biorremediación, se ha convertido en una alternativa atractiva y prometedora a las tradicionales técnicas físico-químicas para la remediación de los compuestos que contaminan el ambiente. **Objetivo:** Revisión sobre la aplicación de la biorremediación y su aporte en el cumplimiento de uno de los objetivos de desarrollo sostenible. **Materiales y métodos:** Estudio descriptivo mediante la revisión documental sobre las posibilidades y limitaciones que presenta esta biotecnología en el tratamiento de problemas de contaminación. **Resultados:** Entre las principales tecnologías que se han registrado desde la década de 1970, la biorremediación ha demostrado ser rentable y eficiente en la remoción de determinados contaminantes. **Conclusión:** A pesar de los beneficios de las tecnologías de biorremediación, existen algunas dificultades en la aplicación debido a las restricciones impuestas por el sustrato y variabilidad ambiental, el potencial limitado de biodegradación y la viabilidad de los microorganismos de origen natural, entre otras.

Palabras clave: Desarrollo sostenible; contaminación ambiental; biotecnología; biorremediación. (Fuente: DeCS, Bireme).

Abstract

Introduction: Bioremediation is an alternative to traditional physico-chemical techniques for the remediation of compounds that pollute the environment. **Objective:** To review the application of bioremediation and its contribution to the fulfillment of one of the objectives of sustainable development. **Materials and methods:** A descriptive study was made by means of documentary review about the possibilities and limitations of biotechnology in the treatment of problems of contamination. **Results:** Among the main technologies that have been registered since the decade of 1970, bioremediation has proven to be profitable and efficient in the removal of certain pollutants. **Conclusions:** Despite the benefits of bioremediation technologies, there are some difficulties in the application due to the restrictions imposed by the substrate and environmental variability, the limited potential of biodegradation and the viability of microorganisms of natural origin, among others.

Keywords: Sustainable development; environmental pollution; biotechnology; bioremediation. (Source: DeCS, Bireme).

***Autor de correspondencia**

Juan Pablo Rodríguez Miranda

e-mail: jprodriguez@udistrital.edu.co

Introducción

La controversia por el impacto de las actividades humanas en el ambiente se ha dado por años, hasta el punto que no se pueden pasar por alto los efectos causados al sistema ambiental, del cual se sostienen las dinámicas socioeconómicas y culturales. Por esta razón, apareció la preocupación de continuar con los procesos de crecimiento económico, previniendo y mitigando al máximo los impactos ambientales sobre los ecosistemas y de esta forma conservar sus funciones, con el fin de garantizar a las futuras generaciones la satisfacción de sus necesidades. A partir de esta premisa, surgió lo que en la actualidad se conoce como desarrollo sostenible, que se establece como un compromiso de la humanidad^(1,2).

Para materializar este concepto, ha sido necesario que existan estrategias de gestión ambiental, orientadas a resolver, mitigar y/o prevenir los problemas de carácter ambiental, lo cual ha permitido al ser humano el desenvolvimiento de sus potencialidades y la gestión del patrimonio biofísico y cultural, garantizando su permanencia en el tiempo y en el espacio⁽³⁾.

Esto implica que los recursos naturales sean gestionados racionalmente; por una parte implementando medidas preventivas y por otra, nuevas tecnologías que contribuyan a reducir y corregir el recurso impactado.

En este contexto, la biotecnología se presenta como un conjunto de tecnologías con potencial para contribuir al desarrollo sostenible, en el ámbito de la solución de problemas de contaminación, ya que se desenvuelve en distintos campos, tales como: la producción y elaboración de alimentos; la agricultura y la silvicultura, el sector de la salud, la producción de materiales y productos químicos y la protección del ambiente. En esta última, tiene protagonismo, la biorremediación, también conocida como biotecnología ambiental⁽⁴⁾.

Esta revisión se centra en los logros y las perspectivas futuras de la biotecnología en la

biorremediación de la contaminación generada por las industrias a nivel mundial, así como en la discusión de algunas técnicas, por ello se relacionan estudios de caso que contribuyen las discusiones sobre el aporte de las biotecnologías aplicadas a la descontaminación del ambiente y al desarrollo sostenible, sus ventajas y desventajas, las proyecciones futuras.

Materiales y métodos

En primer lugar, se llevó a cabo una revisión de los objetivos de desarrollo sostenible y la gestión ambiental, posteriormente se identificaron los principales problemas de contaminación sobre los que la biorremediación ha tenido que intervenir, para luego desarrollar el tema de biorremediación a través de su definición, antecedentes y aplicaciones de trabajos realizados por diferentes grupos de investigación a nivel mundial; así como las ventajas y desventajas que se dan por el uso de esta biotecnología ambiental. Finalmente, se desarrolló la discusión entre la biorremediación y su aporte al desarrollo sostenible y se planteó una serie de reflexiones acerca de las posibilidades y limitaciones que presentan estas tecnologías, abordando de esta manera la biorremediación como marco del desarrollo sostenible.

