

Artículo de Revisión

***BIORREMEDIACIÓN, TECNOLOGÍA SOSTENIBLE EN LA
GESTIÓN DE RESIDUOS Y LA CONTAMINACIÓN POR
HIDROCARBUROS***

***BIOREMEDIATION, SUSTAINABLE TECHNOLOGY FOR WASTE
MANAGEMENT AND HYDROCARBON POLLUTION***

Roberto Romero Silva^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-9074-9178>

¹ Inversiones Gamma S. A. La Habana, Cuba.

Recibido: Octubre 11, 2025; Revisado: Octubre 21, 2025; Aceptado: Noviembre 11, 2025

RESUMEN

Introducción:

La biorremediación es una tecnología avanzada y ambientalmente sostenible a nivel mundial, que utiliza los microorganismos para mitigar la contaminación por hidrocarburos. Su aplicación permite la reutilización de estos residuos y su transformación en productos utilizables. Además, facilita la invención y la implementación de técnicas innovadoras para mejorar los procesos de reciclaje y tratamiento de residuos. Genera un enfoque integrado de la sostenibilidad: desarrollo económico, equidad social y protección ambiental.

Objetivo:

Analizar los mecanismos, los tipos de biorremediación y el potencial integrador de su aplicación, lo que representa un paso importante en la gestión ambiental y el cumplimiento del marco regulatorio en Cuba.

Materiales y Métodos:

No se empleó una metodología específica, sin embargo, puede considerarse una revisión tipo Prisma, que sirve de soporte en revisiones sistemáticas.

Resultados y Discusión:

Transferencia de tecnología lograda por nuestro país desde la primera década de este siglo, que ha permitido el acceso al conocimiento asociado a esta tecnología desde sus inicios a nivel mundial, con posteriores contribuciones y logros desde la investigación,



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Roberto Romero, Email: romerosilvaroberto@gmail.com



aplicación y uso generalizado. Rentabilidad que la convierte en una opción económicamente viable para proyectos de limpieza a pequeña y gran escala.

Conclusiones:

Se requiere de control y exigencia en el cumplimiento de la normativa ambiental en Cuba, que garantice la gestión adecuada de los residuos. La biorremediación es una alternativa confiable para la conservación y la sostenibilidad de los ecosistemas afectados por los hidrocarburos.

Palabras Clave: Disposición final; legislación; pasivos ambientales.

ABSTRACT

Introduction:

Bioremediation is an advanced and environmentally sustainable technology on a global scale that uses microorganisms to mitigate hydrocarbon pollution. Its application allows for the reuse of these waste materials and their transformation into usable products. Additionally, it facilitates the invention and implementation of innovative techniques to improve recycling and waste treatment processes. It generates an integrated approach to sustainability: economic development, social equity, and environmental protection.

Objective:

To analyze the mechanisms, types of bioremediation, and the integrative potential of its application, which represents an important step in environmental management and compliance with the regulatory framework in Cuba.

Materials and Methods:

No specific methodology was used; however, a Prisma-type review can be considered, which serves as support for systematic reviews.

Results and Discussion:

Technology transfer achieved by our country since the first decade of this century has allowed access to the knowledge associated with this technology from its inception worldwide, with subsequent contributions and achievements in research, application, and widespread use. Cost-effectiveness makes it an economically viable option for small- and large-scale cleanup projects.

Conclusions:

There is a need for control and enforcement of environmental regulations in Cuba to ensure the proper management of waste. Bioremediation is a reliable alternative for the conservation and sustainability of ecosystems affected by hydrocarbons.

Keywords: Final provision; legislation; environmental liabilities.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, debido a la gran demanda a nivel mundial en el uso de los hidrocarburos se ocasionan graves impactos en la fertilidad, propiedades y uso del suelo, así como también a las personas, flora y fauna (Campos-Romero et al., 2023). El suelo se ve afectado por la degradación química, debido a la acumulación de sustancias tóxicas en concentraciones excedentes a su poder amortiguador natural y la modificación negativa de sus

propiedades, produciendo la disminución o pérdida de su total fertilidad; además de generar un impacto negativo social, económico, ambiental y en la salud (Peña et al., 2019). Ante ello, la biorremediación emerge como una tecnología de remediación ambientalmente sostenible, al aprovechar la capacidad metabólica de microorganismos para degradar contaminantes en compuestos menos tóxicos o inertes, ofreciendo una alternativa económica y eficaz comparada con los métodos físicos o químicos (Rivera et al., 2018).

