

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO

INFORME DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN ECUADOR (2019-2025).

Autores:

SOLANGE DEL ROCIO LITUMA CARRIEL
MARÍA ELENA SÁNCHEZ DÍAZ

Director:

Msc. Mirella Azucena Correa Peralta

Milagro, 2025

Derechos de Autor

Sr. Dr.

Fabricio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, María Elena Sánchez Díaz y Solange del Rocio Lituma Carriel, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de Magíster en Biotecnología, como aporte a la Línea de Investigación Medición y Control Ambiental de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 22 de junio del 2025

María Elena Sánchez Díaz

C.I.: 2101169247

Solange del Roció Lituma Carriel

C.I.: 0930912688

Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación

Yo, Mirella Azucena Correa Peralta, en mi calidad de director del trabajo de titulación, elaborado por María Elena Sánchez Díaz y Solange del Rocio Lituma Carriel, cuyo tema es Análisis bibliométrico de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025), que aporta a la Línea de Investigación Medición y Control Ambiental, previo a la obtención del Grado Magíster en Biotecnología. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo APRUEBO, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 22 de junio del 2025

Mirella Azucena Correa Peralta

CI. 0919615906

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO
ACTA DE SUSTENTACIÓN
MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

En la Facultad de Posgrado de la Universidad Estatal de Milagro, a los cinco días del mes de agosto del dos mil veinticinco, siendo las 10:00 horas, de forma VIRTUAL comparece el/la maestrante, SANCHEZ DIAZ MARIA ELENA, a defender el Trabajo de Titulación denominado " ANÁLISIS BIBLIOMETRICO DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN ECUADOR (2019-2025)", ante el Tribunal de Calificación Integrado por: Mgs VILLAVICENCIO YANOS CHRISTIAN MIGUEL, Presidente(a), Msc. CARPIO ARIAS MARCELA MARICELA en calidad de Vocal; y, Phd CRUZ SARMIENTO DARIO JAVIER que actúa como Secretario/a.

Una vez defendido el trabajo de titulación; examinado por los integrantes del Tribunal de Calificación, escuchada la defensa y las preguntas formuladas sobre el contenido del mismo al maestrante compareciente, durante el tiempo reglamentario, obtuvo la calificación de: **98.33** equivalente a: **EXCELENTE**.

Para constancia de lo actuado firman en unidad de acto el Tribunal de Calificación, siendo las 11:00 horas.



Mgs VILLAVICENCIO YANOS CHRISTIAN MIGUEL
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



Msc. CARPIO ARIAS MARCELA MARICELA
VOCAL



Phd CRUZ SARMIENTO DARIO JAVIER
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL



SANCHEZ DIAZ MARIA ELENA
MAGÍSTER

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO
ACTA DE SUSTENTACIÓN
MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

En la Facultad de Posgrado de la Universidad Estatal de Milagro, a los cinco días del mes de agosto del dos mil veinticinco, siendo las 10:00 horas, de forma VIRTUAL comparece el/la maestrante, ING LITUMA CARRIEL SOLANGE DEL ROCIO, a defender el Trabajo de Titulación denominado " ANÁLISIS BIBLIOMETRICO DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN ECUADOR (2019-2025)", ante el Tribunal de Calificación Integrado por: Mgs VILLAVICENCIO YANOS CHRISTIAN MIGUEL, Presidente(a), Msc. CARPIO ARIAS MARCELA MARICELA en calidad de Vocal; y, Phd CRUZ SARMIENTO DARIO JAVIER que actúa como Secretario/a.

Una vez defendido el trabajo de titulación; examinado por los Integrantes del Tribunal de Calificación, escuchada la defensa y las preguntas formuladas sobre el contenido del mismo al maestrante compareciente, durante el tiempo reglamentario, obtuvo la calificación de: 98.67 equivalente a: EXCELENTE.

Para constancia de lo actuado firman en unidad de acto el Tribunal de Calificación, siendo las 11:00 horas.



Mgs VILLAVICENCIO YANOS CHRISTIAN MIGUEL
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



Msc. CARPIO ARIAS MARCELA MARICELA
VOCAL



Phd CRUZ SARMIENTO DARIO JAVIER
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL



ING LITUMA CARRIEL SOLANGE DEL ROCIO
MAGÍSTER

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, pilares fundamentales de nuestra formación personal y profesional, quienes nos brindaron su amor incondicional, paciencia y fortaleza en cada etapa de este proceso.

A nuestros padres, por enseñarnos el valor del esfuerzo y la perseverancia; a nuestras madres, por su infinita sabiduría y compañía constante.

Dedicamos también este logro a nuestras comunidades, en especial a aquellas afectadas por la contaminación de sus suelos, como inspiración para que la ciencia se convierta en un verdadero instrumento de transformación social y ambiental.

Finalmente, dedicamos este esfuerzo a nosotras mismas, por nunca rendirnos, por sostenernos mutuamente en los momentos de mayor desafío y por creer firmemente en el poder de la colaboración y el conocimiento compartido.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Dios, fuente de fortaleza, esperanza y sabiduría en todo momento.

Agradecemos a nuestras familias, quienes fueron nuestro mayor soporte emocional y espiritual durante todo el proceso académico. Sin su amor, comprensión y respaldo incondicional, este logro no habría sido posible.

A nuestra tutora Mirella Correa, quien con su guía, experiencia y exigencia académica nos motivó a dar lo mejor de nosotras y construir una investigación con sentido y calidad.

A la Universidad Estatal de Milagros y al programa de Maestría en Biotecnología Aplicada, por brindarnos las herramientas técnicas y humanas para abordar problemas reales con rigor científico y compromiso social.

A nuestras compañeras y compañeros de clase, por compartir conocimientos, dudas y alegrías; y a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la culminación de este proyecto.

Finalmente, nos agradecemos mutuamente por la constancia, el respeto, la solidaridad y la determinación con que enfrentamos este reto académico y humano.

Resumen

La siguiente investigación tiene como objetivo analizar el estado actual de la producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador durante el periodo 2019-2025, mediante un estudio bibliométrico. Para ello, se recopiló y procesó estudios científicos de la base de datos Scopus, con ayuda de Biblioshiny (RDtudio) y Google Colab para análisis y visualización de indicadores claves: técnicas, organismos, estrategias de biorremediación, publicaciones por año, estudios más citados, afiliaciones nacionales, cooperaciones internacionales, redes de coautorías y cuartiles de las revistas. Los resultados presentan un crecimiento sostenible en la producción científica, con un pico significativo en los años 2022 y 2023. Las técnicas de biorremediación más empleadas fueron bioaumentación, fitorremediación y uso de microorganismos autóctonos predominando el género *Pseudomonas*, reflejando una preferencia por metodologías sostenibles y adaptadas a condiciones locales. Las principales afiliaciones nacionales son universidades públicas como la Universidad de las Fuerzas Armadas, Universidad Nacional de Chimborazo, Universidad Técnica de Manabí. Las cooperaciones Internacionales, aunque son pocas, pero se encuentran países como México, España, Italia, Brasil y Venezuela. A pesar del avance, la mayoría de las investigaciones se publican en revistas de cuartiles bajos, lo que limita su visibilidad internacional. Se concluye que es importante fortalecer redes de colaboraciones nacionales e internacionales y ampliar el análisis bibliométrico hacia fuentes documentales no indexadas para lograr una visión más integral del desarrollo científico en esta área en contexto ecuatoriano.

Palabras claves: *Biorremediación, hidrocarburos, suelos contaminados, Ecuador, Scopus.*

Abstract

The following research aims to analyze the current state of scientific production on bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils in Ecuador during the period 2019-2025, through a bibliometric study. To this end, scientific studies were collected and processed from the Scopus database, with the help of Biblioshiny (RStudio) and Google Colab for the analysis and visualization of key indicators: techniques, organisms, bioremediation strategies, publications per year, most cited studies, national affiliations, international collaborations, co-author networks, and journal quartiles. The results show sustainable growth in scientific production, with a significant peak in 2022 and 2023. The most widely used bioremediation techniques were bioaugmentation, phytoremediation, and the use of native microorganisms, predominantly of the genus *Pseudomonas*, reflecting a preference for sustainable methodologies adapted to local conditions. The main national affiliations are public universities such as the University of the Armed Forces, the National University of Chimborazo, and the Technical University of Manabí. International cooperation, although limited, includes countries such as Mexico, Spain, Italy, Brazil, and Venezuela. Despite the progress, most of the research is published in low-quartile journals, which limits its international visibility. It is concluded that it is important to strengthen national and international collaboration networks and expand bibliometric analysis to include non-indexed documentary sources in order to achieve a more comprehensive view of scientific development in this area in the Ecuadorian context.

Keywords: *Bioremediation, hydrocarbons, contaminated soils, Ecuador, Scopus*

Lista de Figuras

FIGURA 1. PASOS METODOLÓGICOS PARA BÚSQUEDA, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS. ____	34
FIGURA 2. CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN APLICADOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS ESTUDIOS _____	36
FIGURA 3. ESQUEMA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS DATOS. _____	37
FIGURA 4. PROCESO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS. _____	37
FIGURA 5. PRINCIPALES HERRAMIENTAS USADAS. _____	38
FIGURA 6. NUBE DE PALABRAS DE LAS TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN MÁS FRECUENTES EN ESTUDIOS CIENTÍFICOS EN EL PERIODO DE 2019 A 2025 EN ECUADOR. _____	44
FIGURA 7. CLASIFICACIÓN DE LOS ORGANISMOS UTILIZADOS PARA LOS ESTUDIOS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN ECUADOR. ____	45
FIGURA 8. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PRODUCCIÓN ECUATORIANA. _____	49
FIGURA 9. EVOLUCIÓN DE LOS AUTORES EN LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA LATINOAMERICANA. _____	51
FIGURA 10. TOP DE LOS PAÍSES LATINOAMERICANOS MÁS CITADOS _____	51
FIGURA 11. NUMERO DE CITAS EN LOS ESTUDIOS DE ECUADOR. _____	52
FIGURA 12. COACTARÍAS DE ESTUDIOS DE ECUADOR. _____	54
FIGURA 13. AFILIACIONES INSTITUCIONALES EN PUBLICACIONES CIENTÍFICAS DE ECUADOR. 55	
FIGURA 14. AFILIACIONES MÁS RELEVANTES DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS SOBRE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN AMÉRICA LATINA _____	56
FIGURA 15 MAPA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS COOPERACIONES INTERNACIONALES CON LOS ESTUDIOS DE ECUADOR. _____	57
FIGURA 16. FUENTES PRINCIPALES DE LOS ESTUDIOS CIENTÍFICOS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN ECUADOR. _____	58
FIGURA 17. MAPA DE ECUADOR CON LA UBICACIÓN DEL DESARROLLO DE LOS ESTUDIOS CIENTÍFICOS _____	59

Lista de Tablas

TABLA 1. VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES.	8
TABLA 2. ARTÍCULOS EN EL CONTEXTO ECUADOR SOBRE BIORREMEDIACIÓN.	18
TABLA 3. TÉCNICAS UTILIZADAS EN ESTUDIOS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN AMÉRICA LATINA	22
TABLA 4. PLANTAS UTILIZADAS EN ESTUDIOS DE BIORREMEDIACIÓN EN AMÉRICA LATINA.	24
TABLA 5. HONGOS UTILIZADOS EN ESTUDIOS DE BIORREMEDIACIÓN EN AMÉRICA LATINA.	25
TABLA 6. MICROORGANISMOS BACTERIANOS UTILIZADOS EN ESTUDIOS DE BIORREMEDIACIÓN EN AMÉRICA LATINA.	25
TABLA 7. TÉCNICAS EMPLEADAS EN LOS ESTUDIOS DE BIORREMEDIACIÓN EN ECUADOR.	40
TABLA 8. FRECUENCIAS DE TÉRMINOS TÉCNICOS RELACIONADOS CON LAS TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN.	43
TABLA 9. ORGANISMOS UTILIZADOS EN LOS ESTUDIOS DE BIORREMEDIACIÓN EN ECUADOR.	44
TABLA 10. CONDICIONES SOCIOECONÓMICAS Y AMBIENTALES QUE SE ASOCIAN A LA APLICACIÓN DE ESTRATEGIAS DE BIORREMEDIACIÓN.	46
TABLA 11. INDICADORES BIBLIOMÉTRICOS SOBRE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS.	50
TABLA 12. COOPERACIONES INTERNACIONALES EN LOS ESTUDIOS DE ECUADOR.	56
TABLA 13. CUARTILES EN LAS FUENTES ESTUDIOS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS EN ECUADOR (2019-2025).	58

Índice / Sumario

Introducción	1
CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación	4
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Delimitación del problema	4
1.3. Formulación del problema	5
1.4. Preguntas de investigación	5
1.5. Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos específicos.	6
1.6. Hipótesis	7
1.7. Justificación	7
1.8. Declaración de las variables (Operacionalización)	7
CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial	10
2.1. Antecedentes Referenciales	10
2.1.1. Estudios internacionales	10
2.2. Marco Conceptual	19
2.3. Marco Teórico	26
CAPÍTULO III: Diseño Metodológico	32
3.1. Tipo y diseño de investigación	32
3.2. Los métodos y las técnicas	32
3.2.1. Métodos	33
3.2.1. Técnicas	34
3.3. La población y la muestra	35
3.3.1. Población	35

3.3.2. Muestra	36
3.4. Procesamiento Estadístico de la Información	37
3.4.1. Herramientas Utilizadas	38
CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados	39
CAPÍTULO V: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones	61
5.1. Discusión	61
5.2. Conclusiones	61
5.3. Recomendaciones	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
ANEXOS	80

Introducción

El suelo, es considerado un recurso no renovable, desempeña múltiples funciones esenciales para el beneficio de todos los ecosistemas y el bienestar humano. Actúa como hábitat de organismos, reserva genética, sumidero de carbono, sistema natural de almacenamiento, filtrado de sustancias, es la base para la producción de alimentos, biomasa y materias primas necesarias para diversas actividades económicas (Hidalgo-Lasso et al., 2024).

Sin embargo, la extracción y el transporte de hidrocarburos, realizados diariamente en todo el mundo, implican un riesgo ambiental significativo, siendo los derrames accidentales una de las principales causas de degradación severa a los suelos (Pozo-Rivera et al., 2023). En casos de los países megadiversos la economía depende en gran medida de la actividad petrolera, estos eventos generan impactos ecológicos críticos, especialmente en regiones sensibles como la Amazonía (Camacho et al., 2024).

Además de los impactos ecológicos, la presencia de hidrocarburos en el suelo representa un riesgo para la salud pública, ya que el crudo contiene compuestos orgánicos e inorgánicos con efectos tóxicos. Entre ellos destacan los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), conocidos por su carácter genotóxico y cancerígeno, capaces de alterar funciones hepáticas y renales tanto en humanos como en animales (Wei et al., 2024).

Frente a este panorama, la biotecnología ha desarrollado técnicas como la biorremediación, que busca restaurar suelos contaminados mediante el uso de microorganismos, plantas o enmiendas orgánicas, reduciendo la concentración de contaminantes sin generar residuos secundarios tóxicos (Andrade et al., 2024).

En Ecuador, han demostrado el potencial de la biorremediación enfoques como el uso de biocarbón a partir de residuos agroindustriales como la cáscara de arroz y el

aprovechamiento de bacterias nativas capaces de tolerar y degradar compuestos derivados de hidrocarburos (Andrade et al., 2024),

En la central Termoesmeraldas de Ecuador, se evidenció la eficacia de técnicas como la bioaumentación mediante la utilización de *Pseudomonas aeruginosa*, una bacteria originalmente aislada de una mina de esquisto bituminoso en Riutort, España, estas bacterias, reconocidas por su capacidad para degradar compuestos derivados del petróleo incluso en condiciones ambientales adversas, fueron posteriormente empleadas sobre suelos contaminados con lodos aceitosos recolectados en sitios de derrame controlado en La Libertad, costa suroccidental del Ecuador, los resultados demostraron el potencial de los consorcios microbianos adaptados para ser transferidos con éxito a contextos tropicales, mediante el uso de tecnologías avanzadas de monitoreo y control (González-Toril et al., 2023)

A pesar de que en Ecuador se han desarrollado estudios significativos sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, su número continúa siendo muy limitado en comparación con la producción científica a nivel global (Andrade et al., 2024). Este desfase pone en evidencia la necesidad de analizar el estado actual de la investigación ecuatoriana, identificar sus vacíos temáticos, autores más productivos, colaboraciones institucionales y las metodologías predominantes utilizadas. Así, este estudio se propone realizar un análisis bibliométrico con enfoque descriptivo comparativo que permita caracterizar y discutir la evolución del conocimiento científico en esta materia en el país, en contraste con tendencias latinoamericanas y globales.