Resultados

Desarrollo sostenible y gestión ambiental

La definición más conocida de desarrollo sostenible, dada su amplia gama de interpretaciones posibles, es la que figura en el Informe Brundtland: *"Es el que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades"*⁽⁵⁾. Este concepto fue lanzado por la Comisión Mundial sobre ambiente y desarrollo en el informe de nuestro futuro común en 1987 y reforzado por la Cumbre de la tierra en Río de Janeiro en 1992⁽⁶⁾.

Para el propósito de esta revisión se tomó la definición propuesta por Liverman *et al.*, *"...la supervivencia indefinida de la especie humana"*

(con una calidad de vida más allá de la mera supervivencia biológica) a través del mantenimiento de la vida básica en sus sistemas de apoyo (aire, agua, suelo, biota) y la existencia de infraestructuras e instituciones que distribuyen y protegen los componentes de estos sistemas", definición propuesta por⁽⁷⁾.

De esta manera se evidencia cómo la gestión que se realiza para resolver, mitigar o prevenir los problemas de carácter ambiental, conlleva al logro del propósito del desarrollo sostenible; permitiendo a la humanidad mantener sus sistemas de apoyo y de esta manera atender las necesidades tanto de las generaciones presentes como de las generaciones futuras^(6,7).

Así mismo, de acuerdo con uno de los objetivos de desarrollo sostenible⁽⁸⁾ relacionados con la salud pública, para 2030, se busca reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo. Lo anterior a través de la gestión ambiental efectiva, que conlleve al manejo de estos problemas ambientales.

En el mundo actual, la búsqueda del logro del objetivo de la sostenibilidad no es atractivo si no representa una ventaja para los sectores involucrados. En este sentido, es importante resaltar que la sostenibilidad implica un triple valor añadido: el beneficio económico, social y ambiental en el desarrollo de los productos y servicios de las diversas empresas⁽⁷⁾. Es por esto que el desarrollo sostenible requiere un marco para la integración del ambiente, las políticas y las estrategias de desarrollo en un contexto global. Esto ha llevado a que cada vez en mayor medida, las consideraciones de sostenibilidad se dirijan hacia el futuro tecnológico, socio-económico y el cambio político y cultural para definir los límites de lo aceptable⁽⁹⁾.

Esto significa, por ejemplo, que las acciones de gestión ambiental debe estar de acuerdo con las exigencias sociales y sus necesidades, además de ser económicamente viable y contribuir con el cuidado del ambiente⁽⁴⁾. De igual manera, se debe tener en cuenta que los principios de la gestión

ambiental no pueden ser estáticos, porque el ambiente, la sociedad y la economía son dinámicos⁽¹⁰⁾. Por lo tanto, los investigadores son llamados a identificar, aprender y estudiar la manera que los aspectos socioeconómicos sean incluidos dentro de los criterios de diseño para lograr el desarrollo de soluciones sostenibles.

Estas soluciones deben partir del reconocimiento de que el estado de bienestar de la sociedad moderna se encuentra afectado por una gama de productos industriales, que han causado graves daños al ambiente y que el enfrentarse a las consecuencias y a los problemas ambientales urgentes que existen hoy en día, las soluciones pueden ser a partir del nivel de pensamiento que ha creado estos problemas, por el contrario, ese pensamiento debe evolucionar (transformarse) en formas innovadoras que pueden preconcebir los tratamientos que proporcionan al mundo nuevas soluciones sostenibles^(7,11).

Industrias y contaminación

La protección ambiental y el uso racional de los recursos naturales y otras materias primas industriales, se han convertido en una esfera importante de avance hacia el desarrollo sostenible en la segunda mitad del siglo XXI. Estas están estrechamente relacionadas con las actividades económicas del hombre y por esta razón, se considera una parte integral de los logros científicos y tecnológicos⁽¹²⁾. Las actividades económicas desarrolladas por la humanidad, han ocasionado que el ambiente mundial esté bajo gran estrés debido a la urbanización y la industrialización, así como la presión demográfica sobre los recursos naturales limitados⁽⁴⁾. De esta manera, los problemas asociados a sitios contaminados, asumen un protagonismo cada vez mayor en muchos países; sobre todo, teniendo en cuenta que los ecosistemas y los recursos contaminados generalmente son el resultado de las actividades industriales que desconocieron efectos ambientales^(13,14).