En la literatura científica es posible encontrar los mecanismos microbianos, las diversas técnicas y la eficacia de la biorremediación a nivel internacional. Revisiones sistemáticas han cuantificado tasas de degradación y han identificado factores críticos de éxito en condiciones controladas y en el campo. En contraste, existe una brecha de investigación notable en la síntesis accesible y aplicada de este conocimiento global, cuando se centran en el potencial técnico o en contextos de países con amplios recursos, sin trasladar estas lecciones a marcos de aplicación práctica de países en desarrollo.

Cuba, a pesar de sus desafíos económicos, ha desarrollado una trayectoria notable en la investigación, adaptación y aplicación de estas técnicas, impulsada por una estrategia consciente de innovación y soberanía tecnológica. Sin embargo, el conocimiento generado permanece en gran medida disperso, sin una integración sistemática que permita seguir desarrollando la investigación e innovación, su generalización y alineación con el marco regulatorio actual.

La presente revisión tuvo como principal objetivo analizar los mecanismos, los tipos de biorremediación y el potencial integrador de su aplicación, lo que representa un paso importante en la gestión ambiental y el cumplimiento del marco regulatorio en Cuba.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente revisión no se empleó una metodología específica, sin embargo, puede considerarse una revisión tipo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and MetaAnalysis*), la cual sirve como soporte para las presentaciones de revisiones sistemáticas (Serrano et al., 2018). Se tuvieron en cuenta criterios de Elegibilidad, estructurado bajo el marco (*PICOS*), como se muestra en la figura 1:

- Población (P): Suelos y residuos sólidos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo.
 - Intervención (I) Técnicas de biorremediación (bioestimulación, etc.). Técnicas asociadas (biopilas, etc.).
 - Comparación(C): Ventajas y desventajas de la biorremediación en comparación con otros métodos.
 - Resultados(O): Eficacia de remediación, impacto integrador, marco regulatorio.
 - Tipo de Estudios(S): Artículos originales, revisiones, informes técnicos, normativas, (2000-2025).
-