Desde una perspectiva teórica metodológica, esta investigación se enmarca en el paradigma cuantitativo, empleando técnicas bibliométricas apoyadas en software de análisis de redes de coautoría, palabras clave y co-citación. La base de datos seleccionada para la

recolección fue Scopus, dada su alta cobertura de literatura científica y sus herramientas de exportación estructurada. El periodo de análisis abarca desde el año 2019 hasta el 06 de junio del 2025, permitiendo una visión longitudinal de la evolución de este campo de estudio.

CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación

1.1. Planteamiento del problema

El tema de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de procedencia petrolera, actualmente se convierte en un claro desafío ambiental para Ecuador. Debido a la dependencia económica a nivel nacional de la explotación petrolera, por lo que la evidencia de que existan derrames hidrocarburíficos es común y con más referencia a regiones amazónicas. Dicho problema ambiental afecta la biodiversidad y los recursos naturales de los que son fuentes de subsistencia de muchas comunidades locales. El mencionado problema ambiental además de plantear desafíos ambientales, se enfrenta en busca de soluciones sociales y económicas, para mitigar los altos costos de restauración ecológica y ambiental.

A pesar de que se han dado pasos importantes en el desarrollo de investigaciones sobre biorremediación, aún existe poca información consolidada que permita identificar con claridad las tendencias, los enfoques predominantes y los vacíos de conocimiento en este campo dentro del contexto ecuatoriano. Frente a esta necesidad, el análisis bibliométrico se presenta como una herramienta útil para sistematizar y evaluar el estado de la producción científica. A través de esta metodología, es posible entender cómo han evolucionado los estudios sobre biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos, qué técnicas y organismos se han utilizado y qué regiones del país han sido más afectadas o menos atendidas en términos de investigación.

Ecuador, al ser un país con gran diversidad biológica y condiciones ecológicas particulares, requiere con urgencia estrategias de remediación sostenibles que se adapten a sus realidades locales. Sin embargo, muchas investigaciones existentes no logran contextualizar adecuadamente sus hallazgos o se encuentran dispersas, lo que dificulta su

aprovechamiento para la toma de decisiones informadas y el diseño de soluciones efectivas. Por esta razón, se hace necesario un análisis bibliométrico profundo que recopile, ordene y analice las investigaciones sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador. Este análisis permitirá no solo conocer el estado actual del conocimiento en el país, sino también orientar futuras investigaciones, políticas públicas y acciones concretas para enfrentar este problema ambiental de manera más integral y contextualizada.

1.2. Delimitación del problema

El presente estudio se limita temporalmente al periodo 2019 hasta el 6 de junio del 2025. Se consideran únicamente las publicaciones científicas indexadas en la base de datos de Scopus, que se refieran a la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, desde el contexto latinoamericano y con perspectiva principalmente en el Ecuador.

Desde el punto de vista conceptual, este estudio se centrará en identificar las técnicas empleadas, los organismos investigados, las colaboraciones académicas, además se va a analizar las condiciones socioeconómicas y ambientales que se asocian a la aplicación de estrategias de biorremediación. Se excluyen las investigaciones que tienen relación con otro tipo de contaminación o tecnologías distintas al enfoque biológico.

1.3. Formulación del problema

¿Cuál es el estado actual (enfoques temáticos, metodológicos, redes de colaboración e impacto académico) de la producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025), según la base de datos de Scopus?

1.4. Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son las líneas temáticas predominantes, organismos y metodologías utilizadas en estudios sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025)?

- ¿Cómo ha evolucionado la producción científica sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador y que nivel de impacto académico (citaciones, Índice h, Cuartiles u otros) ha alcanzado en Ecuador (2019-2025)?
- ¿Qué redes de colaboración (autores, instituciones, países) existen sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025)?
- ¿Cuáles son las principales revistas/fuentes de publicación y nivel de calidad según su cuartil sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025)?

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar el estado actual de la producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025) mediante un estudio bibliométrico basado en base de datos Scopus, identificando tendencias temáticas, metodológicas aplicadas, redes de colaboración e impacto científico.

1.5.2 Objetivos específicos.

- Identificar las líneas temáticas, organismos biorremediadores aplicados y metodologías mediante análisis de contenido bibliométrico de suelos contaminados con hidrocarburos en el Ecuador (2019-2025)
- Evaluar la evolución temporal y cuantificar el impacto mediante un análisis de indicadores bibliométricos sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025).

- Mapear las redes de colaboración (Coautorías, afiliaciones institucionales y cooperación internacional) mediante un análisis de redes bibliométricas sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025).
- Identificar las revistas/ fuentes principales y evaluar su calidad (cuartil) mediante un análisis de fuentes sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025).

1.6. Hipótesis

Hipótesis Nula: No existen patrones significativos ni un desarrollo metodológico o temático consolidado en la producción científica ecuatoriana sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos entre 2019 y 2025; además, esta producción carece de visibilidad internacional y no refleja prácticas replicables alineadas con el contexto socioambiental del país.

Hipótesis alternativa: La producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador entre 2019 y 2025 muestra una presencia creciente, con enfoques metodológicos sostenibles y contextualmente adaptados, pero con limitada visibilidad internacional debido a la baja presencia en revistas de alto impacto y redes de colaboración débilmente consolidadas.

1.7. Justificación

La contaminación de suelos por hidrocarburos representa un reto ambiental significativo para países con actividad petrolera como Ecuador. Aunque se trata de una problemática urgente, llama la atención la escasa producción científica nacional relacionada con la biorremediación de estos suelos. En este contexto, el presente estudio ofrece una mirada novedosa al enfocarse en un análisis bibliométrico de los aportes científicos existentes sobre biorremediación, especialmente aquellos desarrollados dentro del territorio ecuatoriano. Para

ello, se recurrió a la base de datos Scopus, reconocida internacionalmente por su rigurosidad y por albergar publicaciones de alta calidad y relevancia científica. A través de este análisis, se logra identificar las técnicas más utilizadas, los organismos aplicados, los vacíos en el conocimiento y las redes de colaboración científica que han marcado la pauta en este campo. Este estudio está pensado para beneficiar directamente a investigadores, universidades, centros de investigación, entidades ambientales y tomadores de decisiones relacionados con la gestión de suelos contaminados. Al visibilizar de manera sistemática la producción científica nacional, se busca contribuir al fortalecimiento de las políticas de investigación, priorizar temáticas clave y orientar de forma más estratégica el financiamiento hacia estudios con mayor pertinencia local. Los resultados pueden servir de base para el desarrollo de estrategias educativas y curriculares, al ofrecer un panorama claro de las áreas de mayor necesidad e impacto, este trabajo busca no solo sistematizar el conocimiento actual, sino también trazar un mapa actualizado que facilite la toma de decisiones tanto en el ámbito académico como en la gestión ambiental, promoviendo soluciones prácticas y sostenibles para los desafíos que enfrenta el país.

1.8. Declaración de las variables (Operacionalización)

Tabla 1. Variables dependientes e independientes.

Variable	Tipo	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de recolección
Producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos	Principal Integradora	/ - Temporal - Geográfica - Disciplinaria	- Total de publicaciones en bases académicas. - Distribución geográfica, de publicación. - Vacíos temáticos. - Áreas emergentes no desarrolladas.	Revisiones bibliográficas de artículos científicos en Scopus, exportación de datos Excel, Software Colab, R, Bibliometrix
Indicadores	Independiente	-	- Autores más productivos	Matriz de datos exportada

bibliométricos	Productividad - Instituciones afiliadas desde Scopus ad - Países con mayor Análisis de frecuencia y - producción co-ocurrencia con Colaboración - Revistas más frecuentes Biblioshiny n - Palabras clave más - Difusión utilizadas
Participación Independiente científica de Ecuador	- Número de artículos con Filtro geográfico por país Cuantitativa autores ecuatorianos en Scopus -Cualitativa - Tipos de documentos Revisión de afiliaciones publicados (artículos, revisiones, conferencias) - Colaboraciones internacionales
Vacíos de Dependiente investigación y tendencias	-Enfoques -Tipos de metodologías Análisis de contenido metodológicos utilizadas temático y mapa de os (bioestimulación, términos en VOSviewer / -Líneas bioaumentación, Bibliometrix/ Colab emergentes fitorremediación, etc.) - Ausencias - Problemas o temas poco temáticas abordados en Ecuador - Temas emergentes identificados por análisis de palabras clave y co- ocurrencias

Nota. Elaborado por los autores 2025.

CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial

2.1. Antecedentes Referenciales

2.1.1. Estudios internacionales y Ecuador.

La biorremediación ha emergido como una estrategia sostenible lo cual ha evolucionado mediante el uso de enfoques biotecnológicos avanzados generado un interés creciente en todo el mundo. No obstante, estas investigaciones se han desarrollado mayormente en contextos no tropicales, generando un desbalance geográfico en su aplicabilidad para regiones como América Latina (Hoang et al., 2021). Pese a ello, estudios intercontinentales han subrayado el potencial de la biorremediación en regiones tropicales, destacando la importancia de factores como la selección adecuada de plantas y microorganismos, así como la bioaccesibilidad de los contaminantes (Hoang et al., 2021).

En Canadá, desarrollaron un consorcio bacteriano sintético con capacidad para producir enzimas activas a bajas temperaturas, evidenciando el progreso científico en condiciones ambientales extremas. Su ensayo, implementado en columnas de suelo simuladas, logró una reducción significativa de hidrocarburos policíclicos aromáticos, lo que destaca el potencial de estas tecnologías en regiones de clima frío. Sin embargo, los autores no consideran escenarios con mayor vulnerabilidad ambiental, como los entornos tropicales y de países en desarrollo. Esta omisión representa una limitación importante en la aplicabilidad global de los resultados, y refuerza la necesidad de estudios que visibilicen estos vacíos mediante análisis bibliométricos sistemáticos. En este sentido, el presente trabajo se plantea como una contribución orientada a identificar las dinámicas investigativas en torno a la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, con especial énfasis en Ecuador, una región megadiversa donde estos enfoques son escasamente abordados desde la evidencia científica (Davoodi et al., 2023)

En cambio, un estudio realizado en China evaluó los cambios en la diversidad microbiana del suelo tras la contaminación con crudo, diésel y gasolina, revelando una notable disminución en la diversidad de comunidades bacterianas y fúngicas, así como un enriquecimiento selectivo de cepas degradadoras. Entre los hallazgos más relevantes, se destaca el aislamiento de dos cepas bacterianas, *Serratia marcescens* PL y *Raoultella ornithinolytica* PS, capaces de degradar más del 75% de los hidrocarburos en condiciones controladas. Cuando se combinaron, estas cepas alcanzaron una eficiencia de biodegradación del 96.83%, eliminando incluso compuestos altamente recalcitrantes como fitano y pristano. Estos resultados evidencian el potencial de consorcios microbianos adaptados para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, aunque la mayoría de estos estudios se han desarrollado en contextos urbanos o industriales no tropicales, lo que subraya la necesidad de generar conocimiento localizado en regiones como América Latina y, particularmente, en ecosistemas tropicales donde las condiciones edafoclimáticas y la biodiversidad microbiana difieren considerablemente (Bidja Abena et al., 2020).

En las investigaciones en Australia (Dike et al., 2024), el biocarbon ha emergido como una alternativa prometedora para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, debido a su bajo costo, sostenibilidad ambiental y capacidad para mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo. Esta estrategia se ha centrado particularmente en su rol como agente bioestimulante, promoviendo el crecimiento microbiano y, por ende, la biodegradación de compuestos tóxicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y fracciones del petróleo. Según (Dike et al., 2021), el biochar favorece la actividad enzimática, mejora la retención de nutrientes y agua, y aumenta la porosidad del suelo, lo cual genera un ambiente favorable para la acción de bacterias degradadoras. Aunque estudios experimentales reportan

eficiencias de remoción superiores al 70% en condiciones controladas, también se identifican variabilidades significativas en los resultados, atribuibles a factores como el tipo de biomasa, la temperatura de pirólisis, y la interacción con nutrientes añadidos. Esto evidencia la necesidad de continuar investigando su aplicabilidad real en suelos tropicales y contextos de alta vulnerabilidad ambiental, como los presentes en países en desarrollo (Dike et al., 2021).

La biorremediación ha emergido como una de las alternativas más sostenibles frente a la creciente preocupación por la contaminación de suelos causada por hidrocarburos, especialmente en contextos donde los métodos fisicoquímicos resultan costosos, limitados o ambientalmente invasivos. Este interés creciente se refleja en un número significativo de estudios internacionales que priorizan el uso de técnicas biológicas en diversos ecosistemas contaminados (Hoang et al., 2021).

La relación entre la actividad petrolera y el medio ambiente ha generado controversias constantes en América Latina, una región donde las consecuencias de las actividades extractivas afectan tanto al entorno natural como a la salud de las poblaciones (Camacho et al., 2024).

Se han demostrado avances significativos en el uso de microorganismos autóctonos y residuos agroindustriales como herramientas clave para la biorremediación (Cruz-Narváez et al., 2019). En Brasil, por ejemplo, desarrollaron un biosurfactante sostenible a partir de *Serratia marcescens* UCP 1549, utilizando aguas residuales del procesamiento de yuca. Este compuesto mostró alta estabilidad frente a variaciones de pH, temperatura y salinidad, siendo capaz de remover hasta un 94% de aceite quemado de arena contaminada, lo que valida su aplicabilidad en procesos agrícolas y de remediación ambiental (Araújo et al., 2019).

En Perú, (Quiñones-Cerna et al., 2024) evaluaron la capacidad degradadora de bacterias indígenas aisladas de suelos agrícolas en Huamachuco. El estudio identificó cepas como *Pseudomonas protegens*, *Pseudomonas citri* y *Acinetobacter guillouiae*, con eficiencias de degradación superiores al 90% en condiciones controladas. Estos resultados destacan el potencial de microorganismos no provenientes de zonas previamente contaminadas, abriendo nuevas posibilidades para una biorremediación efectiva y sostenible en suelos agrícolas andinos.

En Colombia, El artículo de (Benítez et al., 2022) evalúa la eficacia de la fitorremediación para eliminar contaminantes en suelos, lixiviados y aguas. Se utilizaron *Sorghum vulgare* para suelos contaminados con diésel, *Chrysopogon zizanioides* para lixiviados de vertederos y *Lemna minor* para agua con níquel, logrando remociones de hasta 98 %. El estudio, realizado en Cartagena Colombia, demuestra que la fitorremediación es una alternativa sostenible y eficiente para contextos latinoamericanos.

En Venezuela se realizó biorremediación de suelos y aguas subterráneas contaminadas con hidrocarburos en un acuífero tropical de Venezuela, se optó por un tratamiento ex situ, utilizando un reactor secuencial tipo lodo (SS-SBR) y un filtro anaerobio de flujo ascendente (UAF-3SS), alcanzando hasta un 99 % de remoción de DQO. El estudio destaca la eficacia de sistemas acoplados para superar limitaciones ambientales y mejorar la biodegradación de hidrocarburos en contextos tropicales (Márquez-Romance et al., 2022).

En el contexto de Ecuador, durante las últimas décadas, se ha enfrentado una severa problemática ambiental asociada a la contaminación de suelos por actividades hidrocarburíferas, principalmente en la región Amazónica. Dada la importancia estratégica del petróleo para la economía nacional, que representa más del 30 % de las exportaciones y el 11

% (Escudero-López et al., 2022) , se han desarrollado múltiples investigaciones orientadas a mitigar el impacto ambiental mediante técnicas de biorremediación.

Uno de los estudios más relevantes en el contexto ecuatoriano fue realizado por (Hidalgo-Lasso et al., 2024), quienes propusieron actualizar los criterios de remediación de suelos basándose no solo en hidrocarburos totales extraíbles (TEPH), sino también en los hidrocarburos biodisponibles (TBPH). Los autores demostraron que existe una correlación más fuerte entre TBPH y toxicidad evaluada con el bioensayo Microtox, lo cual pone en cuestionamiento los enfoques regulatorios actuales que no consideran la biodisponibilidad.