Para tener una idea de la magnitud del problema a nivel mundial, se debe considerar el estado del ambiente. Según el Informe Mundial sobre

Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017⁽¹⁵⁾, se estima que en el mundo más del 80% de las aguas residuales (más del 95% en algunos países en desarrollo) se vierte sin tratamiento alguno, generando cada vez más zonas muertas desoxigenadas en mares y océanos, que afecta a superficie de 245.000 km, con repercusiones en la industria pesquera, medios de subsistencia y cadenas alimenticias⁽¹⁶⁾.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que el 92% de la población mundial vive en lugares donde los niveles de calidad del aire están debajo de los límites fijados; entre las principales fuentes de contaminación del aire se encuentran los modos ineficientes de transporte y las actividades industriales⁽¹⁶⁾.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la mayoría del recurso suelo del mundo está en una condición aceptable, pobre o muy pobre, debido entre otras causas, a la exposición a elementos trazas (también llamados metales pesados) y a contaminantes orgánicos, por lo cual, la disposición de residuos tóxicos y la acumulación de metales suponen grandes desafíos para la recuperación y posterior uso adecuado de estos⁽¹⁷⁾.

En la actualidad se reconoce ampliamente que la contaminación del agua, aire y suelo es una amenaza potencial para la salud humana, lo cual ha llevado a formular esfuerzos internacionales para poner remedio a muchos de estos problemas, ya sea como respuesta a los riesgos para la salud de la población involucrada, a los efectos medioambientales causados por la contaminación, o para que el medio sea reconstruido⁽¹⁷⁾.

La naturaleza y la magnitud de los problemas son siempre cambiantes, planteando nuevos retos y creando una necesidad constante de desarrollar tecnologías apropiadas. En este contexto, la biorremediación tiene un gran potencial para atender estos desafíos representa para algunos científicos la esperanza de protección del ambiente, la sostenibilidad y la gestión^(18,9,19,20).

Biorremediación

La discusión anterior lleva a establecer que el desarrollo sostenible se ha convertido en una prioridad para los responsables políticos del mundo^(2,21). La necesidad de remediar estos medios ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías que hacen hincapié en la desintoxicación y la destrucción de los contaminantes, en lugar del enfoque convencional de disposición.

Dentro de la amplia gama de tecnologías con el potencial de llegar a la meta de la sostenibilidad, la biorremediación, entendida esta como la aplicación de microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para la restauración del ambiente⁽²²⁾, podría ocupar un lugar importante. Esta tecnología actúa a través de las intervenciones de la diversidad biológica para los propósitos de mitigación (y siempre que sea posible, la eliminación) de los efectos nocivos causados por los contaminantes ambientales en un sitio dado⁽²³⁾.

El término biorremediación acuñado a principios de la década de los 80, proviene del concepto de remediación que hace referencia a la aplicación de estrategias físico-químicas para evitar el daño y la contaminación del suelo. En el caso particular de la biorremediación se centra en la remediación biológica, basada esencialmente en la capacidad de los organismos vivos para degradar en forma natural ciertos compuestos contaminantes; los sistemas biológicos frecuentemente utilizados son microorganismos o vegetales^(24,25).

La biorremediación permite entonces reducir o remover los residuos potencialmente peligrosos presentes en el ambiente⁽²⁶⁾ y por lo tanto, se puede utilizar para limpiar terrenos o aguas contaminadas, dado que su ámbito de aplicabilidad es muy amplio, pudiendo considerarse como objeto de remediación cada uno de los estados de la materia, es decir, sólido (suelos o sedimentos), o bien directamente en lodos, residuos, etc. Líquido, en aguas superficiales, subterráneas y residuales; así como gases, derivados de las emisiones industriales⁽²⁴⁾.

Antecedentes de biorremediación

La biorremediación fue usada en una forma no refinada durante muchos años por la industria petrolera de los Estados Unidos. Surgió del conocimiento empírico de los operadores de las refinerías del petróleo, quienes desecharon los lodos de los separadores tipo API (Instituto Americano del Petróleo) y otros residuos aceitosos en forma de una capa delgada sobre la parte superior del suelo en un sitio próximo a la refinería. Esta técnica, llamada "landfarming" fue ampliamente usada sin comprender los procesos que causaban la degradación de los lodos^(27,28).

Posteriormente fue entendida de una manera científica, dado que académicos e industriales comprobaron que algunos microorganismos, sobre todo algunas bacterias, podían utilizar los hidrocarburos del petróleo como alimento y fuente de energía. Luego, investigaciones demostraron que estos microorganismos eran los principales responsables de la descomposición de aceites en el suelo de los "landfarm"⁽²⁷⁾.