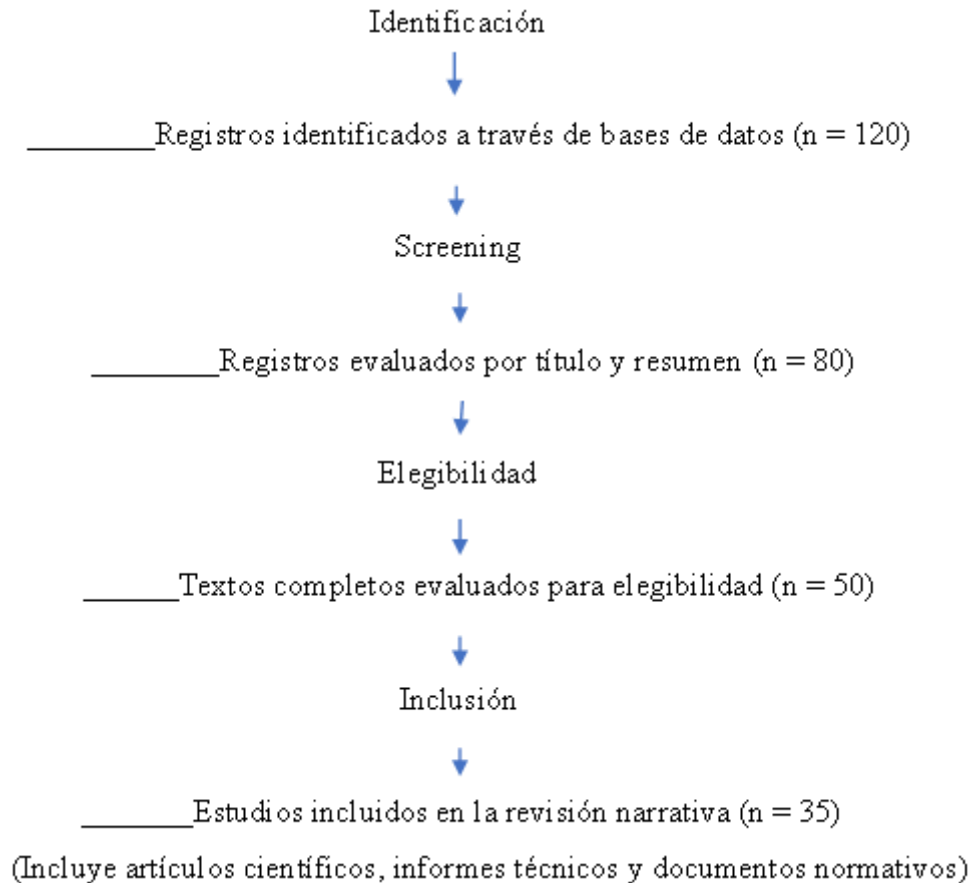


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA que ilustra el proceso de selección de estudios

Las fuentes de búsqueda se correspondieron con las bases de datos Scopus, Web of Science, SciELO y Google Académico. La búsqueda pública se centró en documentos normativos del CITMA y repositorios institucionales cubanos. Se utilizaron como estrategia de búsqueda: Términos como ("biorremediación" o "*bioremediation*") y ("hidrocarburos" o "*petroleum*") y ("suelo" o "*soil*") y ("Cuba"), junto con búsquedas específicas de leyes, Ley 150/2022 (GOC-2023-771-O87, (2023)), Resolución 93 (GOC-2023-781-087, (2023)) y normas cubanas ("NC 819, (2017)", " NC 1263, (2017)"). Los artículos consultados respondieron a las siguientes interrogantes: ¿Cuáles son los tipos de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos? ¿Cuál es el potencial integrador de la aplicación de la biorremediación para minimizar el impacto de los hidrocarburos en el suelo? ¿Qué normativas se establecen en cuba para la protección de los suelos, manejo y disposición final de los residuos de hidrocarburos?

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Mecanismos y tipos de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos

La biorremediación es una tecnología que utiliza microorganismos (bacterias, hongos, algas) o plantas para transformar o degradar contaminantes en el suelo en compuestos menos tóxicos o inocuos (Kumar et al., 2018). Para el caso específico de los hidrocarburos (derivados del petróleo), esta técnica se ha posicionado como una alternativa eficaz, económica y ambientalmente sostenible comparada con métodos físico-químicos tradicionales (Kalia et al., 2022). La degradación microbiana de hidrocarburos ocurre principalmente mediante metabolitos aeróbicos y anaeróbicos. En condiciones aeróbicas,

los microorganismos utilizan oxígeno molecular como aceptor final de electrones para oxidar los hidrocarburos. Enzimas clave como la oxigenasa (mono y di-oxigenasas) introducen átomos de oxígeno en la molécula del hidrocarburo, iniciando un proceso de degradación que generalmente sigue la vía de los ácidos grasos β -oxidación, culminando con la producción de CO₂, agua y biomasa (Konur, 2021). Los hidrocarburos de cadena lineal como los alcanos son generalmente más biodegradables que los de estructura compleja como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Su aplicación se sustenta en diferentes métodos y técnicas. Los principales tipos y/o métodos de biorremediación se clasifican en función de la estrategia de aplicación y los agentes biológicos utilizados (Konur, 2021):

1. Biorremediación Intrínseca (o Atenuación Natural): Capacidad natural de las comunidades microbianas autóctonas para degradar los contaminantes. Condiciones ambientales (nutrientes, oxígeno, pH, temperatura) que deben ser favorables para que los microorganismos actúen. Se utiliza en sitios donde la contaminación es baja y no representa un riesgo inmediato.
2. Bioestimulación: Crecimiento de la población microbiana indígena mediante la modificación de las condiciones del ambiente. Adición de nutrientes (principalmente fuentes de Nitrógeno y Fósforo), oxígeno (mediante aireación, adición de peróxidos o volteo del suelo), ajuste de la humedad y el pH. Técnica central en el manejo de la técnica de forma de cultivo (landfarming) y pilas de compostaje.
3. Bioaugmentación: Introducción de consorcios microbianos específicos (cepas aisladas endógenas o exógenas pre-adaptadas o comercialmente disponibles). Se emplea cuando la población indígena es insuficiente. Suele usarse en combinación con la bioestimulación.
4. Fitorremediación: Plantas y microorganismos asociados a su rizósfera (zona de suelo alrededor de las raíces) para remover, degradar o contener los contaminantes (Lee et al., 2025). Degradación mediante la exudación de compuestos que promueven la actividad microbial (rizodegradación), absorber los contaminantes (fitocumulación) o transformarlos en su tejido (fitodegradación).