También se destaca el artículo de (Pozo-Rivera et al., 2023) sobre la aplicación de bioindicadores usando diversas especies de escarabajos estercoleros en sitios remediados del Amazonas ecuatoriano, el estudio reveló que, aunque se han aplicado técnicas de lavado de suelos y revegetación, la diversidad biológica en ecosistemas degradados continúa siendo significativamente menor en comparación con bosques naturales destaca la necesidad de considerar indicadores biológicos en las evaluaciones post remediación esto destaca la necesidad de considerar indicadores biológicos en las evaluaciones post remediación. Asimismo, investigaciones como las de (Hidalgo-Lasso et al., 2024) analizaron los beneficios de la remediación considerando variables ecosistémicas como la eutrofización y toxicidad acuática, mostrando una reducción del 43 % en impactos negativos, estas prácticas incluyen el uso de surfactantes biodegradables, compostaje, windrows y landfarming, siendo este último más eficiente en términos de degradación.

En Ecuador, el suelo constituye un recurso fundamental para el equilibrio ambiental y el desarrollo humano, especialmente en regiones como la Amazonía, donde desde la década de 1970 se ha concentrado la actividad petrolera del país. Esta actividad, aunque estratégica para

la economía al representar más del 30 % de las exportaciones y aportar un 11 % al PIB nacional en 2022, ha generado importantes impactos ambientales, incluyendo la contaminación del suelo, el agua y el aire. Como respuesta, desde 2005 el Estado ecuatoriano ha implementado políticas de remediación que han permitido limpiar más de 1300 sitios contaminados y tratar alrededor de 1,6 millones de toneladas de suelo en las provincias amazónicas de Orellana y Sucumbíos, estas intervenciones se han regido por marcos normativos como el Reglamento Ambiental para Operaciones Hidrocarburíferas y el Acuerdo Ministerial 097, los cuales establecen límites permisibles de contaminantes como hidrocarburos totales extraíbles, metales pesados y compuestos aromáticos policíclicos, dependiendo del uso del suelo (Hidalgo-Lasso et al., 2024), aplicaron evaluaciones de riesgo ecológico en sitios contaminados del Oriente ecuatoriano, proponiendo criterios adaptativos de remediación que toman en cuenta el uso del suelo ecosistemas sensibles, agrícolas o industriales, lo cual representa un avance en la contextualización normativa.

Complementariamente, el trabajo de (Ojeda-Morales et al., 2025) exploró la eficacia del compostaje combinado con microorganismos autóctonos para reducir la concentración de hidrocarburos. Se evidenció que el uso de consorcios bacterianos nativos y bioestimulantes aumentó significativamente la tasa de remoción en suelos de la provincia de Sucumbíos.

Por otro lado, estudios internacionales con colaboración ecuatoriana, como el de (González-Toril et al., 2023), aplicaron análisis metagenómicos en zonas de minería de esquisto bituminoso para evaluar comunidades microbianas con potencial biorremediador, abriendo la puerta al uso de enfoques ómicos en contextos locales.

Finalmente, sobresale la colaboración internacional en el campo de la biorremediación es el estudio realizado por (González-Toril et al., 2023), en el que un consorcio microbiano

natural aislado del yacimiento de esquisto bituminoso de Riutort, España fue analizado metagenómicamente y luego aplicado experimentalmente en suelos ecuatorianos contaminados por hidrocarburos en la Refinería La Libertad y en núcleos del Campo Ancón, Ecuador logrando una degradación del 50.8% de los hidrocarburos totales en 60 días. Este antecedente no solo demuestra el potencial de bioproductos naturales, sino también la importancia de la colaboración científica transnacional para abordar problemáticas ambientales compartidas entre Europa y América Latina.

En América Latina, si se han desarrollado análisis bibliométricos aplicados a la biorremediación, por ejemplo, se realizó una revisión sistemática y bibliométrica de la investigación sobre biorremediación y fitorremediación en la región, utilizando las bases de datos Scopus y Web of Science. Su análisis evidenció que Brasil, México, Argentina y Colombia concentran el mayor número de publicaciones, siendo las universidades públicas los principales centros de producción científica. También se identificaron bacterias degradadoras, hongos, plantas nativas y biosurfactantes como los principales agentes biorremediadores reportados. Uno de los hallazgos clave fue la escasa producción en países con gran diversidad ecológica, como Ecuador o Bolivia, lo cual sugiere la existencia de vacíos importantes de conocimiento y oportunidades de investigación futura (Darío et al., 2024)

El estudio de (Valdiviezo Gonzales et al., 2023) ofrece una revisión bibliométrica integral de la investigación utilizando técnicas como biorremediación, oxidación avanzada y lavado entre otras de suelos para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. El análisis, basado en datos de Web of Science y procesado con CiteSpace, revela que los países con mayor producción científica son China, Estados Unidos e Irán, y que las colaboraciones internacionales están aumentando, aunque persiste una concentración de conocimiento en

países del hemisferio norte. Las principales palabras clave incluyen “contaminación por petróleo”, “biorremediación”, “eficiencia de remoción” y “fitotoxicidad”. Los autores destacan la necesidad de trasladar estas investigaciones hacia contextos más diversos ecológica y geográficamente, lo que refuerza la importancia de desarrollar estudios específicos para las diferentes regiones

En un estudio particularmente enfocado en la producción científica latinoamericana, (Song et al., 2021) llevaron a cabo un análisis bibliométrico de la investigación relacionada con la remediación ambiental en México. La revisión, desarrollada a partir de la base de datos Scopus, se centró en publicaciones entre 2000 y 2020 con énfasis en temas como biorremediación, toxicología ambiental y restauración de ecosistemas contaminados. Sus resultados mostraron un crecimiento sostenido de la producción científica en el área, particularmente en instituciones como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN), que lideran la generación de conocimiento. Además, se destacó la contribución creciente de investigaciones interinstitucionales, así como la necesidad de fortalecer la vinculación entre las investigaciones ambientales y las políticas públicas en contextos altamente biodiversos como el mexicano, donde los pasivos ambientales asociados a la actividad industrial aún representan un reto significativo para la sostenibilidad ambiental.

En conjunto, los estudios revisados reflejan una creciente atención en América Latina hacia la biorremediación, con una producción científica liderada por países como Brasil, México. Sin embargo, esta revisión también evidencia una alarmante escasez de investigaciones en países megadiversos como es el caso de Ecuador, a pesar de su alta vulnerabilidad ambiental y la presión ejercida por las actividades extractivas. Aunque diversas

investigaciones han utilizado herramientas como CiteSpace y bases de datos como Scopus y Web of Science para mapear la evolución de este campo, la mayoría presentan un enfoque regional o global poco contextualizado.

En este sentido, el presente estudio busca aportar un análisis bibliométrico focalizado en el contexto ecuatoriano, con un rango temporal reciente y una delimitación temática centrada exclusivamente en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Esta perspectiva no solo busca llenar vacíos en la literatura, sino también ofrecer insumos relevantes para el diseño de políticas públicas basadas en evidencia científica, orientadas a la sostenibilidad ambiental del país.

Tabla 2. Artículos en el contexto Ecuador sobre biorremediación.

Autor	Ubicación	Técnica de biorremediación
(Camacho et al., 2024)	Esmeraldas	Biocarbon con cascara de arroz y bioestimulación
(Pozo-Rivera et al., 2023)	Orellana y Sucumbíos	Bioindicadores con escarbajos
(V. J. García et al., 2019)	Esmeraldas	Bioaumentación y espectroscopia
(Orejuela-Romero et al., 2025)	Francisco Orellana	Bioestimulación mediante enmiendas orgánicas
(González-Toril et al., 2023)	España y Ecuador Libertad	Bioaumentación con bacterias

(Andrade et al., 2024)	Isla Santay	Aislamiento y tolerancia microbiana mas produccion biosurfactantes,
(Páliz et al., 2021)	Orellana	Bioaumentación con bacterias nativas

Nota. Elaborado de los autores 2025

2.2. Marco Conceptual

Técnicas de Biorremediación

Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica de remediación biológica que utiliza plantas para reducir, extraer, contener o transformar contaminantes presentes en suelos, sedimentos o aguas. Este proceso se basa en la capacidad de ciertas especies vegetales de estimular, a través de sus exudados radiculares, la actividad microbiana del suelo, lo cual incrementa la diversidad microbiana y promueve la degradación de compuestos tóxicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (Hariyo et al., 2020).

Micorremediación

Es una técnica de biorremediación que utiliza hongos que tienen la capacidad de colonizar residuos orgánicos y suelos, acelerando la degradación o transformando compuestos recalcitrantes de hidrocarburos totales del petróleo u otros contaminantes en sustancias menos tóxicas mejorando la calidad del suelo contaminado, (de la Cruz-Izquierdo et al., 2021).

Microcosmos

Son sistemas experimentales a pequeña escala que replican condiciones ambientales reales de manera controlada, permitiendo el estudio de procesos ecológicos y de remediación. En el contexto de suelos contaminados, los microcosmos permiten simular interacciones entre contaminantes, suelos, organismos y factores abióticos, facilitando la evaluación de técnicas como la micorremediación sin necesidad de intervenir directamente en el ambiente natural. Estos ensayos brindan información valiosa sobre la eficiencia de los tratamientos, la dinámica de los contaminantes y los efectos sobre la biota del suelo (Mauricio-Gutiérrez et al., 2022).

Bioestimulación

También es una técnica de biorremediación que consiste en la adición de nutrientes principalmente fuentes de nitrógeno, fósforo y oxígeno u otros compuestos que favorecen el crecimiento y la actividad metabólica de los microorganismos autóctonos capaces de degradar contaminantes como los hidrocarburos del petróleo. Esta estrategia busca optimizar las condiciones ambientales del suelo, como la relación de los nutrientes con el fin de potenciar la biodegradación natural (Cambarieri et al., 2021).

Biocarbon (Biochar)

El biocarbón (biochar) es un material carbonáceo producido mediante la pirólisis de biomasa residual, caracterizado por su alta estabilidad química y notable capacidad de adsorción. Su estructura porosa y su superficie funcional le permiten retener diversos compuestos orgánicos contaminantes, incluyendo pesticidas, antibióticos, hormonas estrogénicas, ácidos perfluorooctanoicos y compuestos hidrocarbonados como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) (Wei et al., 2024).

Biosurfactante

Un biosurfactante es un compuesto de origen microbiano que posee propiedades tensoactivas, es decir, puede reducir la tensión superficial e interfacial entre dos fases inmiscibles, como agua y aceite. Estos compuestos se producen naturalmente por bacterias, levaduras o hongos durante su crecimiento en presencia de fuentes de carbono hidrofóbicas, como aceites o hidrocarburos (Araújo et al., 2019).

Bioaumentación

Consiste en la introducción de microorganismos específicos, ya sean cepas puras o consorcios, que poseen la capacidad de degradar contaminantes particulares en el ambiente receptor. Esta estrategia busca mejorar la eficiencia de la biorremediación cuando los microorganismos autóctonos no son suficientes o efectivos para llevar a cabo el proceso (Chan-Quijano et al., 2023).

Biorreactor

Es un dispositivo o sistema cerrado que proporciona un ambiente controlado para llevar a cabo procesos biológicos, incluyendo la degradación de compuestos contaminantes mediante el metabolismo microbiano (Márquez et al., 2023).

Tabla 3. Técnicas utilizadas en estudios de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en América Latina

Técnicas	Sub-técnicas	Actividad
Fitorremediación / Rizorremediación	Fitorremediación (plantas: <i>Medicago sativa</i> , <i>Zea mays</i> , <i>Sorghum vulgare</i> , <i>Chrysopogon zizanioides</i> , <i>Eleocharis</i> sp.) Microrremediación asociada a raíces (<i>A. bisporus</i> , hongos rizósfera de <i>Rhizophora mangle</i>)	Remover contaminantes del suelo o agua mediante absorción o transformación por raíces o simbiosis con hongos micorrízicos
Bioestimulación	Bioestimulantes (nutrientes, β -glucanos, biochar) Biosurfactantes/bioemulsificantes (aniónicos, rhamnolípidos)	Estimular la actividad de microorganismos autóctonos degradadores mediante el mejoramiento del ambiente o la biodisponibilidad
Bioaumentación	Inoculación de cepas/consorcios (pseudomonas, <i>Bosea</i> , <i>Sphingobium</i> , <i>Acinetobacter</i> spp., <i>Bacillus</i> spp., BCons)	Introducir microorganismos con alta capacidad degradadora para reforzar la actividad del ecosistema en el sitio contaminado
Procesos ex situ	Biopilas, Windrows, landfarming, compostaje.	Tratamiento de suelos contaminados fuera del sitio original con técnicas aireadas o compostadas

Técnicas	Sub-técnicas	Actividad
Procesos físico-químico-biológicos combinados	Lavado de suelos ,bioaereación in situ, Extracción multifásica (MPE) , bombeo,Biorreactor de lecho empacado	Combinar procesos físicos y químicos con degradación biológica para maximizar la remoción de contaminantes complejos
Biorreactores y sistemas secuenciales	SS-SBR (Soil-Slurry SBR) UAF-3SS (Up-flow Anaerobic Filter 3 fases) DQO removida 80–99 % suelo, 60–99 % agua	Remoción de contaminantes en suelos y aguas mediante tratamiento en reactores biológicos controlados
Estrategias pasivas o híbridas	Biorremediación semi-pasiva Atenuación natural monitoreada	Permitir la remediación natural con monitoreo técnico, o con intervención mínima

Nota. Elaborado por los autores en base al análisis bibliométrico de la producción científica en Ecuador.

Organismos Biorremediadores en Suelos Contaminados con Hidrocarburos

La biorremediación depende del empleo de organismos capaces de transformar o degradar compuestos contaminantes en productos menos tóxicos, aquí es donde se clasifican principalmente en tres grupos de organismos los cuales son bacterias, hongos y plantas, los cuales pueden actuar de forma individual o en consorcios sinérgicos (Darío et al., 2024).

Bacterias

Las bacterias representan el grupo más utilizado debido a su capacidad metabólica para degradar hidrocarburos alifáticos, aromáticos y compuestos complejos como los PAHs(Páiz et al., 2021).

Hongos

Los hongos, particularmente los filamentosos, poseen enzimas extracelulares potentes como lacasas y peroxidasas que han sido aplicadas en micorremediación, especialmente en suelos con alto contenido de compuestos aromáticos persistentes (Mauricio-Gutiérrez et al., 2022).

Plantas

Se la utiliza para la fitorremediación, por su habilidad de absorber o transformar contaminantes. (Benítez et al., 2022). También muchas especies actúan como hospedadoras de microorganismos rizosféricos que potencian la biorremediación (Morales-Guzmán et al., 2023).

4. Consorcios microbianos

Son mezclas naturales o diseñadas de varios microorganismos que actúan de manera sinérgica, mejorando la tasa de degradación y adaptabilidad a condiciones ambientales diversas. los consorcios tipo *BCons* (bacterias hidrocarbonoclastas) se han usado con éxito en suelos ecuatorianos contaminados con petróleo crudo (García-Uitz et al., 2024).

Tabla 4. Plantas utilizadas en estudios de biorremediación en América Latina.

Familia	Género / especie	Aplicación en biorremediación
Fabaceae	Medicago sativa (alfalfa)	Fitorremediación de suelos con hidrocarburos
Cucurbitaceae	Cucurbita pepo + microbiota de rizósfera	Fitorremediación y estimulación de bacterias rizosféricas
Cyperaceae	Bulbostylis nesiotis, Cyperus atlanticus	Fitorremediación en zonas húmedas contaminadas con hidrocarburos
Araceae	Lemna minor	Fitorremediación en cultivos de maceta.

Poaceae	Zea mays (maíz) + nativas Sorghum vulgare, Chrysopogon zizanioides	Fitorremediación en combinación con bacterias rizosféricas nativas Fitorremediación en cultivos de maceta.
---------	--	---

Nota. Elaborado por los autores a partir del análisis de indexados en Scopus (2019-2025)

Tabla 5. Hongos utilizados en estudios de biorremediación en América Latina

Familia	Género / Especie	Aplicación en biorremediación
Trichocomaceae	<i>Aspergillus oryzae</i> (cepa MF13), <i>A. flavipes</i> (cepa QCS12) <i>A. niger</i> , <i>A. fflavus</i> , <i>A. egyptiacus</i> ; <i>Fusarium oxysporum</i>	Degradación de fenantreno (PHE); micorremediación asociada a raíces de manglar (<i>Rhizophora mangle</i>)
Agaricaceae	<i>Agaricus bisporus</i>	Uso del sustrato residual del cultivo como bioestimulante para bacterias autóctonas

Nota. Elaborado por los autores del análisis de artículos científicos indexados en Scopus (2019–2025).