El tratamiento de las aguas residuales municipales por el método de lodos activados fue otro uso importante de la biotecnología en aplicaciones de biorremediación. Este tratamiento de lodos activos ha sido una gran herramienta de la biotecnología ambiental para el control de la contaminación del ambiente acuático. Del mismo modo, la estabilización aerobia de residuos sólidos orgánicos mediante el compostaje tiene una larga historia de uso⁽²⁶⁾. Además, los microorganismos y enzimas se han utilizado con éxito en aplicaciones diversas de biorremediación, como el tratamiento eficaz y controlado de nitrato y fosfato de las aguas residuales⁽²⁹⁾. Los microorganismos y las enzimas han sido el foco principal de los esfuerzos para mejorar la capacidad de biorremediación, asimismo, el uso de las plantas superiores en fitorremediación es un área importante de desarrollo^(23,30).

Hoy en día los procesos de biorremediación se han establecido tanto para tratamiento de suelo y aguas subterráneas contaminados *in situ* como *ex situ*. Se ha demostrado en las diferentes

experiencias que cuando se adapta correctamente a las condiciones del medio a intervenir, la biorremediación puede ofrecer disminución significativa de costes y beneficios ambientales en comparación con tecnologías alternativas⁽³¹⁻³³⁾.

Por otra parte, la biorremediación ha demostrado ser útil en la reducción de las emisiones de vapores de compuestos orgánicos, en particular de los efluentes gaseosos que son bajos en Compuestos Orgánicos Volátiles (COV). Dos procesos biotecnológicos principales están disponibles para la eliminación de compuestos orgánicos volátiles de los gases⁽³⁴⁾. Se evidencia que la biorremediación ha venido desempeñando un papel importante en el mantenimiento de un ambiente limpio, el cual se ampliará sustancialmente a medida que esta biotecnología se desarrolle e implemente para el tratamiento de todo tipo de efluentes, residuos y emisiones industriales^(32,35,34).

Sin embargo, a pesar de que la biorremediación es a menudo considerada como un tratamiento efectivo económico y amigable del ambiente^(35,33), enfrenta un nuevo reto: convencer a las compañías y a los organismos oficiales de su alto potencial, por cuanto se ha venido convirtiendo en una verdadera industria para sanear el ambiente de las afectaciones generadas por las actividades humanas⁽²⁶⁾.

Aplicaciones de la biorremediación

Las perspectivas para la aplicación de métodos biotecnológicos en la minería de oro, plata, cobre, etc., suelen ser más baratos que las tecnologías convencionales, por ejemplo, en la desintoxicación de efluentes, las bacterias se han venido utilizando en la minería de cobre y oro en Chile, India, Ghana, Uzbekistan y Australia; al menos 34% del cobre y el 15% del oro producido en el mundo proviene de estos países^(36,37).

Numerosas pruebas de laboratorio han demostrado la capacidad de los microorganismos en la biodegradación y biosorción. Sin embargo, su éxito depende de condiciones físicas y químicas estables que en condiciones de campo son fluctuantes como:

pH, concentración del contaminante, la presencia de sólidos, entre otras^(38,27,35,39,33).

Ciertos contaminantes industriales no son degradables por procesos conocidos que ocurren naturalmente, como en el caso de biodegradación de bifenilopoliclorados (PCB)^(4,40); es un reto para los investigadores desarrollar nuevos procesos de biorremediación.

Por su parte, las plantas han demostrado tener la capacidad de absorber, metabolizar, acumular y retener metales pesados y otros contaminantes. Los ejemplos incluyen *Thlaspi caerulescens* (Cadmio y Zinc), *Zea mays* y *Thlaspi rotundifolium* (Plomo y Diesel), y *Alyssum* (Níquel)^(41,42), *Gnaphalium chartaceum* (Cobre, Manganeso, Zinc y Plomo)⁽⁴³⁾.

Cabe destacar que el nivel de acumulación normal de las plantas varía entre 0,1 y 100 mg (por kg de masa vegetal), aunque en casos excepcionales, un 1-3% puede ser alcanzado, con un récord de 25% en masa seca de níquel acumulando por cada árbol. Es de aclarar, que estas especies presentan condiciones de crecimiento lento, baja biomasa y adaptación a las condiciones ambientales extremas (suelos contaminados), por cuanto el cultivo dificulta su desarrollo⁽⁴¹⁾.

De esta manera, se evidencian algunos aportes de la literatura que reportan la aplicabilidad de la biorremediación para la descontaminación de los diferentes medios impactados por las actividades humanas. Sin embargo, también se debe tener en cuenta las diferentes posiciones con respecto a las ventajas y desventajas que representa este tipo de tratamiento de orden biológico. A continuación se reportan algunas de las visiones encontradas al respecto.

Ventajas de la biorremediación

Con relación a otras tecnologías, la biorremediación, suele tener costos más bajos, provoca una menor intrusión en el sitio contaminado y en consecuencia, un daño ecológico menos significativo en el proceso de destrucción de los productos contaminantes⁽²⁶⁾. Diversos autores, coinciden en que a menudo, la

biorremediación se puede hacer en el lugar, eliminando así los costos de transporte y pasivos, lo cual permite que el uso y fabricación industrial del sitio pueda continuar mientras el proceso de biorremediación se está aplicando^(44,31,45).