Dentro de las técnicas que permiten su aplicación, y las estrategias que combinan los métodos anteriores con el proceso y en aras de mejorar la eficiencia, se encuentran:

- Biolabranza (o Landfarming): Técnica ex situ que combina la labranza periódica del suelo (para airear) con la bioestimulación (adición de nutrientes y agua).
- Compostaje: Suelo contaminado con material orgánico (paja, estiércol) para crear un ambiente termofílico que acelera la degradación microbiana.
- Biopilas: Técnica ex situ donde el suelo se apila sobre una plataforma impermeable con un sistema de aireación mecánico o forzado y aplicación de nutrientes, optimizando el control del proceso.
- Bioventeo: Técnica in situ que inyecta aire y nutrientes en la zona no saturada del suelo para estimular la biodegradación aeróbica.

A continuación, se reflejan las ventajas y desventajas (Tabla 1):

Tabla 1. Ventajas y desventajas

<i>Técnica</i>	<i>Tipo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Biorremediación Intrínseca	In situ	Bajo costo, mínima intervención	Muy lenta, requiere monitoreo constante
Bioestimulación	In situ /Ex situ	Económica, aprovecha microbiota nativa	Dependiente de las condiciones ambientales
Bioaumentación	In situ /Ex situ	Alta eficacia para contaminantes complejos	Costo elevado de los consorcios
Biopilas	Ex situ	Alto control del proceso, eficiente para volúmenes medianos	Requiere infraestructura, costo de operación medio-alto.
Fitorremediación	In situ	Estéticamente positiva, muy baja intrusividad.	Muy lenta, limitada a contaminación superficial

3.2 Potencial integrador de la aplicación de la biorremediación

El potencial integrador de la biorremediación se manifiesta en varios niveles (Saxena et al., 2020; Kumar et al., 2018):

1. Integración de procesos naturales, técnicas innovadoras y técnicas avanzadas

- Atenuación natural + bioestimulación +composteo+ biorremediación mejorada: Capacidad metabólica de los microorganismos autóctonos (bacterias, hongos). Optimización de condiciones de trabajo: agregando nutrientes (fertilizantes como nitrógeno y fósforo y enmiendas orgánicas) y oxigenando el suelo (mediante labranza, volteo o inyección de aire), ajustando la humedad. Estudios demuestran que la bioestimulación puede incrementar las tasas de degradación de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) en un 30-50% respecto a la atenuación natural sola (Truskewycz et al., 2019).
- Técnicas de avanzadas (biouamentacion+ bioproductos): Cepas específicas aisladas o consorcios microbianos externos, especialmente seleccionados para degradar hidrocarburos complejos.

2. Integración con otras técnicas de remediación (biorremediación + fitorremediación): Plantas que exudan compuestos por sus raíces, que estimulan la actividad microbiana en la rizósfera. Esta sinergia se conoce como rizerremediación (Sharma et al., 2021). (Pretratamientos Físico-Químicos): Extracción de vapores del suelo, lavado de suelos o fijación y estabilización química, pueden reducir inicialmente la carga contaminante más concentrada (Pande et al., 2022). La combinación de un pretratamiento físico-químico con biorremediación posterior, puede reducir los costos totales del proyecto hasta en un 60-80% en comparación con el uso exclusivo de métodos físico-químicos (Espíndola et al., 2019).

3. Integración de aspectos económicos y de sostenibilidad

- Costo-efectividad: Comparada con métodos físicos (excavación y disposición en vertedero) o químicos (oxidación), la biorremediación es significativamente más

barata a largo plazo, especialmente para tratar grandes extensiones de suelo contaminado.

- Sostenibilidad: Tecnología "verde". No genera residuos secundarios peligrosos.

4. Integración Social y aceptación Pública: Alta aceptación por parte de las entidades regulatorias y protección de las comunidades locales.

- Cumplimiento Normativo: Normativas ambientales sobre calidad del suelo de una manera restaurativa, no solo de contención. Compromiso con la remediación verdadera y no solo con la mitigación inmediata.

5. Integración en la Gestión del Riesgo: Minimiza el impacto de los hidrocarburos al abordar el problema de raíz: la toxicidad. No se limita a contener o mover la contaminación; la destruye. Reduce el riesgo para la salud humana y elimina la lixiviación de contaminantes a acuíferos o su volatilización al aire. Restaura la funcionalidad ecológica del suelo.