Tabla 6. Microorganismos bacterianos utilizados en estudios de biorremediación en América Latina.

Familia microbiana	Géneros / Especies	Aplicaciones más frecuentes
<i>Pseudomonadaceae</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>P. putida</i> , <i>P. sp.</i>	Bioaumentación, producción de biosurfactantes
<i>Bacillaceae</i>	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. cereus</i> , <i>Priestia flexa</i>	Consortios bacterianos, resistencia a metales
<i>Actinobacteria</i>	<i>Rhodococcus sp.</i> , <i>Microbacterium sp.</i>	Degradación de PAHs complejos
<i>Moraxellaceae</i>	<i>Acinetobacter sp.</i>	Producción de biosurfactantes y degradación de TPH
<i>Brucellaceae</i>	<i>Ochrobactrum intermedium</i> , <i>Brucella sp.</i>	Degradación de compuestos recalcitrantes
<i>Staphylococcaceae</i>	<i>Staphylococcus sp.</i>	Participación secundaria en consorcios

Familia microbiana Géneros / Especies Aplicaciones más frecuentes

Vibrionaceae *Vibrio fischeri* Bioensayo de toxicidad (Microtox)

Nota. Elaborado por los autores a partir del análisis de indexados en Scopus (2019–2025).

Tabla 7.

Hidrocarburos más comunes en suelos como contaminados en América Latina.

Categoría	Ejemplos	Naturaleza
Hidrocarburos Totales (TPH)	Mezcla de hidrocarburos C10–C28	Alifáticos y aromáticos
Aromáticos policíclicos (PAHs)	Fenantreno, antraceno, naftaleno	Persistentes, cancerígenos
Fracciones ligeras y medias	Diésel, nafta, gasoil, aceite lubricante	Volátiles, inflamables
Residuos complejos	Lodos aceitosos, aceite usado, bioemulsionados	Mezclas variables
Compuestos específicos	TBHP, natfalato, biodiésel	Puntuales y menos comunes

Nota. Elaborado por los autores a partir del análisis de indexados en Scopus (2019–2025).

2.3. Marco Teórico

Contaminación de suelos por hidrocarburos: Consecuencias ambientales.

La contaminación por hidrocarburos del petróleo representa una de las problemáticas ambientales más persistentes y complejas, debido a la baja biodisponibilidad y alta toxicidad de compuestos como los hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos (HAPs). Estos contaminantes afectan directamente el microbiota edáfico, inhiben la actividad enzimática del suelo y alteran parámetros como la germinación y el crecimiento de plantas (Kumari & Chandra, 2023).

Desde un enfoque más aplicado, el estudio de (Ruseva et al., 2023) en suelos Chernozem de la región de Rostov, Rusia demostró que la contaminación con petróleo, incluso en niveles bajos (0.1%), reduce drásticamente la actividad de catalasa y deshidrogenasa, la

densidad bacteriana total y provoca efectos fitotóxicos medibles en raíces de *Raphanus sativus*. Este hallazgo valida el uso de indicadores biológicos como herramientas clave de monitoreo, y se alinea con lo reportado en estudios similares de Asia y Europa (Du et al., 2024).

Sin embargo, los autores también evidencian una limitación metodológica, la mayoría de estos estudios están contextualizados en suelos templados o áridos, lo cual no refleja la complejidad ecológica de suelos tropicales como los del Ecuador, caracterizados por su elevada diversidad microbiana.

Según, (Cambarieri et al., 2021) la bioestimulación es especialmente efectiva cuando existen poblaciones microbianas nativas con potencial degradador, pero que están limitadas por condiciones edáficas adversas.

El biochar, obtenido por pirólisis de residuos orgánicos, ha cobrado protagonismo como enmienda ambiental debido a su capacidad para adsorber contaminantes, mejorar la estructura del suelo y fomentar comunidades microbianas degradadoras (Hoang et al., 2021)

En particular, (Minnikova et al., 2023) demostraron que la combinación de biochar con cepas bacterianas autóctonas de *Bacillus* y *Paenibacillus* permitió una reducción del 67% de hidrocarburos en solo 30 días, recuperando también parámetros enzimáticos y vegetales. En comparación, el estudio de (Ruseva et al., 2023) que utilizó solo biochar mostró mejoras parciales, lo que sugiere que la bioaumentación sinérgica representa un enfoque más eficaz en condiciones de alta toxicidad.

Esta evidencia respalda la postura crítica de este investigador el biochar debe concebirse no como solución única, sino como parte de un sistema integrado de biorremediación que considere el microbiota local y la dinámica del suelo tropical.

En el contexto de la biorremediación, el biocarbón ha sido ampliamente estudiado por su potencial como adsorbente con los derivados del petróleo, si bien gran parte de las revisiones existentes se han centrado en su capacidad de adsorción más que en su participación en procesos degradativos (Wei et al., 2024) Su efectividad puede incrementarse mediante modificaciones físico-químicas, las cuales permiten optimizar sus propiedades para aplicaciones específicas, especialmente en suelos contaminados con hidrocarburos.

El uso de biosurfactantes producidos por bacterias como *Pseudomonas aeruginosa* o *Halomonas pacifica* ha demostrado aumentar la biodisponibilidad de hidrocarburos, facilitando su degradación (Cheffi et al., 2020) ;(El-Housseiny et al., 2020) Esta técnica, además de ecológica, permite reducir la necesidad de surfactantes sintéticos costosos y potencialmente tóxicos.

Desde un enfoque biotecnológico avanzado, (Davoodi et al., 2023) desarrollaron consorcios bacterianos interespecie adaptados a bajas temperaturas, aplicados en columnas de suelo. Sus resultados mostraron reducción eficiente de PAHs mediante producción enzimática activa, lo cual marca una tendencia global hacia biorremediación basada en ingeniería microbiana, aún ausente en América Latina.

A nivel latinoamericano, (Castillo-Campos et al., 2021) y (Orellana et al., 2022) evidencian avances incipientes, centrados en biosurfactantes bacterianos y tratamientos con compost, pero aún con escasa transferencia tecnológica. La brecha identificada permite posicionarse críticamente que Ecuador debe avanzar hacia modelos de innovación bioambiental basados en su propia biodiversidad edáfica.

El documento señala que los biosurfactantes pueden clasificarse en varios tipos, como glicolípidos, lipopeptídicos, fosfolípidos y polímeros tensoactivos, siendo los rhamnolípidos

(producidos por *Pseudomonas aeruginosa*) y los sophorolípidos (producidos por *Starmerella bombicola*) los más estudiados. Su relevancia ambiental radica en su capacidad para emulsionar contaminantes orgánicos e incrementar su biodisponibilidad, favoreciendo su degradación microbiana. A diferencia de los surfactantes sintéticos, los biosurfactantes son biodegradables, no tóxicos y activos en condiciones extremas de pH, temperatura y salinidad (Araújo et al., 2019).

En particular, se ha observado que el uso de *Medicago sativa* (alfalfa) puede reducir significativamente la concentración de fenantreno en suelos contaminados, activando procesos de rizodegradación y facilitando el desarrollo de comunidades bacterianas especializadas en la biodegradación de contaminantes (Hariyo et al., 2020).

En ambientes tropicales, por ejemplo, se ha demostrado que *Eleocharis mutata*, una planta halotolerante, puede crecer en suelos con salinidades de hasta 125 dS/m, contribuyendo significativamente a la recuperación de zonas afectadas por derrames salinos provenientes de la industria petrolera. Su acción permite disminuir la salinidad del suelo, aumentar el contenido de materia orgánica y facilitar la sucesión vegetal con especies como *Typha sp.*, demostrando el potencial de la fitorremediación en regiones tropicales húmedas (Domínguez-Rodríguez et al., 2024).

Aunque tradicionalmente se ha investigado la acción de Basidiomycota ligninolíticos, estudios recientes han demostrado que también especies del filo Ascomycota, como *Aspergillus oryzae* y *Aspergillus flavipes*, poseen un alto potencial para degradar fenantreno, incluso en concentraciones de hasta 5000 mg/L, sin necesidad de fuentes adicionales de carbono. Estas especies no solo toleran altos niveles del contaminante, sino que lo degradan

eficazmente, lo que las convierte en organismos promisorios para la micorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos (de la Cruz-Izquierdo et al., 2021).

Monitoreo y evaluación: hacia indicadores funcionales y adaptativos

Más allá de la eliminación de contaminantes, la restauración ecológica exige sistemas de evaluación funcional del suelo (Vergnano et al., 2024), proponen el uso de sensores TDR (Reflectometría en el Dominio del Tiempo) para monitorear en tiempo real propiedades del suelo conductividad, permitividad eléctrica, revelando la actividad microbiana sin métodos destructivos.

Este enfoque es complementado por indicadores biológicos como los utilizados por (Ruseva et al., 2023) actividad de deshidrogenasas, número de bacterias y bioensayos de fitotoxicidad. Sin embargo, la mayoría de los estudios no adaptan estos indicadores a contextos tropicales, donde la variabilidad microbiana puede alterar su sensibilidad y respuesta. Por ello, se considera necesario desarrollar líneas base de bioindicadores locales en Ecuador, lo cual permitiría estandarizar protocolos de monitoreo con enfoque ecosistémico.

Síntesis conceptual y brechas identificadas

La literatura consultada sugiere que la eficacia de la biorremediación depende menos del tipo de enmienda utilizada y más del contexto edafoclimático, biológico y socio ambiental donde se aplica. Si bien estrategias como el biocarbon y la rizorremediación cuentan con amplio respaldo experimental, su aplicación en suelos tropicales, biodiversos y socialmente sensibles, como los del Ecuador, continúa siendo limitada y poco documentada.

Esta investigación parte de una mirada crítica y situada en la realidad ecuatoriana. Se reconoce el gran potencial que tienen las tecnologías de biorremediación para enfrentar la contaminación

por hidrocarburos en suelos, pero también se advierte que no basta con aplicar modelos internacionales de forma directa.

Es necesario adaptarlos al entorno específico del país, tomando en cuenta no solo las condiciones ecológicas, sino también las dinámicas sociales y culturales propias de cada región. Aunque a nivel internacional existen avances importantes y numerosas experiencias exitosas, en Ecuador todavía hay mucho por construir, aún falta generar conocimiento sobre aspectos clave como las dosis adecuadas, la frecuencia de aplicación o la compatibilidad entre diferentes enmiendas biológicas, especialmente en contextos tropicales o en zonas andinas donde las condiciones del suelo, el clima y la biodiversidad presentan características particulares.

Esto se traduce en que muchas veces se recurre a ensayos aislados o soluciones sin validación experimental local, lo que reduce su eficacia y sostenibilidad a largo plazo. Por otra parte, a pesar del creciente interés por la biorremediación, Ecuador tiene una baja visibilidad científica en este campo, la cantidad de publicaciones sigue siendo limitada, y son pocos los estudios que aplican estas técnicas en contextos amazónicos o urbanos del país. Sin embargo, la participación de investigadores ecuatorianos en publicaciones de revistas internacionales demuestra que existen capacidades y conocimientos que podrían fortalecerse mediante una cooperación científica más activa.

En este escenario, surge una necesidad importante, contar con estudios sistemáticos que analicen qué se ha investigado, cómo se ha hecho, quiénes participan y qué impacto han tenido estos trabajos. Precisamente por eso, este estudio propone un análisis bibliométrico, que no solo organiza y cuantifica la producción científica, sino que también permite identificar vacíos, detectar tendencias y proponer rutas para el desarrollo científico y tecnológico.

El uso de herramientas especializadas como *Bibliometrix*, *VOSviewer* y *Colab* resulta clave en este proceso. Estas plataformas ayudan a visualizar de forma clara los principales actores en el campo de autores, instituciones, países y permiten entender cómo se están construyendo las redes de conocimiento en torno a la biorremediación. De este modo, se abre la posibilidad de diseñar estrategias más efectivas para fortalecer la investigación, fomentar la colaboración entre actores y mejorar la toma de decisiones a nivel institucional y gubernamental.

CAPÍTULO III: Diseño Metodológico

3.1. Tipo y diseño de investigación

Este estudio presenta un enfoque cuantitativo con el respectivo respaldo de producción. En base a que los datos presentan análisis, medidas y verificables claves que evidencien la evolución de la producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador. Se menciona el diseño adecuado debido a que se busca analizar aspectos claves como número de publicaciones, las técnicas de biorremediación que se usan en cada uno de los estudios, así como los organismos (bacterias, plantas, bioindicadores biológicos, entre otros), las redes de colaboraciones entre los autores, afiliaciones nacionales, cooperaciones internacionales y las fuentes en las cuales se indexaron las investigaciones científicas.

El estudio se diseñó como un análisis bibliométrico, apoyado en una revisión sistemática, siguiendo las directrices establecidas por la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Esto asegura que el proceso de recopilación y análisis de información se haya realizado con transparencia, rigor metodológico y la posibilidad de ser replicado.

Para ello, se combinaron herramientas teóricas y prácticas. Los métodos teóricos ayudaron a definir los principales ejes temáticos del estudio y los criterios para incluir o excluir publicaciones, mientras que los métodos empíricos permitieron recopilar, filtrar y analizar la información bibliográfica disponible. Como resultado, se construyó una base de datos depurada con estudios publicados entre 2019 y 2025, lo cual hizo posible interpretar cuantitativamente el desarrollo científico en este campo: autores más activos, instituciones y países participantes, redes de colaboración, palabras clave más frecuentes, tendencias temáticas, crecimiento anual de publicaciones e impacto medido en número de citas.

3.2. Los métodos y las técnicas

3.2.1. Métodos

Se utilizó un método cuantitativo descriptivo, basado en técnicas bibliométricas que permitieron analizar patrones de producción científica, redes de colaboración, tendencias temáticas y niveles de impacto de las publicaciones sobre biorremediación de suelos contaminados. El enfoque fue no experimental y documental, utilizando herramientas como Bibliometrix (R) y VOSviewer para el análisis de metadatos exportados desde Scopus.

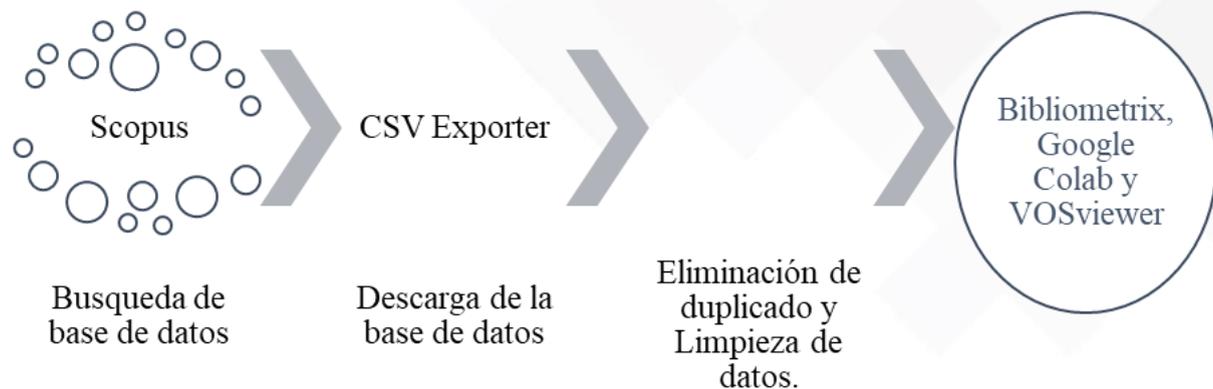


Figura 1. Pasos metodológicos para búsqueda, obtención y análisis de datos.

Nota: Elaboración propia. Se ilustra los pasos para la obtención, descarga, limpieza y proceso estadísticos de los estudios de biorremediación (procesado en Microsoft Word).