Adicionalmente, la biorremediación puede ser integrada con otras tecnologías en cadena, favoreciendo el tratamiento de los residuos mezclados y complejos^(14,30) y tiene la capacidad de reducir o descomponer de forma segura los contaminantes resultantes del proceso de recuperación⁽⁹⁾.

Otra ventaja que se evidencia en el uso de materiales renovables (residuos y subproductos) que ha impulsado la biorremediación de diferentes ambientes contaminados⁽⁴⁶⁾, está relacionada con cáscaras de semillas de girasol, maní, arroz y pipas; tallos y derivados del algodón, hierbas diversas, caña, maíz, sorgo, podas de vid, caña de azúcar, bagazo de tequila, coco y plátano, pulpa de café, papel de desecho, madera, aserrín y virutas^(38,44,47,27,48,49).

Por otro lado, la biorremediación está también en el centro del debate sobre las posibilidades que ofrece como tecnología en relación con los países en desarrollo. Defensores de la biotecnología ambiental, argumentan que las tecnologías de lo vivo son más apropiadas para resolver cuestiones críticas que afectan al mundo en desarrollo, dado que prospectivamente la modernización en la aplicación de estas biotecnologías, puede llevar consigo la corrección de las condiciones de pobreza, mejor sanidad, la consecución de mayores cotas de bienestar material y en general, una mejoría en la calidad de vida de los ciudadanos de los países en desarrollo⁽⁵⁰⁾.

Limitaciones y desventajas de la biorremediación

La biorremediación también tiene sus limitaciones y desventajas. Algunos productos químicos, por ejemplo, compuestos altamente clorados y metales pesados, no son fácilmente susceptibles a la degradación biológica y la estabilización⁽⁹⁾.

Para algunos productos químicos, la degradación microbiana puede conducir a la producción de sustancias tóxicas o más volátiles que el compuesto de origen. Por ejemplo, en condiciones anaeróbicas, el tricloroetileno TCE experimenta una serie de reacciones mediadas por microorganismos que resultan en la eliminación secuencial de átomos de cloro de la molécula; este proceso se llama deshalogenación reductora. El producto final es el cloruro de vinilo (VC), un conocido carcinógeno⁽¹⁴⁾.

Por lo tanto, si la biorremediación se aplica sin conocer los procesos microbianos involucrados, las vías metabólicas y químicas participantes podrían conducir a una situación peor a la ya existente. De esta manera, la biorremediación es un procedimiento científicamente intensivo que debe adaptarse a las condiciones específicas del lugar para reducir al mínimo los efectos de las restricciones ambientales⁽³²⁾. Los costos iniciales para la evaluación *in situ*, caracterización y evaluación de factibilidad para la biorremediación pueden ser mayores que los costos asociados a las tecnologías más convencionales⁽¹⁰⁾.

Teniendo en cuenta que los procesos biológicos, en algunas ocasiones son más lentos, la biorremediación no es la primera opción en aquellos sitios donde por razones económicas, políticas o ambientales, es necesaria una rápida limpieza del lugar contaminado⁽²⁶⁾.

Varios autores consideran que a pesar de los avances realizados en la biorremediación de suelos contaminados, el uso de residuos orgánicos para fertilización, restauración y su reciclado para aplicaciones industriales, conlleva asociado una gran complejidad en su uso, que requiere precaución en la gestión y uso de técnicas⁽²³⁾.

Las aplicaciones de la biorremediación deben contar con respaldo científico, sin embargo, en el mercado de productos para la resolución de problemas ambientales suelen comercializarse compuestos microbianos de formulación desconocida, que no son efectivos e incluso pueden aumentar el riesgo de contaminación⁽²⁶⁾.

Asimismo, se ha evidenciado que la gestión de plantas fitorremediadoras no está suficientemente estudiada, ni científica, ni técnicamente, con relación a su ciclo de vida. Por ello, no se puede garantizar que el uso de plantas bioacumuladoras, promueva la dispersión de los contaminantes al medio natural a través del ciclo del Carbono, o se distribuyan a lo largo de la cadena trófica⁽⁵¹⁾.

Discusión

Relación biorremediación y desarrollo sostenible

La biorremediación depende de recursos naturales puesto que el punto de origen para su actuación es siempre un organismo vivo. En este contexto, la posición de la biorremediación es ambivalente y permite la adopción de posiciones favorables o desfavorables frente a sus usos en relación con la conservación de los recursos naturales, según las visiones optimistas o negativas de índole cultural en la que se posicionen los actores⁽⁵⁰⁾.