Es crucial reconocer que su éxito depende de factores integrados:

- Tipo de contaminante: Los hidrocarburos livianos (gasolina) son más biodegradables que los pesados (alquitrán, aceites lubricantes, diésel).
- Condiciones ambientales: Temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes y oxígeno.
- Tiempo: Es un proceso que puede llevar meses o años, no es una solución instantánea. Sin embargo, hay mayor perjuicio por no iniciar.

La biorremediación trasciende su función remediadora al integrarse armónicamente en las tres dimensiones de la sostenibilidad:

- Ambiental: Recupera la funcionalidad y biodiversidad del suelo, evitando la lixiviación de contaminantes a aguas subterráneas.
- Económica: Reduce costos, comparado con métodos físico-químicos tradicionales. Los residuos tratados pueden ser reutilizados, promoviendo la economía circular.
- Social: Protección de la salud de ecosistemas y comunidades con el consiguiente ahorro económico en gastos por impactos o enfermedades.

3.3 Gestión ambiental en la actividad de los hidrocarburos en Cuba: Marco regulatorio.

La actividad de los hidrocarburos en Cuba es estratégica para la seguridad energética del país. Sin embargo, esta actividad conlleva inherentes riesgos ambientales. La gestión de estos impactos se realiza a través de un marco regulatorio específico y enfrenta desafíos únicos:

1. Marco Regulatorio Ambiental: El marco legal cubano para la protección del medio ambiente de la actividad de exploración, perforación, extracción, refinación y comercialización de los hidrocarburos en el país, es robusto y se estructura en varios niveles.

- A. Base Constitucional y Ley Marco: Constitución de la República de Cuba, (2019): El Artículo 16 establece que "el Estado protege el medio ambiente y los recursos naturales del país... y promueve su conservación y uso sostenible". Este principio rige todas las actividades económicas, incluida la de los hidrocarburos. Ley No. 150/2022 (GOC-2023-771-O87, (2023)): Es la legislación marco que rige la gestión ambiental en Cuba. Establece los principios, obligaciones e instrumentos para la protección del medio ambiente, el uso racional de los recursos naturales y la promoción del desarrollo sostenible. Es una Ley de
-

avanzada que moderniza la anterior legislación ambiental, Ley No. 81 (GOC-1997-368-EX8, (1997)).

- B. Legislación: Resolución 93 (GOC-2023-781-087, (2023)): Gestión de los desechos peligrosos. Norma Cubana NC 819, (2017): Manejo de fondaje de tanques de almacenamiento de petróleo y sus derivados. NC 1263, (2017): Manejo de residuos generados en las operaciones de pozos de petróleo y gas natural en tierra. Ambas normativas se conformaron a partir de regulaciones de la industria petrolera en consulta a criterios y normativas internacionales.
- C. Instituciones Involucradas: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA): Es el órgano rector de la política ambiental. Sus direcciones provinciales son las encargadas de fiscalizar el cumplimiento de las medidas de mitigación. Ministerio de Energía y Minas (MINEM): Otorga las licencias de exploración y explotación y vela por el cumplimiento de las normas técnicas y de seguridad industrial, que tienen un fuerte componente ambiental. Unión Cuba-Petróleo (CUPET): La empresa estatal a cargo de toda la actividad petrolera en Cuba. Es la responsable directa de implementar los sistemas de gestión ambiental en sus operaciones y en las de sus socios extranjeros.
- D. Instrumentos de Gestión Clave: Evaluación de Impacto Ambiental (EIA): Es obligatoria para todos los proyectos de exploración y explotación. Debe ser presentada y aprobada por el CITMA antes de que comience cualquier actividad. Licencia ambiental: Se emite tras la aprobación de la EIA y es el permiso para operar, sujeto al cumplimiento de las condiciones establecidas. Plan de Manejo Ambiental (PMA): Documento que detalla cómo se implementarán las medidas de mitigación, monitoreo y compensación durante todas las fases del proyecto. Plan de contingencia: Es obligatorio y debe estar diseñado para responder ante emergencias como derrames de petróleo o explosiones.