3.2.1. Técnicas

- Revisión sistemática siguiendo las fases de PRISMA: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión final.
- Análisis bibliométrico mediante:
 - R con el paquete Bibliometrix (procesamiento de datos, tablas, indicadores de productividad y citación).
 - Biblioshiny (interfaz gráfica de análisis bibliométrico en RStudio).
 - VOSviewer (visualización de mapas de co-ocurrencia, coautoría y cocitación).

3.3. La población y la muestra

3.3.1. Población

La población estuvo compuesta por todas las publicaciones científicas indexadas en la base de datos Scopus que tratan sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, mediante filtrados con palabras claves para Latinoamérica

```
TITLE-ABS-KEY ( ( ( "bioremediation" OR "biodegradation" OR "remediation" )
AND ( "oil" OR "hydrocarbons" OR "petroleum" ) AND ( "soil" OR "land" ) ) AND (
"Latin America" OR "South America" OR "Mexico" OR "Brazil" OR "Colombia" OR
"Argentina" OR "Chile" OR "Peru" OR "Ecuador" OR "Venezuela" OR "Uruguay" OR
"Paraguay" OR "Bolivia" OR "Guyana" OR "Costa Rica" OR "El Salvador" OR
"Guatemala" OR "Honduras" OR "Nicaragua" OR "Panama" ) ) AND PUBYEAR >
2018 AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2026 AND ( LIMIT-TO (
DOCTYPE,"ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE,"re" ) )
```

Y para Ecuador sin restricciones iniciales de año, tipo de documento o acceso.

```
TITLE-ABS-KEY ( ( "bioremediation" OR "biodegradation" OR "soil remediation" OR
"environmental cleanup" ) AND ( "oil" OR "hydrocarbons" OR "petroleum" OR
"contamination" OR "pollution" ) AND ( "soil" ) ) AND ( TITLE-ABS-KEY (
"Ecuador" OR "Amazon region" OR "Oriente Basin" ) ) AND PUBYEAR > 2018.
```

3.3.2. Muestra

Se definió una muestra intencionada de artículos basada en criterios específicos de exclusión y documentos de exclusión (Fig.2).

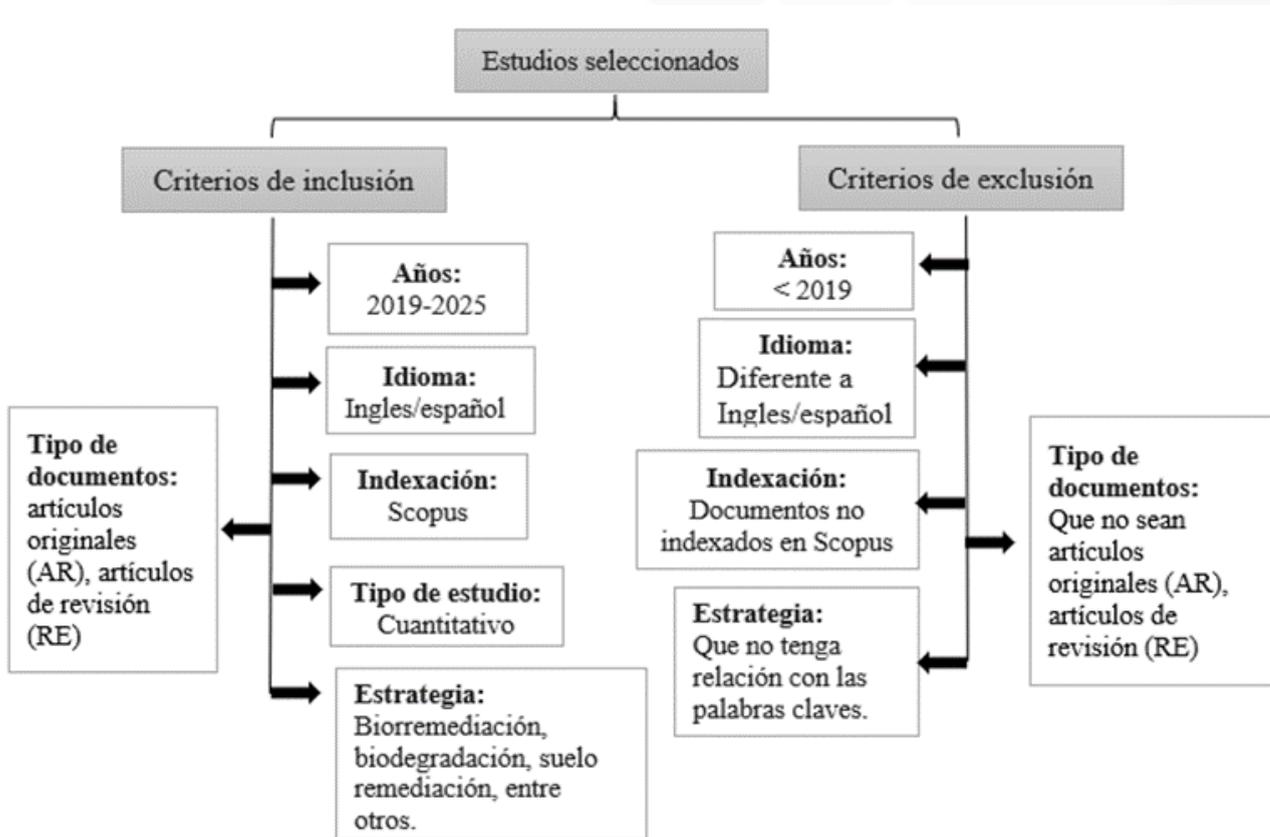


Figura 2. Criterios de inclusión y exclusión aplicados para la selección de los estudios

Nota. Elaboración propia con base en el análisis de los criterios de inclusión y exclusión aplicados a los estudios científicos de biorremediación sobre suelos contaminados en Ecuador (2019-2025).

El proceso de selección se realizó mediante la búsqueda avanzada en Scopus (Fig. 3), obteniéndose inicialmente 21 registros, de los cuales 9 fueron seleccionados tras aplicar

protocolo PRISMA (eliminación de duplicados, revisión de relevancia temática y verificación de acceso abierto).

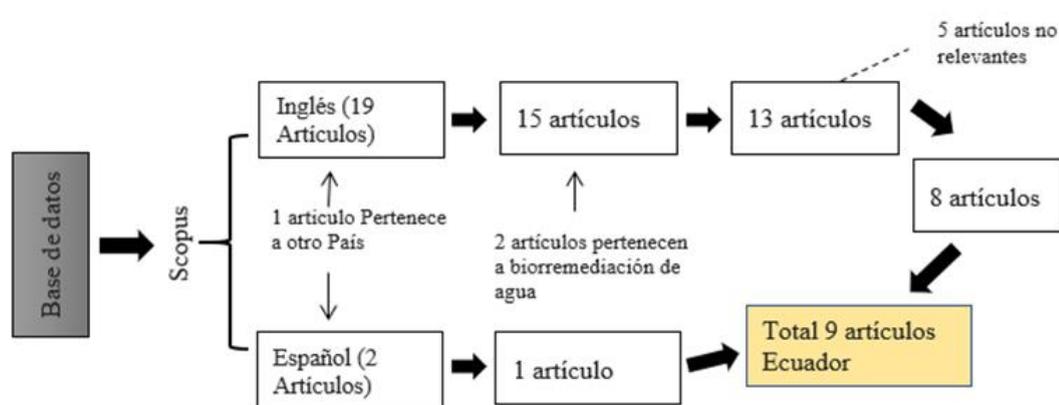


Figura 3.

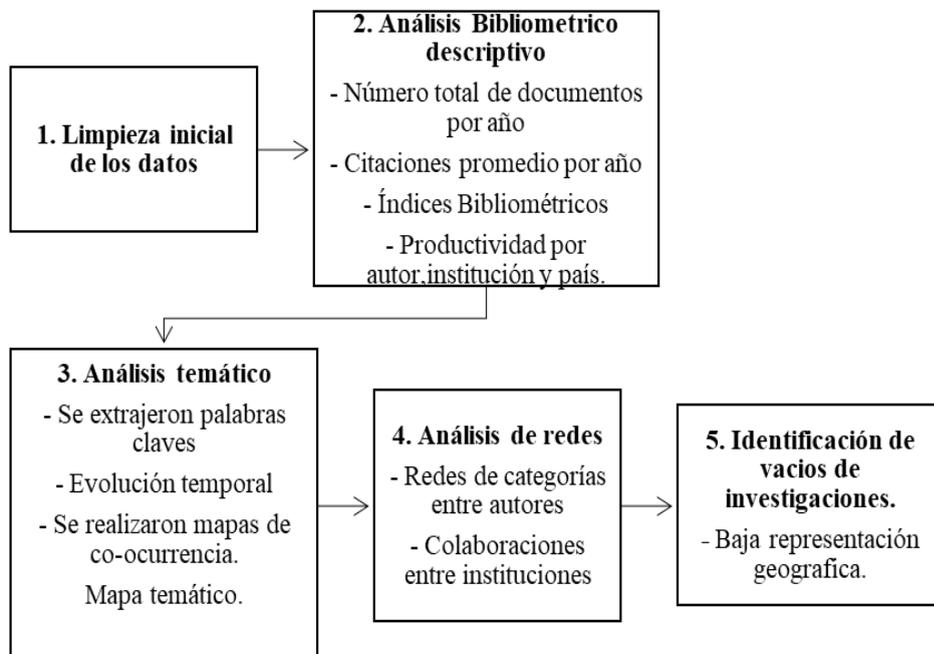
Esquema del proceso de obtención de los datos.

Nota. Elaboración propia en el cual se detalla los parámetros considerados para limpiar la base de datos.

3.4. Procesamiento Estadístico de la Información

El procesamiento de los datos bibliográficos se realizó en varias fases:

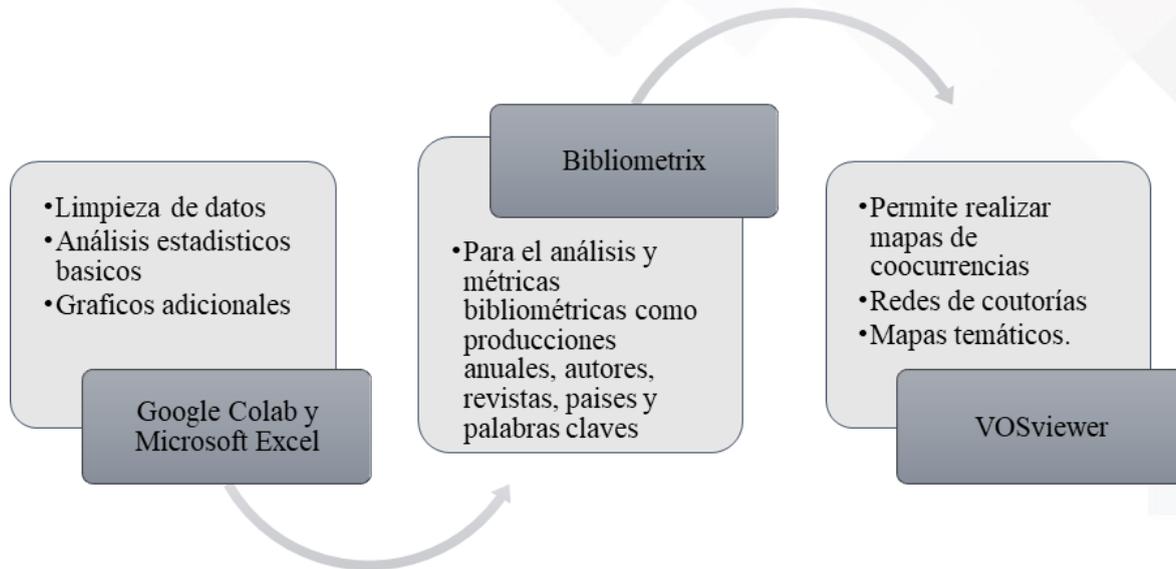
Figura 4. Proceso estadístico de los datos.



Nota. El diagrama de flujo muestra los pasos estadísticos que se desarrollaron con los datos.

3.4.1. Herramientas Utilizadas

Figura 5. Principales herramientas usadas.



Nota. Elaboración propia. El diagrama permite visualizar las herramientas usadas para la limpieza y análisis de los estudios científicos obtenidos desde Scopus.

Para visualizar los principales hallazgos de esta investigación, se elaboraron gráficos que resumen la evolución de la producción científica, los patrones de colaboración y la distribución temática de los estudios sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador. A continuación, se presentan estos resultados, obtenidos tras el procesamiento y análisis de los datos bibliográficos extraídos de la base de datos Scopus, mediante el uso de herramientas bibliométricas especializadas.

CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados

4.1. Análisis e Interpretación de Resultados

Se presentan los resultados del análisis bibliométrico realizado en base a la producción científica con enfoque a la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos entre el periodo de 2019 a junio del 2025, con particular énfasis al contexto de Ecuador. Los resultados se evidencian de acuerdo con los objetivos específicos de la investigación, mismos que se representan en tablas y figuras generadas con herramientas como Bibliometrix (R/Biblioshiny), Google colab, Microsoft Excel y VOSviewer.

La revisión de la producción científica en Ecuador revela que las principales líneas temáticas relacionadas con la contaminación de suelos por hidrocarburos se concentran en el desarrollo de técnicas de biorremediación adaptadas a contextos ecológicos locales, con un énfasis en la región amazónica. Las metodologías más aplicadas en los estudios revisados son la bioaumentación y la bioestimulación, empleando mayoritariamente bacterias y especies vegetales autóctonas. Esta orientación técnica sugiere una preferencia por soluciones sostenibles, de bajo costo y con alta compatibilidad ecológica.

Adicionalmente, se han documentado propuestas innovadoras como el uso de bioindicadores para el monitoreo funcional del suelo, así como la incorporación de herramientas tecnológicas avanzadas, entre ellas la espectroscopía, que permiten evaluar procesos sin recurrir a métodos destructivos. Estas estrategias no solo evidencian el avance metodológico, sino que también reflejan una respuesta directa a las condiciones socioambientales particulares del territorio ecuatoriano.

Desde una perspectiva territorial, el análisis geográfico indica que los estudios se distribuyen de forma relativamente equilibrada entre varias ciudades del país, con mayor

concentración en Esmeraldas y zonas representativas de la Amazonía. Aunque no se observa una diferencia marcadamente significativa entre regiones, esta dispersión sugiere una participación académica diversa a nivel nacional, lo que refuerza el interés multisectorial por abordar la problemática de la contaminación por hidrocarburos desde una perspectiva biotecnológica y contextualizada.

En la Tabla 7 se recopilan algunos de los estudios más representativos sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos realizados en Ecuador. Estos trabajos fueron seleccionados por su relevancia técnica, aplicabilidad local y aporte a la comprensión de las estrategias adaptadas a condiciones edafoclimáticas del país. Como se puede observar, las técnicas más empleadas son la bioaumentación y la bioestimulación, aplicadas en distintas regiones del territorio, principalmente en zonas amazónicas. También se evidencian subtécnicas específicas, como el uso de enmiendas orgánicas o consorcios bacterianos, que refuerzan el enfoque hacia soluciones sostenibles, de bajo costo y adaptadas al entorno ecológico. La tabla incluye información sobre los autores, el lugar del estudio, la técnica aplicada y los materiales o enfoques específicos empleados en cada caso.

Tabla 7. Técnicas empleadas en los estudios de biorremediación en Ecuador.