Al enfocarse en la gravedad de los problemas de contaminación sobre los que la biorremediación interviene, como lo es la contaminación por metales pesados, COV, PCBs, etc, que causan problemas de salud pública y degradación de los ecosistemas, se establece que se debe dar prioridad al tratamiento biológico y avanzado con el fin de disminuir la concentración de estos compuestos en las aguas residuales, suelo y aire⁽⁷⁾. Se identifica claramente, en las diversas posiciones asumidas, que existe la necesidad de transferencia de tecnologías limpias a las industrias a escala local, regional y global, para el tratamiento de los medios que han sido contaminados por las actividades productivas sin ningún control. Contribuyendo en el corto, mediano o largo plazo, a la búsqueda del objetivo de desarrollo sustentable de reducir sustancialmente el número de muertes causadas por productos químicos peligrosos, la contaminación del agua y el suelo, incluso en las regiones más marginadas, que resultan ser las más afectadas por estas problemáticas, al aplicar tratamientos que si bien no generan soluciones

inmediatas, puedan contribuir a recuperar efectivamente los sitios contaminados.

Cada vez más las consideraciones de sostenibilidad en la gestión ambiental se dirigen hacia el desarrollo tecnológico, que involucre la dimensión ambiental, social, económica, política y cultural, para definir los límites de lo aceptable⁽⁹⁾. La aplicación de la biorremediación en la descontaminación de diversos medios afectados por las crecientes actividades productivas, abre nuevos espacios de intercambio público-privado a nivel científico, tecnológico y productivo. Se debe tener en cuenta que la investigación aplicada a la tecnología ambiental se enfrenta a problemas de falta de inversión (debido a que los precios de mercado no compensan de manera suficiente un adecuado cuidado del ambiente), lenta difusión, falta de capital de riesgo, aversión al mismo o burocracia⁽²⁶⁾. Deben estar bien definidas, las herramientas y metodologías para la incorporación de consideraciones de sostenibilidad en el diseño de las operaciones de tratamiento y disposición final tanto de los contaminantes primarios, como de los residuos generados por los procesos biológicos.

Conclusiones

El desarrollo sostenible requiere de la implementación de un enfoque de gestión que implique innovación y desarrollo de nuevas tecnologías para el control de la contaminación del ambiente.

La creciente demanda de la sociedad para la descontaminación de efluentes industriales (líquidos o gaseosos), materializada en restricciones cada vez más estrictas, ha impulsado, en la última década, la búsqueda de alternativas que contribuyan a solucionar estos problemas de carácter ambiental.

La biorremediación, se ha convertido en una alternativa atractiva y prometedora a las tradicionales técnicas físico-químicas para la remediación de los compuestos que contaminan un determinado lugar, ya que ha demostrado ser más rentable y puede degradar selectivamente

los contaminantes sin dañar su flora y fauna autóctonas.

Los ejemplos que se han discutido ponen de manifiesto el carácter de tecnología evolutiva de la biorremediación, frente a los que la asocian con tecnologías revolucionarias o sustitutivas. Sin embargo, las tecnologías de biorremediación han tenido aplicaciones limitadas debido a las restricciones impuestas por el sustrato y variabilidad ambiental, el potencial limitado de biodegradación y la viabilidad de los microorganismos de origen natural.

De esta manera, si bien se ha incursionado en la biorremediación con resultados interesantes, perduran las problemáticas de la profundidad científica y técnica, así como el hecho de que la mayoría de industrias se inclinan al uso de tecnologías convencionales ya disponibles en el mercado.

Surge la necesidad de realizar nuevas investigaciones que logren resolver estas limitaciones, para que la biorremediación se convierta en una tecnología viable en los diferentes sectores y niveles de desarrollo y pueda ser complementaria en los sistemas de tratamiento tradicionales que se vienen implementando. La clave para el éxito de la biorremediación, reside en continuar el desarrollo de los trabajos científicos y de ingeniería que proporcione las bases reales de la tecnología y su evaluación; al mismo tiempo puedan explicar y justificar las razones válidas que permitan a los científicos e ingenieros utilizar adecuadamente estas tecnologías para el bienestar y la seguridad de la sociedad.

La aplicación de la biorremediación es aún una opción sin estudiar en toda su extensión, esto pudiera estar dado por la complejidad de las comunidades microbianas o de plantas fitoremediadoras que conforman estos procesos. Se requiere del análisis previo de la factibilidad ecológica y económica, teniendo en cuenta las condiciones del ecosistema dañado y las posibilidades de aplicación de algún tipo de biorremediación.

La investigación en biorremediación debe hacerse de manera transdisciplinaria, es decir coordinando las disciplinas hacia un objetivo común y tener en cuenta el potencial de las diferentes biotecnologías en cada caso particular.