A pesar del marco legal existente, la aplicación efectiva de la gestión ambiental enfrenta importantes obstáculos: Presión económica y bloqueo: Sanciones financieras externas limitan severamente el acceso a tecnología de punta para la prevención y el control ambiental (ej: sistemas de monitoreo en tiempo real, equipos de contención de derrames de última generación, etc.). Complejidad geológica y riesgo operacional: El petróleo cubano se encuentra en formaciones geológicas complejas y a alta profundidad. Las limitaciones económicas derivan la utilización de lodos base diésel, que generan una alta contaminación en los cortes extraídos. Vulnerabilidad de los ecosistemas: Las operaciones se desarrollan en tierra cerca de costas y hacia el mar, en aguas próximas a arrecifes de coral, manglares y pastos marinos, ecosistemas extremadamente sensibles a la contaminación por hidrocarburos. Capacidad institucional y transparencia: Aunque el CITMA tiene autoridad, puede carecer de recursos humanos y técnicos suficientes para una supervisión constante y efectiva de todas las operaciones *onshore* y/o *offshore*. Dependencia de socios extranjeros: Como Cuba depende de compañías extranjeras para la exploración y explotación, la gestión ambiental efectiva depende en gran medida de los estándares y la seriedad de estos socios. La capacidad de CUPET y del CITMA para auditar y exigir el cumplimiento de estas empresas es crucial.

Cuba cuenta con un marco regulatorio ambiental bastante completo y bien estructurado para la actividad de los hidrocarburos, alineado con principios internacionales. Sin

embargo, enfrenta enormes desafíos económicos, tecnológicos y logísticos. El principal reto consiste en fortalecer la capacidad de implementación, vigilancia, exigencia y control. Es importante explotar las tecnologías desarrolladas desde la I+D+i y mantener un equilibrio extremadamente delicado entre la necesidad imperiosa de producción energética y la protección obligatoria de los valiosos y vulnerables ecosistemas terrestres, costeros y marinos. La biorremediación trasciende su función remediadora para posicionarse como una herramienta clave en el cumplimiento de la Agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Su aplicación directa contribuye al ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), mediante el desarrollo y despliegue de tecnologías ambientalmente sostenibles. Asimismo, es fundamental para avanzar hacia el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), al promover la economía circular y la valorización de residuos peligrosos de la industria energética. Finalmente, su objetivo central de recuperar ecosistemas degradados impacta directamente en el ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres), protegiendo la biodiversidad y restaurando la funcionalidad de los suelos.

3.4 Transferencia de tecnología, logros y avances, situación actual

La gestión ambiental llevada a cabo por la industria petrolera cubana desde los años 90 del pasado siglo, permitió, que a partir del año 2000 y por la transferencia tecnológica alcanzada, fuera posible la capacitación de especialistas, la investigación, desarrollo e innovación en tecnologías de tratamiento, destacándose acciones en la biorremediación para el manejo de muchos de los residuos generados por la industria petrolera. Tales acciones se han llevado a cabo durante más de 20 años. Los logros alcanzados son palpables en las diferentes publicaciones en revistas de impacto a nivel nacional e internacional, participación en eventos de igual magnitud, talleres, conferencias e intercambios institucionales, entre otros. Aunque pudiera parecer de nivel bajo el número de instituciones dedicadas a la temática, desde estas ha existido un capital humano altamente calificado y reconocido por sus aportes. Sin embargo, se requiere de un mayor esfuerzo y conjunto, de empresas, centros de investigación, universidades, organismos estatales, nuevas formas de gestión y órganos regulatorios.

Hoy se logra la asistencia técnica para la biorremediación desde el “Procedimiento para remover hidrocarburos” que fuera patente concedida por Resolución No. 0695/2016 de la Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI) (Romero et al., 2016). Inversiones Gamma S. A. es una empresa adscrita al CITMA y encargada de la comercialización de servicios y tecnologías integrales en Cuba provenientes de las actividades científicas y medioambientales. En este sentido ofrece los servicios de asistencia técnica para la biorremediación, mediante el manejo y disposición final de los residuos de hidrocarburos y pasivos ambientales (OCPI, 2019).