Título	Autores	Lugar de estudio	Técnicas	Subtécnica
Oil Palm Bagasse as a Treatment for Soils Contaminated with Total Petroleum Hydrocarbons. Biorremediation of Soil Sample Contaminated with Crude Oil	(Orejuela-Romero et al., 2025)	Francisco de Orellana	Bioestimulación.	Enmiendas orgánicas (Bagazo de palma aceitera).
	(Camacho et al., 2024)	Esmeraldas	Bioestimulación.	Enmienda con Biocarbón

using rice husk-based biocarbon (Oryza Sativa)	(Andrade et al., 2024)	Isla Santay	Aislamiento y evaluación de tolerancia microbiana.	(cascarilla de arroz)
Hydrocarbon tolerance evaluation of the microbiota associated with the Roystonea oleracea palm from Santay Island (Ecuador)	(Pozo-Rivera et al., 2023)	Sucumbíos y Orellana.	Bioindicadores.	biosurfactantes. Escarabajos coprófagos.
Response of dung beetle diversity to remediation of soil ecosystems in the Ecuadorian Amazon.	(González-Toril et al., 2023)	España y Ecuador/Libertada	Bioaumentación	Aislamiento microbiano
Metagenomic analysis of the microbial community at the Riutort oil shale mine (NE Spain): Potential applications in bioremediation and enhanced oil recovery.	(Escudero-López et al., 2022)	Sucumbíos/Orellana	Biorremediación microbiana in situ	Bioaumentación con cepas autóctonas
Bacterial selection of the Pseudomonas genus with the capacity to treat water and contaminated soils.	(Páliz et al., 2021)	Orellana – Laboratorio AqLab.	Bioaumentación.	Bacterias nativas
Reduction of the soil environmental impact caused by the presence of total petroleum hydrocarbons				

(TPH) by using Pseudomonas sp. Bioremediation of soil contaminated with hydrocarbons based on bacteria used as bioproducts.	(R. A. V. García et al., 2020)	Campo Sacha	Bioaumentación	Aislamiento, selección y aplicación de bacterias nativas
Assessing Bioremediation of Soils Polluted with Fuel Oil 6 by means of diffuse reflectance spectroscopy.	(V. J. García et al., 2019)	Esmeraldas	Bioaumentación + espectroscopia.	Referencia difusa (Vis-NIR)

Nota. Elaboración propia con la base en la revisión de los artículos científicos publicados en Scopus en el periodo de 2019 a 2025.

El análisis de los estudios recopilados permite identificar una tendencia clara hacia el aprovechamiento de recursos locales, como residuos orgánicos o especies nativas, para la remediación de suelos contaminados. Asimismo, se observa una distribución geográfica que, aunque no es uniforme, revela esfuerzos académicos dispersos en distintas provincias, con un mayor número de intervenciones documentadas en la región amazónica. Esto refuerza la necesidad de promover redes de colaboración entre instituciones para fortalecer la capacidad de respuesta a nivel nacional.

Con el objetivo de identificar los enfoques más recurrentes en la literatura científica nacional sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, se realizó un análisis de frecuencia de los términos técnicos utilizados. Este análisis permite visibilizar los conceptos centrales, técnicas dominantes y materiales más empleados en las investigaciones desarrolladas en el contexto ecuatoriano. La Tabla 8 presenta los términos con mayor

frecuencia de aparición, ordenados de forma descendente, lo cual facilita la identificación de patrones temáticos y prioridades metodológicas.

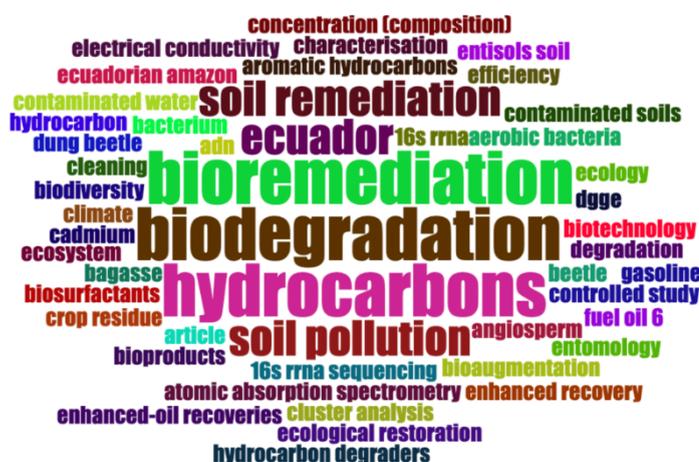
Tabla 8. Frecuencias de términos técnicos relacionados con las técnicas de biorremediación.

Términos	Frecuencia	Porcentaje
Biodegradation, bioremediation, Hydrocarbons y Soil remediation	3	5%
Biosurfactants, total petroleum hydrocarbons, degradation, Ecuador, soil pollution	2	3%
Bacterium, bagasse, biotechnology, bioaugmentation, aerobic bacteria	1	2%

Nota. Elaborado por los autores a partir de los datos de Scopus (procesados en Bibliometrix).

Para adicionar al análisis de frecuencias, se generó una nube de palabras con el programa Biblioshiny a partir de los términos más recurrentes mencionados en los estudios analizados. Esta presentación permite visualizar la relevancia comparativa de cada termino, en función a la aparición, A mayor tamaño de tipografía mayor número de menciones es directamente proporcional. La Figura 6 muestra esta nube de palabras, en la que destacan conceptos como *Hydrocarbons* (*hidrocarburos*), *biodegradation* (*biodegradación*), *bioremediation* (*biorremediación*), *soil pollution* (*contaminación de suelos*) y *Ecuador* evidenciando su centralidad en la investigación sobre biorremediación en el contexto ecuatoriano.

Figura 6. Nube de palabras de las técnicas de biorremediación más frecuentes en estudios científicos en el periodo de 2019 a 2025 en Ecuador.



Nota. Elaborado por los autores, con datos procesados en Bibliometrix.

Con la finalidad de identificar los organismos biológicos más empleados en los estudios de contexto ecuatoriano de biorremediación suelos contaminados con hidrocarburos, se elaboró la Tabla 9 donde se clasifica los organismos usados por cada estudio.

Tabla 9. Organismos utilizados en los estudios de biorremediación en Ecuador

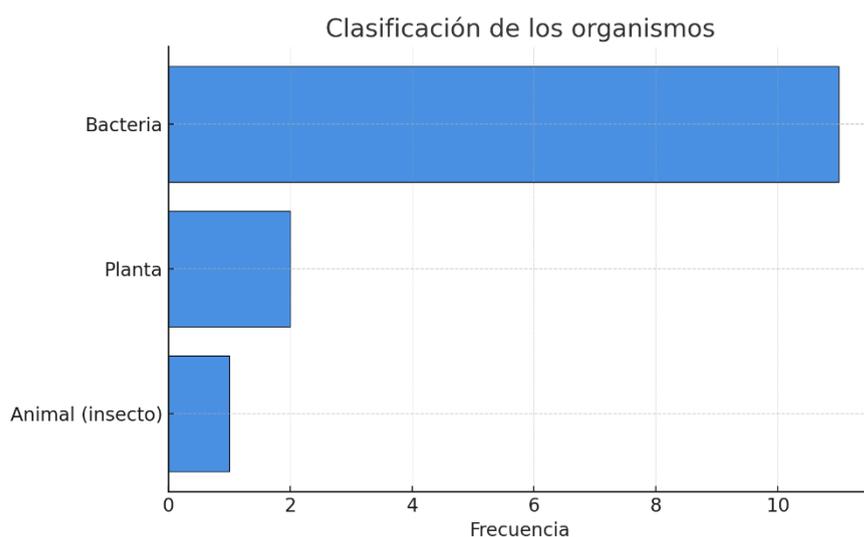
Estudios	Lugar de estudio	Organismos
(Orejuela-Romero et al., 2025)	Francisco de Orellana	<i>Elaeis guineensis</i>
(Camacho et al., 2024)	Esmeraldas	<i>Oryza sativa</i>
(Andrade et al., 2024)	Isla Santay	<i>Lysinibacillus fusiformis</i> , <i>Lysinibacillus boronitolerans</i> , <i>Alcaligenes faecalis</i> y <i>Bacillus soli</i> .
(Pozo-Rivera et al., 2023)	Sucumbíos y Orellana.	<i>Scarabaeinae</i>
(González-Toril et al., 2023)	España y Ecuador/Libertada	<i>Pseudomonas spp.</i> y <i>Brevundimonas spp</i>
(Escudero-López et al., 2022)	Sucumbíos/Orrellana	<i>Pseudomonas stutzeri</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Pseudomonas putida</i> .

(Páliz et al., 2021)	Orellana – Laboratorio AqLab.	<i>Pseudomonas spp</i> , Cepa comercial <i>Pseudomona aeruginosa</i>
(R. A. V. García et al., 2020)	Campo Sacha	Bacterias hidrocarbonoclastas
(V. J. García et al., 2019)	Esmeraldas	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>

Nota. Elaboración de los autores con la base en la revisión de los artículos científicos publicados en Scopus en el periodo de 2019 a 2025.

La Figura 7 presenta la distribución de los tipos de organismos utilizados en los estudios de biorremediación realizados en el contexto ecuatoriano y colaboraciones internacionales. Se observa una clara predominancia de las bacterias, lo cual se alinea con su eficiencia demostrada en la degradación de hidrocarburos. En menor medida, se reporta el uso de plantas, como especies de arroz (*Oryza sativa*) y palma (*Elaeis guineensis*), en enfoques de fitorremediación. Por último, un estudio aislado emplea insectos de la subfamilia *Scarabaeinae*, lo que sugiere nuevas rutas exploratorias en el ámbito de la remediación.

Figura 7. Clasificación de los organismos utilizados para los estudios de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador.



Nota. Elaborado por los autores, a partir de los datos del análisis bibliométrico (Procesado en Colab).

La Tabla 10 muestra la relación entre el contexto ambiental, las condiciones socioeconómicas y las estrategias de biorremediación aplicadas en nueve estudios de caso realizados en distintas regiones del Ecuador. En todos los casos, el contexto ambiental está marcado por la presencia de suelos contaminados debido a derrames de petróleo o derivados como el Fuel Oil, los cuales han afectado tanto ecosistemas naturales como zonas agrícolas.

En cuanto al contexto socioeconómico, los estudios identifican condiciones como la vulnerabilidad de comunidades rurales e indígenas, la dependencia económica de la agricultura, y la disponibilidad local de residuos agroindustriales (como el bagazo de palma y la cascarilla de arroz), lo que hemos notado en la mayoría de los países del contexto Latinoamericano. Estas condiciones han influido directamente en la selección de estrategias de remediación con enfoque local, bajo costo y aplicabilidad en zonas rurales.

Tabla 10. Condiciones socioeconómicas y ambientales que se asocian a la aplicación de estrategias de biorremediación.

N°	Título	Contexto ambiental	Contexto socioeconómico	Estrategia de biorremediación
1	Oil Palm Bagasse as a Treatment for Soils Contaminated with Total Petroleum Hydrocarbons	Francisco de Orellana presenta un suelo afectado por múltiples derrames de petróleo.	El bagazo de palma es un residuo agroindustrial abundante y barato. Además, se fomenta la valorización de los subproductos locales.	El bagazo de la palma es un subproducto local, económico y de fácil acceso por lo que se presenta como buena técnica de biorremediar los suelos que se encuentren contaminados con hidrocarburos.

2	Biorremediation of Soil Sample Contaminated with Crude Oil using Rice Husk-based Biocarbon (<i>Oryza Sativa</i>)	Esmeraldas presenta un suelo contaminado con los derrames petroleros procedentes de las refinerías locales.	El uso del bio-carbón de cascarilla de arroz es una técnica económica, replicable y sobre todo se adecua a zonas rurales.	El uso del bio-carbón de cascarilla de arroz es una solución de biorremediación sostenible y de bajo costo especialmente en suelos sensibles.
3	Hydrocarbon tolerance evaluation of the microbiota associated with the Roystonea oeracea palm from Santay Island (Ecuador)	La Isla Santay ha sido afectada por constantes contaminación de hidrocarburos.	La identificación de plantas nativas capaces de tolerar hidrocarburos y producir biosurfactantes permite generar soluciones accesibles de biorremediación a bajos costos.	Una solución ambiental es aprovechar la microbiota local como una estrategia de biorremediación ecológica y accesible por su bajo costo.
4	Response of dung beetle diversity to remediation of soil ecosystem in the Ecuadorian Amazon.	Se estudiaron cuatro diferentes tipos de ecosistemas de las provincias amazónicas que previamente han sido remediados.	Para la limpieza se lo ha utilizado surfactantes biodegradables, rehusó de suelo para fines agrícolas y bio indicadores biológicos (Escarabajos coprófagos) para evaluar la recuperación del suelo	La combinación de estrategias de biorremediación ambiental, para la limpieza el uso de surfactantes biodegradables, el reusó con fines agrícolas o la reforestación son soluciones económicas y factibles para suelos contaminados, además utilizar bioindicadores ecológicos para comprobar la restauración ecológica es muy factible.
5	Metagenomic analysis of the microbial community at the Riutort oil shale mine (NE Spain):	Presenta un contexto ambiental contaminado con la extracción, transporte y	Las poblaciones cercanas, especialmente indígenas presentan situaciones de	Se propone la selección d microorganismos autóctonos o de consorcio

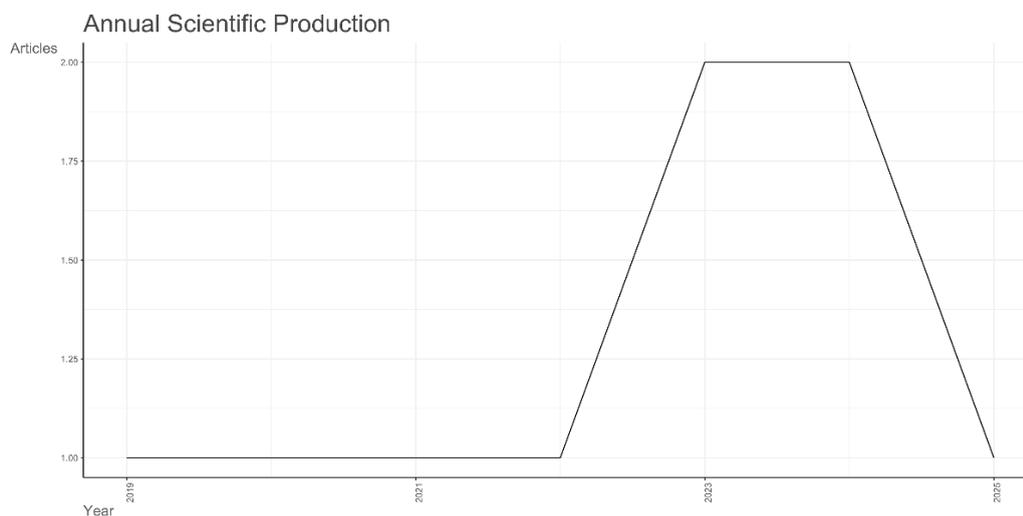
	Potential applications in bioremediation and enhanced oil recovery.	derrames de petróleo.	vulnerabilidad de salud y económica.	microbiano para futuros estudios.
6	Bacterial selection of the <i>Pseudomonas</i> genus with the capacity to treat water and contaminated soils.	La región de la amazonia históricamente ha sido impactada por los diferentes derrames de petróleo que han venido causando fuertes problemas ambientales.	Las provincias de sucumbíos como orellana alberga numerosas comunidades rurales e indígenas lo que de manera urgente se debe incluir soluciones sostenibles y de bajos costos.	Se considera que la bioaumentación combinada con bioestimulación y monitoreo ambiental son soluciones para futuros estudios de biorremediación.
7	Reduction of the soil environmental impact caused by the presence of total petroleum hydrocarbons (TPH) by using <i>Pseudomonas</i> sp.	El suelo del cual se obtuvieron las muestras para análisis de laboratorio presentaba grandes acumulaciones de hidrocarburos totales debido a los reincidentes derrames de petróleo que se han registrado en la provincia de Orellana.	Bioaumentación con bacterias nativas que son extraídas directamente del lugar contaminado es una solución de bajos costos y evita el uso de cepas comerciales que se tienen que importar generando costos elevados.	Biorremediar suelo contaminado con hidrocarburos extrayendo las capas de bacterias del lugar mismo para crear estos microorganismos bacterianos capaces de degradar estos metales pesados es una buena estrategia ambiental.
8	Bioremediation of soil contaminated with hydrocarbons based on bacteria used as bioproducts.	El sitio que se llevó a cabo el estudio, es agrícola que se encuentra afectada por derrame de petróleo, que modifican de manera negativa la estructura, microbiota y fertilidad de la tierra.	Es una zona que depende de la agricultura para su supervivencia, por lo que es necesario y urgente la implementación de estrategias de biorremediación de suelo con técnicas como la usada en este estudio.	La bioaumentación con bioproductos es una buena estrategia sostenible y económica para futuros estudios de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

9	Assessing Bioremediation of Soils Polluted with Fuel Oil 6 by Means of Diffuse Reflectance Spectroscopy.	Los suelos se encuentran contaminados con Fuel Oil N°6, presentan alteraciones fisicoquímicas lo que dificulta el uso agrícola y diversidad microbiota nativa.	Combinación de Bioaumentación (Pseudomonas aeruginosa) con espectroscopia de referencia difusa (Vis-NIR) permite un monitoreo económico y no destructivo.	Usar este tipo de combinación tecnológicas (espectroscopia) y ecológicas (microorganismos autóctonos) permite tratar los suelos que se encuentren contaminados
---	--	--	---	--

Nota. Elaboración propia basada en el análisis contextual de los estudios incluidos en la revisión bibliométrica.