Conflicto de intereses

Ninguno declarado.

Referencias

- Xercavins J, Cayuela D, Cervantes G, Sabater A. Desarrollo sostenible. Catalunya: Ediciones UPC; 2005.
- Cabrera C. El concepto y la visión del desarrollo como base para la evaluación. *Economía y Sociedad*. 2014;18(30):47-65.
- Red de Desarrollo sostenible de Colombia. Gestión Ambiental [Internet]. Bogotá: RDS; 2001. Available from: <https://www.rds.org.co/es/recursos/gestion-ambiental>
- Guerrini-Schenberg AC. Biotechnology and sustainable development. *Estud Avançados*. 2010;24(Abril 2008):7-17.
- United Nations. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future [Internet]. Vol. 42/187. 1987. p. 1-4. Available from: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
- Naciones Unidas. Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. Nueva York: Naciones Unidas; 1973.
- García-Serna J, Pérez-Barrigón L, Cocero MJ. New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering. *Chem Eng J*. 2007;133(1-3):7-30.
- PNUD. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Rio de Janeiro: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; 2015.
- Gavrilescu M, Chisti Y. Biotechnology - A sustainable alternative for chemical industry. *Biotechnol Adv*. 2005;23(7-8):471-99.
- Avagyan AB. Water global recourse management through the use of microalgae addressed to sustainable development. *Clean Technol Environ Policy*. 2011;13(3):431-45.
- Martínez AN, Porcelli AM, Derecho D, Ordinaria PA, Luján UN De. Consumo (in) sostenible : nuevos desafíos frente a la obsolescencia programada y la sustentabilidad. 2016;2016(6):105-35.
- Sent R, Chakrabarti S. Biotechnology - applications to environmental remediation in resource exploitation. *Curr Sci [Internet]*. 2009;97(6):768-75. Available from: <http://www.ias.ac.in/currsci/sep252009/768.pdf>
- Mishra M, Mohan D. Bioremediation of contaminated soils An Overview. In: Rakshit A, Abhilash P, Singh H, Ghosh S. (eds) *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*. Springer; 2017.
- Vidali M. Bioremediation. An overview. *Pure Appl Chem*. 2001;73(7):1163-72.
- WWAP. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. Paris: UNESCO; 2017.
- World Health Organization. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Geneva: WHO; 2016.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Estado Mundial del Recurso Suelo: Resumen Técnico. Roma: FAO; 2016.
- Hatti-Kaul R, Törnvall U, Gustafsson L, Börjesson P. Industrial biotechnology for the production of bio-based chemicals - a cradle-to-grave perspective. *Trends Biotechnol*. 2007;25(3):119-24.
- Zalewski M. Ecohydrology, biotechnology and engineering for cost efficiency in reaching the sustainability of biogeosphere. *Ecohydrol Hydrobiol*. 2014;14(1):14-20.
- Prince RC, Clark JR, Lindstrom JE. Field Studies Demonstrating the Efficacy of Bioremediation in Marine Environments. In: McGenity TJ, Timmis KN, Nogales B, editors. *Hydrocarbon and Lipid Microbiology Protocols: Pollution Mitigation and Waste Treatment Applications [Internet]*. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2017. p. 81-93. Available from: https://doi.org/10.1007/8623_2015_172
- Bisang R, Campi M, Cesa V. Biotecnología y desarrollo. Buenos Aires: CEPAL; 2009.
- Muñoz A, Guillen G. Biorremediación: fundamentos y aspectos Sistema de biorremediación para la regeneración de suelos hidromorfo del estero Chicharrón y Río Cucaracha de la comuna Montañita, Provincia de Santa Elena. [Tesis Biólogo] Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral; 2015.
- Prasad MN V, Freitas H, Fraenzle S, Wuenschmann S, Markert B. Knowledge explosion in phytotechnologies for environmental solutions. *Environ Pollut*. 2010;158(1):18-23.
- Rodríguez J, Sánchez J. Biorremediación: Fundamentos y aspectos microbiológicos. *Industria y minería*. 2003(351):12-6.
- Briceño H, Layling M, Méndez L. Comparación de potencial biodegradativo de técnicas de biorremediación. [Trabajo de Grado Ingeniero Químico]. Caracas: Universidad Central de Venezuela; 2006.
- Di Paola, M, Vicien C. Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación. Argentina: CEUR-CONICET; 2010.
- Soares E V, Soares HMVM. Bioremediation of industrial effluents containing heavy metals using brewing cells of *Saccharomyces cerevisiae* as a green technology: A review. *Environ Sci Pollut Res*. 2012;19(4):1066-83.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. Boletín estadístico tecnológico. Argentina: BET; 2010.
- Candela D. Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica. [Trabajo de grado Ingeniería Ambiental]. Bucaramanga: Universidad Abierta y a Distancia; 2016.