3.5 Ejemplificación de un caso de estudio

A 1149 m³ de residuo sólido petrolizado (RSP), almacenados por una empresa de perforación y extracción de petróleo en el país, se le aplicó el procedimiento para remover hidrocarburos del petróleo combinando las técnicas de bioestimulación y bioaugmentación de los microorganismos presentes en el mismo, asistido por un producto de alta carga en nutrientes y microbiota degradadora de hidrocarburos. El RSP estaba compuesto

principalmente por suelos contaminados por hidrocarburos, de averías en el sistema de procesamiento y comercialización del petróleo crudo (salideros en oleoductos, almacenamiento, carga y descarga) y residuos de perforación que se generan en el proceso de extracción de petróleo. El procedimiento resultó satisfactorio en el tratamiento de 500 m³ de residuo, lográndose en 180 días de proceso, reducir los niveles de los parámetros, grasas y aceites e hidrocarburos totales del petróleo, desde un 15% y 10% respectivamente, hasta niveles cercanos al 4% y 2% respectivamente, lo que posibilitó realizar nuevas incorporaciones controladas del residuo (1000 m³), que fueron posteriormente tratados, alcanzando eficiencias de remoción superiores al 90% en 200 días y por debajo del límite permisible (1% de G/A e HC) de la normativa aplicable (NC 1263, (2017)) (Romero et al., 2016). Estos resultados se comparan favorablemente con los rangos de eficacia reportados a nivel internacional (80-95%) para técnicas de biorremediación (Marín, 2024).

4. CONCLUSIONES

La biorremediación se consolida como una tecnología sostenible y económicamente viable para la gestión de suelos contaminados por hidrocarburos en Cuba, demostrada mediante la aplicación exitosa de un procedimiento patentado, que logra eficiencias superiores al 90%. Si bien el país cuenta con un marco regulatorio robusto y avances significativos en investigación y transferencia tecnológica, persisten desafíos en la implementación efectiva debido a limitaciones económicas e institucionales, sumado a la falta de control y exigencia de un manejo adecuado de los residuos de hidrocarburos. La integración de esta técnica con otras estrategias de remediación, el fortalecimiento de la colaboración interinstitucional y el estricto cumplimiento normativo son esenciales para optimizar la gestión de residuos, minimizar riesgos ambientales y promover un desarrollo sostenible alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 9, 12 y 15, cerrando así el ciclo entre la innovación tecnológica, la protección ambiental y la responsabilidad social.

REFERENCIAS

- Campos-Romero, M. F, Li-Villacorta, J. M., Llaque-Fernández, G. I., Valderrama-Puscan, M. W., & Calvanapón-Alva, F. A. (2023). *Bioremediation of soils contaminated by hydrocarbons using animal manure, a systematic review during the years (2017–2022)*. 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, Buenos Aires, Argentina.
- Constitución de la República de Cuba (2019). Gaceta Oficial de la República de Cuba, proclamada el 10 de abril de 2019, edición extraordinaria, año CXVII, n.º 5 (G-2019-406-EX5), Cuba, pp. 69-115. <https://www.gacetaoficial.gob.cu/sites/default/files/goc-2019-ex5.pdf>
- Espíndola, D., Aparicio, J. D., Sáez, J. M., Benimeli, C. S., & Polti, M. A. (2019). *Combinación de metodologías de biorremediación y remediación química para el tratamiento de sistemas Co-contaminados*. XIV Jornadas Internas de Comunicaciones en Investigación, Docencia y Extensión; Tucumán; Argentina. <http://hdl.handle.net/11336/179762>
-