Se evidencia la evolución constante en la producción científica ecuatoriana, mostrando un pico de aumento en 2021 a 2023 (Fig. 8). Además, la evolución de los principales autores de producción científica sobre biorremediación científica en países latinoamericanos en el periodo 2019 al 2025 (Fig.9). A nivel de Latinoamérica México es el país con más citas (142 citas) seguido Brasil (132 citas). En Los estudios ecuatorianos el más citado es (González-Toril et al., 2023), reafirman la pertinencia del abordaje local con enfoques internacionales.

Figura 8. Evolución temporal de la producción ecuatoriana.



Nota: Elaborado por los autores en base a los datos indexados en Scopus (procesados en Bibliometrix)

La Tabla 11 sintetiza los principales indicadores bibliométricos relacionados con la producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, centrados especialmente en el contexto latinoamericano. Se observa que entre los autores más productivos durante el periodo 2020–2025, destacan Rivera G. y Paz-González AD, con publicaciones constantes a lo largo del tiempo. Les siguen otros autores relevantes como Adams RH. y Domínguez-Rodríguez VI., con publicaciones activas entre 2020 y 2024, y Acuña AJ. y Cambarieri L., que concentraron su producción entre 2020 y 2021.

Tabla 11. Indicadores bibliométricos sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

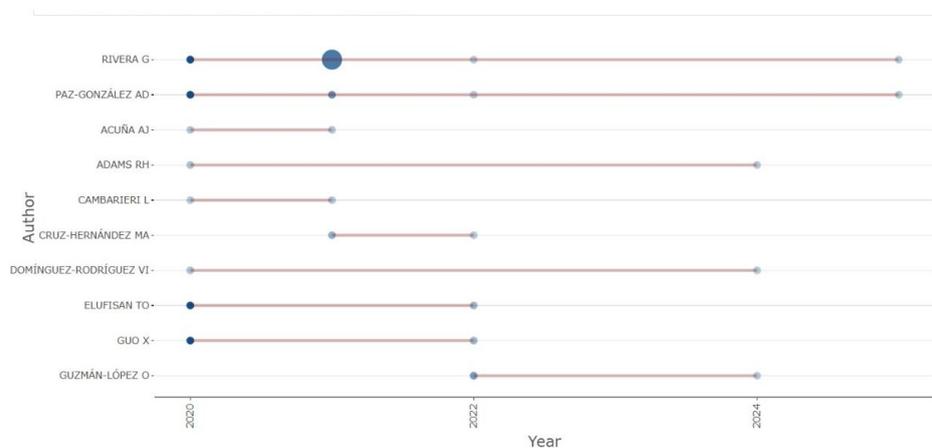
Indicadores Bibliométricos			
Evolución de la producción de autores más relevantes a lo largo del tiempo (Fig. 8)	Latinoamérica	Periodo	Autores
		2020-2025	Rivera G. y Paz-González AD.
		2020-2021	Acuña AJ. Y Cambarieri L.
		2020-2024	Adams RH. y Domínguez-Rodríguez VI.
		2021-2022	Cruz-Hernandez MA.
		2020-2022	Elufisan TO. y Guo X.
Países más citados	Latinoamérica	2022-2024	Gusmán-López O.
		Nº de citas	Países
		142	México
		132	Brasil
		24	Colombia
Numero de citas de estudios científicos sobre biorremediación de	Ecuador	16	Chile
		Nº de citas	Estudios
		5	(González-Toril et al.,2023)
		4	(García et al., 2020)

suelo contaminados.	2	(Pozo-Rivera et al.,2023)
	2	(García et al., 2019)
	2	(Escudero et al., 2022)
	2	(Páliz et al.,2021)
	1	(Camacho et al., 2024)
	0	(Andrade et al, 2024)
	0	(Orejuela-Romero et al.,2025)

Nota. Elaborado por autores en base a los datos del análisis bibliométrico.

La Figura 9 representa visualmente la evolución temporal de estos autores, mostrando cómo se han mantenido o incorporado a la discusión científica a lo largo de los años recientes.

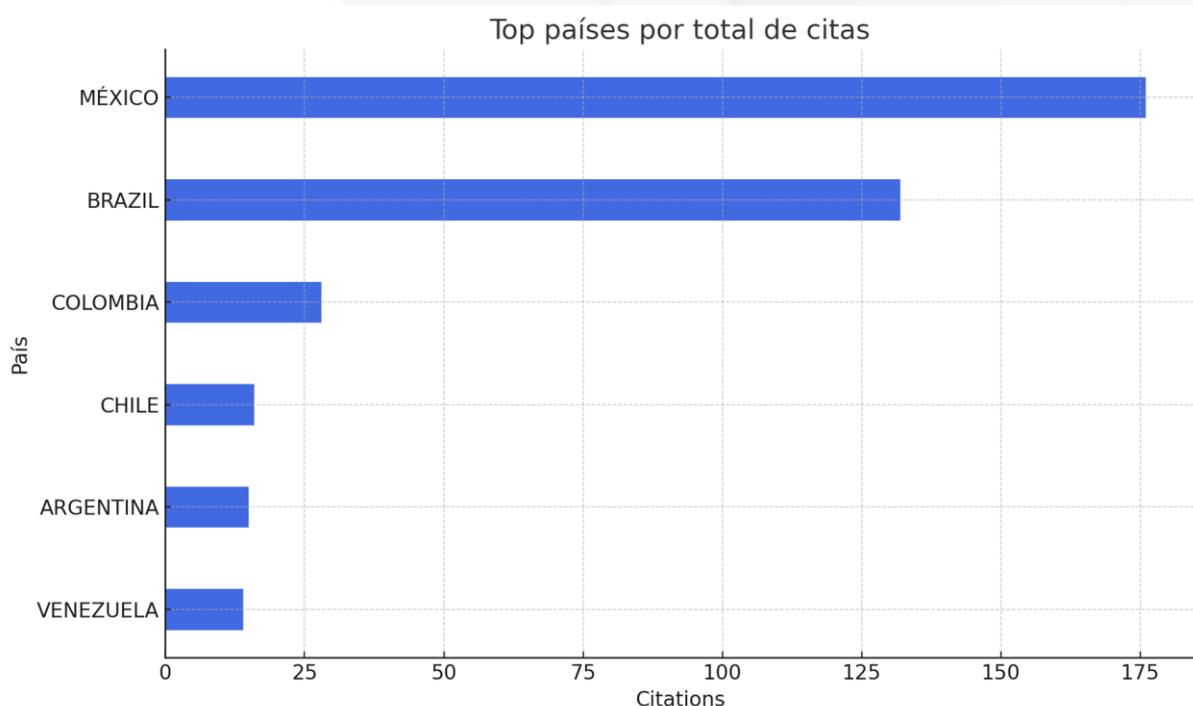
Figura 9. Evolución de los autores en la producción científica Latinoamericana.



Nota. Elaboración de los autores. Se puede ver la evolución de los principales autores de los estudios científicos en Latinoamérica.

El número de citas por país en América Latina, México lidera con 142 citas acumuladas, seguido por Brasil con 132, lo que evidencia una alta visibilidad e impacto de sus investigaciones en la región. En posiciones más bajas se encuentran Colombia 24 y Chile 16, lo que podría relacionarse con una menor concentración de centros de investigación especializados o con la dispersión de esfuerzos científicos en estos países.

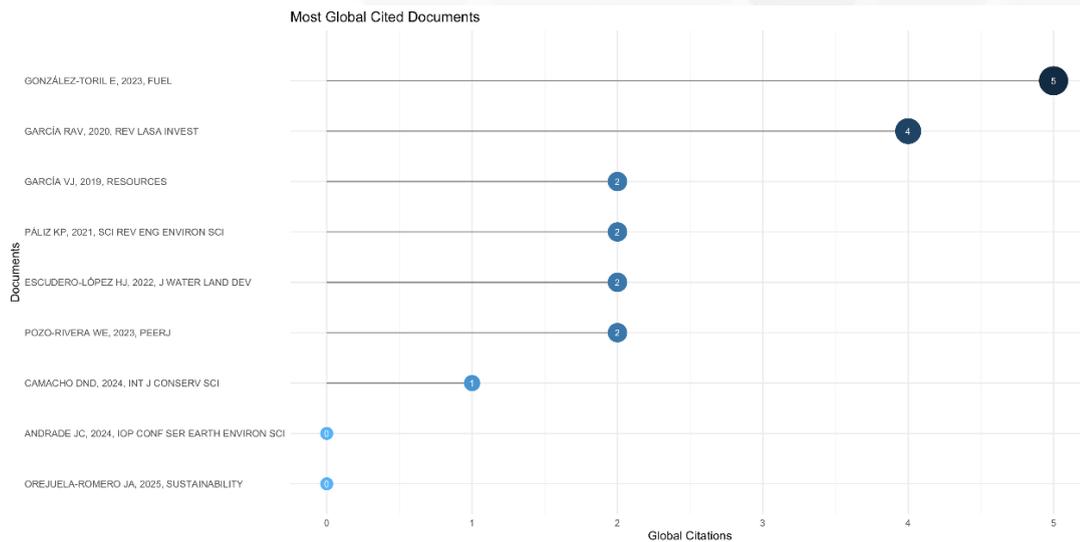
Figura 10. Top de los países Latinoamericanos más citados



Nota: Elaborado por los autores en base a datos de estudios Latinoamericanos (Procesado en Colab).

En el caso ecuatoriano, el análisis muestra que la producción científica nacional aún mantiene un bajo nivel de citación, con solo algunos estudios destacando por su impacto. El trabajo de González-Toril et al. (2023) lidera con 5 citas, seguido por el de García et al. (2020) con 4. Otros estudios, como los de Pozo-Rivera et al. (2023), Escudero et al. (2022) y Páliz et al. (2021), registran entre 2 y 1 citas. En contraste, investigaciones recientes como las de Orejuela-Romero et al. (2025) y Andrade et al. (2024) aún no presentan citas, lo cual puede atribuirse a su reciente publicación o a la falta de difusión en bases de datos internacionales.

Figura 11. Numero de Citas en los estudios de Ecuador.



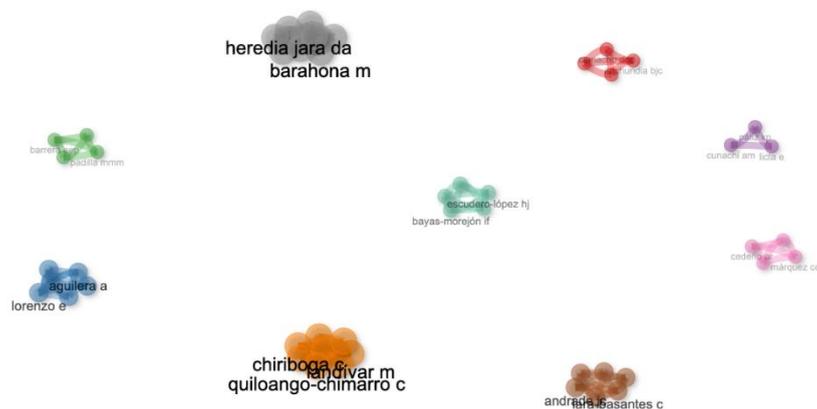
Nota. Elaborado por los autores en base a los datos de estudios de Ecuador (Procesados en Bibliometrix).

El análisis de las redes de colaboración científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador en los últimos cinco años presenta una participación constante entre instituciones nacionales como internacionales. Las coactarías reflejan un trabajo interdisciplinario, pero no se evidencia una conexión significativa entre los autores. Las instituciones nacionales más destacadas esta la Universidad de las fuerzas armadas, la Universidad nacional de Chimborazo, Universidad Técnica de Manabí y centros de Independent researcher, siendo actores claves para la generación de conocimientos científicos. Por otro lado, se evidenciaron cooperaciones internacionales con instituciones de países como España, Italia, Brasil y Venezuela que, con aportes metodológicos, análisis avanzados, desarrollo microbiano, validación de modelos y financiamiento han contribuido en el desarrollo de los estudios ecuatorianos.

Los resultados reflejan que, si bien existen grupos de investigación que abordan la temática de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador, la

colaboración entre autores no es aún significativa. Como se aprecia en la Figura 12, la mayoría de las coautorías están conformadas por pequeños grupos aislados, sin una red consolidada de interacción académica nacional. Esta fragmentación limita la posibilidad de conformar consorcios científicos robustos que impulsen agendas comunes de investigación interdisciplinaria.

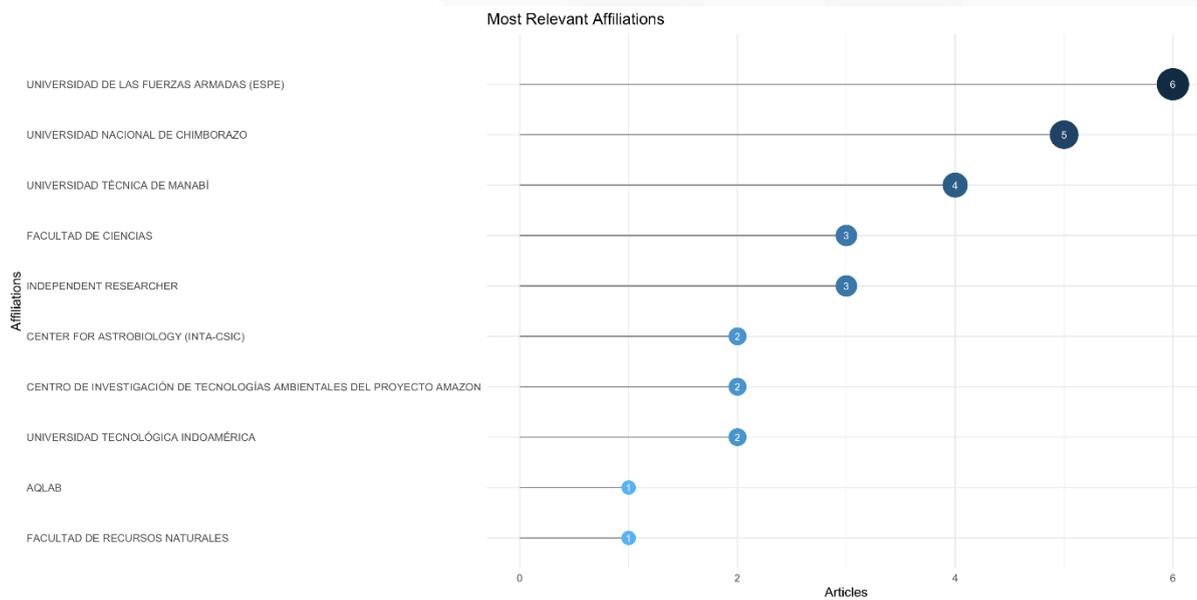
Figura 12. Coautorías de estudios de Ecuador.



Nota: Elaborado por los autores en base a los datos obtenido de Scopus (procesados en Bibliometrix)

Por otro lado, la afiliación institucional revela que la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), la Universidad Nacional de Chimborazo y la Universidad Técnica de Manabí lideran la producción científica en esta línea temática Figura 13. También se evidencia una participación de investigadores independientes, lo cual puede interpretarse como una apertura del campo a diferentes modalidades de producción académica.