30. González M, Carrillo R, Sánchez A, Ruiz A. Alternativas De Fitorremediación de sitios contaminados con elementos potencialmente tóxicos. *Agroproductividad*. 2017;10:8-14.
31. Torres K, Zuluaga T. Biorremediación de suelos contaminados en Colombia. *J Chem Inf Model*. 2013;53(9):1689-99.
32. Juwarkar AA, Singh SK, Mudhoo A. A comprehensive overview of elements in bioremediation. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2010;9(3):215-88.
33. Perenguez B, Valdez C. Análisis de remoción de cadmio por acción de la microalga *Chlorella sp.* inmovilizada en perlas de alginato. [Tesis Ingeniería en Biotecnología de los Recursos Naturales] Quito: Universidad Politécnica Salesiana; 2017.
34. Cárdenas Y, Quispe V, Contreras S. Biorremediación mediante la asociación entre microorganismos y plantas. *Revista de Investigación Científica Cultura Viva Amazónica*. 2016;1(2):21-7.
35. Naja G, Murphy V, Volesky B. Biosorption, Metals. *Encycl Ind Biotechnol*. 2010; 1-29.
36. Trade map. Lista de los países exportadores para Cobre y Oro en 2016 [Internet]. Ginebra: Trade map; 2016. Available from: <http://www.trademap.org/Index.aspx>.
37. U.S. Geological Survey. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2017. Washington: USGS. 2017. 202 p.
38. Cano I, Pérez J, Gutiérrez M, Gardea J. Remoción y recuperación de Cromo (III) de soluciones acuosas por biomasa de sorgo removal and retrieval of chromium (III) From Aqueous Solutions By Sorghum Biomass. *Rev Mex Ing Química*. 2002;1:97-103.
39. Ceron C, Islas M. Remoción de Cd y Pb y reducción de Cr(VI) en agua sintética y residual proveniente de una industria de galvanoplastia utilizando biomasa bacteriana. [Tesis Maestría en Ciencias del Agua]. Mexico: Universidad Autónoma del Estado de México; 2015.
40. Kopytko M, Correa S, Estévez M. Biodegradación estimulada de los suelos contaminados con pesticidas organoclorados. *Rev Investig Agrar y Ambient*. 2017;8:1-2
41. Prasad MN V. Phytoremediation of metals in the environment for sustainable development. *Proc Indian Natl Sci Acad Part B Rev Tracts*. 2004;B70(1):71-98.
42. Sandoval S. Saneamiento de suelos contaminado con diésel utilizando Zea mays como fitorremediador. Durango: Universidad Juárez del Estado de Durango; 2017.
43. Covarrubias SA, Peña Cabriales JJ. Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Rev Int Contam Ambient*. 2017;33:7-21.
44. Singh S, Kang SH, Mulchandani A, Chen W. Bioremediation: environmental clean-up through pathway engineering. *Curr Opin Biotechnol*. 2008;19(5):437-44.
45. Mendoza D, Salazar K, Bravo L. Fitorremediación acuática con *Myriophyllum aquaticum* para el tratamiento de efluentes generados por pasivos ambientales mineros de Hualagayoc - Cajamarca. [Tesis Ingeniería Ambiental]. Callao: Universidad Nacional del Callao; 2016.
46. Amarasinghe BMWPK, Williams RA. Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater. *Chem Eng J*. 2007;132(1-3):299-309.
47. Rodríguez N. I Seminario de bioenergía: promoviendo el aprovechamiento de la biomasa residual. Producción de biocombustibles a partir de los subproductos del café. Bogotá: CENICAFE; 2010.
48. Vizcaíno L, Fuentes N. Biosorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pretratada de algas rojas, cáscara de naranja y tuna. *Cienc e Ing Granadina [Internet]*. 2015;25:43-61. Available from: <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v25n1/v25n1a04.pdf>
49. Medellín, N, Hernández, M, Salazar J, Labrada G, Aragón A. Bioadsorción de interna (II) presente en solución acuosa sobre residuos de fibras naturales procedentes de la industria ixtlera (Agave lechuguilla Torr. Y Yucca carnerosana (Trel.) McKelvey). *Rev Int Contam Ambient [Internet]*. 2017;33(2):269-80. Available from: <http://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2017.33.02.08/46661>
50. Muñoz E. Biotecnología y desarrollo en distintos contextos culturales. Influencias e impactos. *Ciencia, Tecnol Cult en el siglo [Internet]*. 2000;21:183-204. Available from: http://pdiemigracion.ucm.es/info/otri/complu tecno/fichas/tec%7B_%7Dcacebal1.htm
51. Gallardo J. Conclusiones del IV Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental. *Ecosistemas*. 2007;16(2):137-40.