- GOC-2023-771-O87, (2023). Gaceta Oficial de la República de Cuba. Asamblea Nacional del Poder Popular (ANPP). Ley 150/2022. Del Sistema de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente, Cuba, pp. 2091-2297. <https://www.gacetaoficial.gob.cu/sites/default/files/goc-2023-o87.pdf>
- GOC-2023-781-087, (2023). Gaceta Oficial de la República de Cuba. Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Resolución 93. Control de las emisiones y transferencia de contaminantes, Cuba, pp. 2227-2283. <https://www.gacetaoficial.gob.cu/sites/default/files/goc-2023-o87.pdf>
- GOC-1997-368-EX8, (1997). Gaceta Oficial de la República de Cuba. Ley No. 81 del Medio Ambiente, Cuba, pp. 47-68. https://www.gacetaoficial.gob.cu/sites/default/files/go_x_007_1997.pdf
- Kalia, A., Sharma, S., Semor, N., Babele, P. K., Sagar, S., Bhatia, R. K. & Walia, A. (2022). Recent advancements in hydrocarbon bioremediation and future challenges: a review. *3 Biotech*, 12, 135. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03199-y>
- Konur, O. (2021). Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils: A review of the research. *Petrodiesel Fuels*, 3, 995-1013. <https://doi.org/10.1201/9780367456252-11>
- Kumar, V., Shahi, S. K., & Singh, S. (2018). *Bioremediation: An Eco-sustainable Approach for Restoration of Contaminated Sites*. In *Microbial Bioprospecting for Sustainable Development* (pp. 115–136). https://doi.org/10.1007/978-981-13-0053-0_6
- Lee, Y.-Y., Cho, K.-S., & Yun, J. (2025). Phytoremediation Strategies for Co-Contaminated Soils: Overcoming Challenges, Enhancing Efficiency, and Exploring Future Advancements and Innovations. *Processes*, 13(1), 132. <https://doi.org/10.3390/pr13010132>
- Marín, T. D. (2024). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica: revisión entre 2010-2023. *Revista Estudios Ambientales*, 12(1), 27-43. <https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-ambientales/article/view/2278>
- NC 819, (2017). Norma Cubana. Manejo de Fondaje de Tanques de Almacenamiento de Petróleos y sus Derivados (onshore), Oficina Nacional de Normalización (ONN), La Habana, Cuba, pp. 02-30.
- NC 1263, (2017). Norma Cubana. Manejo de residuos generados en las operaciones de pozos de petróleo y gas natural en tierra, Oficina Nacional de Normalización (ONN), La Habana, Cuba, 2017, pp. 1-20.
- OCPI, (2023). Oficina Cubana de la Propiedad Industria. Boletín de patentes en dominio público. Sector. Tecnologías Medioambientales, Cuba, pp. 16. <https://www.ocpi.cu/sites/default/files/archivos/bpdp/medioambiente2024.pdf>
- Pande, V., Pandey, S. C., Sati, D., Bhatt, P., & Samant, M. (2022). Microbial Interventions in Bioremediation of Heavy Metal Contaminants in Agroecosystem. *Front Microbiol.*, 13, 824084. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.824084>
- Peña, S. E, Zambrano, E, Baquerizo, J., Antón, A., & Solórzano, K. (2019). Nuevos sistemas de tratamientos de suelo contaminado por hidrocarburos. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E21), 226–236.
-

<https://www.researchgate.net/publication/341699843>

- Rivera, P., Rivera, J. E., Andrade, E. C., Heyer, L., Garza, F. R., & Castro, B. I. (2018). Bioestimulación y biorremediación de recortes de perforación contaminados con hidrocarburos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(2), 249–262. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.02.06>
- Romero, R., Díaz, M., & Núñez, A. (2016). Procedimiento para remover hidrocarburos del petróleo (Patente concedida No. 24189). Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI) No. Expediente CU/P/2013/000118, Resolución No.0695/2016, de 16/3/2016, Notificada 29/3/2016. <https://www.ocpi.cu/sites/default/files/archivos/boaa/338%20Junio.pdf>
- Saxena, G., Kumar, V., & Shah, M. P. (2020). *Bioremediation for Environmental Sustainability: Toxicity, Mechanisms of Contaminants Degradation, Detoxification and Challenges*. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/edited-volume/9780128205242/bioremediation-for-environmental-sustainability>
- Serrano, C., Schreier, C., & Jumpa, M. (2018). Criterios de clasificación de la vivienda informal: una revisión sistemática PRISMA como herramienta para establecimiento y análisis de categorías. *rita_revista indexada de textos académicos*, (10), 98-103. Repositorio Universidad de Lima. <https://hdl.handle.net/20.500.12724/7387>
- Sharma, P., Pandey, A. K., Udayan, A., & Kumar, S. (2021). Role of microbial community and metal-binding proteins in phytoremediation of heavy metals from industrial wastewater. *Bioresource Technology*, 326, 124750. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124750>
- Truskewycz, A., Gundry, T. D., Khudur, L. S., Kolobaric, A., Taha, M., Aburto-Medina, A., Ball, A. S., & Shahsavari, E. (2019). Petroleum Hydrocarbon Contamination in Terrestrial Ecosystems-Fate and Microbial Responses. *Molecules*, 24(18), 3400. <https://doi.org/10.3390/molecules24183400>

CONFLICTO DE INTERÉS

- El autor no presenta conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Roberto Romero Silva. Gestión de proyecto, investigación, metodología, redacción - revisión y edición.