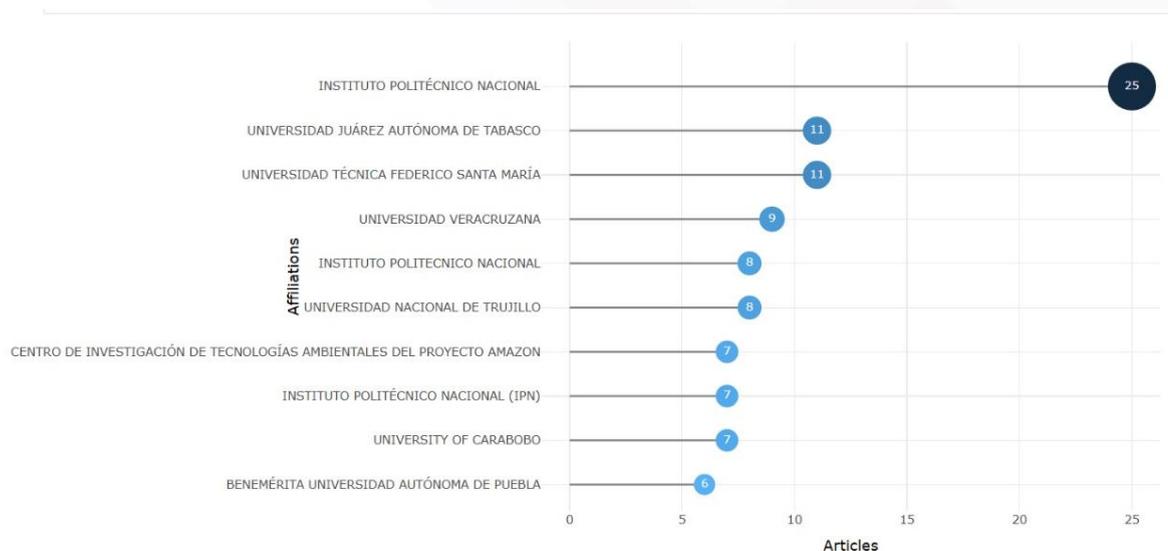
Figura 13. Afiliaciones Institucionales en publicaciones científicas de Ecuador.



Nota. Elaborado por los autores con datos obtenidos en Scopus (procesados en Bibliometrix).

Y en un contexto más amplio, al comparar con el resto de Latinoamérica, se observa que instituciones como el Instituto Politécnico Nacional de México, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile concentran una producción científica considerablemente superior Figura 14. Estas universidades destacan por su volumen de publicaciones, sino también por el establecimiento de redes cooperativas consolidadas, lo que representa un referente regional en cuanto a estrategias colaborativas y generación de conocimiento aplicado a la biorremediación.

Figura 14. Afiliaciones más relevantes de estudios científicos sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en América Latina



Nota. Elaborado por los autores en base a los estudios de Scopus (Procesados en Bibliometrix).

Estos hallazgos permiten identificar la necesidad de fortalecer la cooperación institucional y científica en Ecuador, tanto a nivel nacional como internacional, a través de redes colaborativas que integren capacidades.

Tabla 12. Cooperaciones internacionales en los estudios de Ecuador.

Estudio	Cooperaciones internacionales	
	Países	Actividad
(Orejuela-Romero et al.,2025)	Italia	Soporte metodológico. Análisis avanzados. Visibilidad académica.
(Pozo-Rivera et al.,2023)	Brasil	Aporto con metodologías y análisis.
(González-Toril et al.,2023)	España	Desarrollo microbiano. (Consorcio Riutort). Pruebas de laboratorio-Análisis genético.
(García et al., 2020)	México	Financiamiento Aporte de conocimientos y experiencias.
(García et al., 2019)	Venezuela	Validación y desarrollo del modelo espectroscópico.

Nota. Elaboración de los autores en base al análisis bibliométrico.

Este mapa mundial destaca las afiliaciones internacionales que Ecuador ha establecido importantes vínculos de cooperación científica con diversos países, como se observa en el Mapa de Colaboraciones Internacionales Figura 15. La mayor intensidad de color sobre el territorio ecuatoriano refleja su rol central como país de origen de los estudios sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Entre los países con los que se han identificado colaboraciones destacan España e Italia, cuyas instituciones han contribuido en aspectos metodológicos, análisis avanzados y validación de modelos. Asimismo, se evidencian vínculos con naciones latinoamericanas como Brasil, México, Colombia y Venezuela, lo que refuerza una dinámica regional orientada a enfrentar problemáticas ambientales compartidas.

Estas alianzas científicas han permitido fortalecer las capacidades técnicas y académicas de los equipos ecuatorianos, propiciando un enfoque interdisciplinario y multicultural en el desarrollo de soluciones sostenibles.

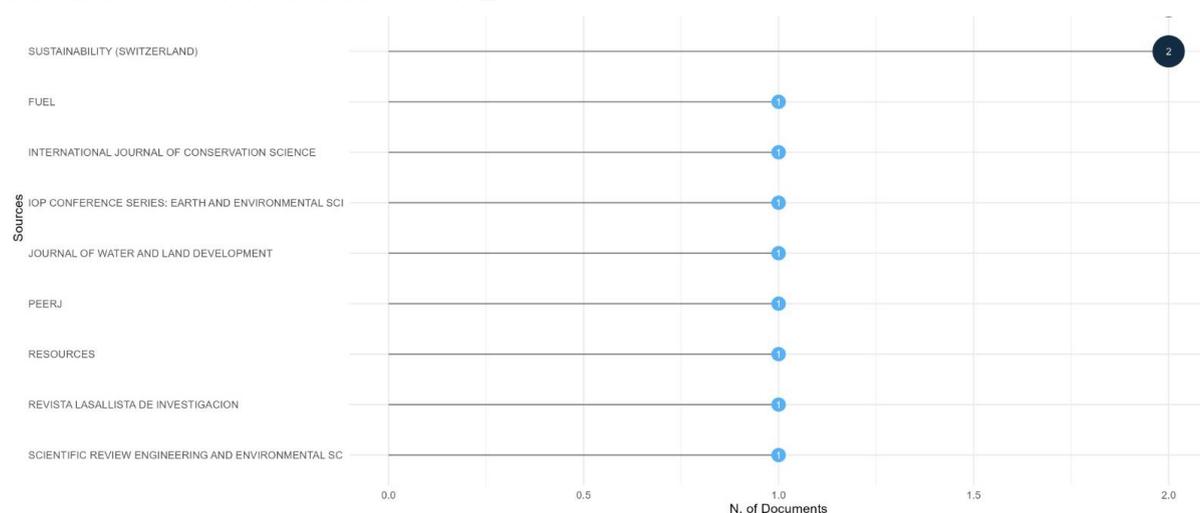
Figura 15 Mapa de la distribución de las cooperaciones Internacionales con los estudios de Ecuador.



Nota. Elaborado por los autores en base a los datos obtenidos de Scopus y procesados en Bibliometrix (Se evidencian los países que colaboraron a los estudios ecuatorianos).

Las fuentes científicas usadas en los estudios de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador presentan un conjunto diverso de revistas, tanto especializadas en medio ambiente como multidisciplinarias. Las publicaciones se enfocaron en fuentes como Sustainability (Switzerland), PeerJ y Resources se encuentran en cuartil (Q1), lo que representa un buen respaldo científico y académico, siendo fuentes reconocidas y de alto impacto; la fuente que se encuentran en los cuartiles (Q2 y Q3) como de International Journal of Conservation Science representan una calidad científica aceptable y las revistas que se encuentran en el cuartil (Q4) son de menos impacto, generalmente tienen un proceso de revisión menos exigente.

Figura 16. Fuentes principales de los estudios científicos de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador.



Nota. Elaboración de los autores en Bibliometrix. Se evidencia las revistas en el cual fueron indexados los estudios de Ecuador.

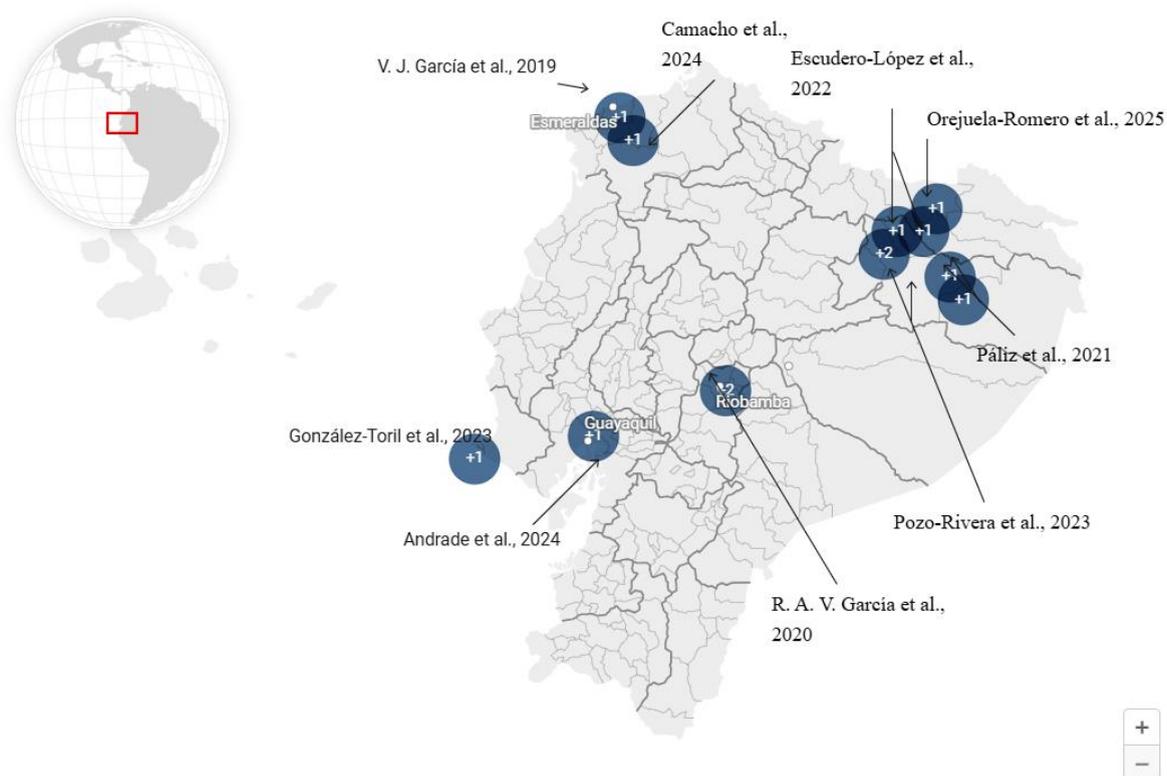
Tabla 13. Cuartiles en las fuentes estudios de biorremediación de suelos contaminados en Ecuador (2019-2025).

Estudio	Fuente	Cuartil
(Orejuela-Romero et al.,2025)	Sustainability (Switzerland)	Q1

(González-Toril et al.,2023)	PeerJ	
(García et al., 2019)	Resources	
(Escudero et al., 2022)	Journal of Water and Land Development	Q2
(Calderon-Tapia et al., 2024)	AIMS Environmental Science	
(Pozo-Rivera et al.,2023)	Fuel	Q3
(Páliz et al.,2021)	Scientific Review Engineering and Environmental Sciences	
(García et al., 2020)	Revista Lasallista de Investigacion	Q4

Nota. Elaboración de los autores. Se puede evidenciar que hay tres estudios indexados en fuentes de alta calidad (Q1).

Figura 17. Mapa de Ecuador con la ubicación del desarrollo de los estudios científicos



Nota: Elaborado por los autores. En el mapa de Ecuador se señala los lugares en los que se desarrollaron los estudios de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

La Figura 17 presenta la localización geográfica de los estudios realizados en el Ecuador sobre la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Se evidencia una mayor concentración de investigaciones en la región amazónica, particularmente en las provincias de Orellana y Sucumbíos, zonas históricamente impactadas por actividades petroleras. Esta alta recurrencia refleja tanto la gravedad de la problemática ambiental en estas áreas como el interés científico por proponer soluciones adaptadas al entorno.

En segundo orden, se destacan estudios en Esmeraldas, Guayas y Chimborazo, donde también se han implementado propuestas de laboratorio con implicaciones prácticas. La distribución es complementada por investigaciones en zonas específicas como la Isla Santay, lo que revela un esfuerzo por cubrir distintas realidades ecosistémicas del país.

CAPÍTULO V: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones

5.1. Discusión

En este estudio de investigación se permitió realizar un análisis crítico de la producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador entre 2019 e inicios del 2025, con énfasis en sus tendencias metodológicas, autores implicados y redes de colaboración. Los resultados revelan, la calidad medida por los cuartiles y el impacto medida por citas esto demostró que aún dentro la comunidad científica global, son limitados, este crecimiento aún no se convierte en un desarrollo consolidado ni visible a nivel mundial. La mayoría de las investigaciones se concentran en pocas instituciones, el Ecuador hasta el momento presentan bajos niveles de citación en el ámbito académico de alto impacto, al trabajar únicamente con la base de datos Scopus, se visibiliza con mayor claridad la brecha que existe, la baja frecuencia de publicaciones en revistas de alto impacto, la débil construcción de redes de colaboración interinstitucional, esta realidad demuestra la necesidad urgente de fortalecer el desarrollo estructural. Aunque estos desafíos superan el alcance individual de una sola investigación, el presente trabajo aporta evidencia empírica que puede servir como insumo para políticas públicas, programas de formación, y decisiones institucionales orientadas a cerrar esta brecha que existe entre Ecuador y el mundo.

Uno de los hallazgos más relevantes de nuestro análisis en relación con las técnicas, que se aplican y destacan en los estudios de Ecuador, predomina la bioaumentación y la bioestimulación además se visualizan otras estrategias como fitorremediación, especialmente en zonas rurales o amazónicas. Entre los organismos más utilizados lidera las bacterias del género *Pseudomonas*, que está ampliamente distribuido por el mundo, pero también se ha identificado el uso de cepas bacterianas autóctonas adaptadas a las condiciones ecológicas

locales. Además, varios estudios emplean residuos agroindustriales, como el bagazo de palma o la cascarilla de arroz, y aplican métodos de monitoreo mediante bioindicadores. Todo ello refleja una clara orientación hacia soluciones sostenibles, de bajo costo y contextualizadas, que responden a las necesidades socioambientales del país. Esta tendencia se alinea con enfoques internacionales que promueven el uso de recursos locales como elemento clave para la viabilidad técnica, ecológica y social de los procesos de biorremediación y se alinea con lo señalado por (Hoang et al., 2021) quienes sostienen que la integración de materiales locales es fundamental para asegurar la viabilidad técnica, ecológica y social de los procesos de biorremediación en territorios vulnerables. Así, pese a las limitaciones en términos de impacto internacional, los enfoques metodológicos adoptados en Ecuador evidencian un camino propio y prometedor, que podría consolidarse mediante un mayor apoyo institucional y científico.

El compostajes combinados con consorcios bacterianos, son otro de los estudios fundamentales dentro de la investigación aplicada en biotecnología del contexto ambiental, ya que no solo buscan comprender fenómenos, sino probar y validar técnicas concretas que puedan ser utilizadas para resolver problemas ambientales reales, como lo hicieron (Orejuela-Romero et al., 2025) y (Camacho et al., 2024), los cuales están bien documentados y adaptados al contexto local. De manera complementaria, una revisión regional más amplia realizada por (Darío et al., 2024) respalda esta tendencia, al evidenciar que la biorremediación es actualmente la técnica más empleada por su alta eficiencia, con tasas de remoción que oscilan entre el 8,1 % y el 96,4 %, dependiendo de la estrategia aplicada. En ese análisis, se señala que las bacterias autóctonas representan el 25,9 % de las técnicas utilizadas, lo que guarda coherencia con los resultados encontrados en Ecuador, donde también predominan los microorganismos nativos como agentes clave en los procesos de bioremediación.

A pesar del crecimiento sostenido en la producción científica ecuatoriana sobre biorremediación, su volumen e impacto como ya se ha mencionado aún se encuentran por debajo de países como México, Brazil, Colombia y Chile, donde existen redes científicas consolidadas y mayor disponibilidad de financiamiento para investigación. Este contraste pone en evidencia la necesidad de fortalecer las capacidades estructurales y de cooperación científica en el país.

El análisis complementario de la literatura latinoamericana evidencia que, en al menos ocho países, se identifican buenas prácticas replicables, especialmente en el uso de técnicas combinadas como la bioaumentación con consorcios bacterianos y compostajes orgánicos. Por ejemplo, en Brasil, (Rosa et al., 2021) documentan una alta eficiencia en la degradación de hidrocarburos mediante el uso de residuos agrícolas y bacterias autóctonas en ambientes amazónicos; en México, estudios como el (Cruz-Hernández et al., 2021) integran monitoreo biológico con técnicas de biorremediación, logrando tasas de remoción superiores al 80%. Estas estrategias no solo evidencian la viabilidad técnica de la biorremediación, sino que ofrecen modelos que pueden ser adaptados al contexto ecuatoriano, particularmente en regiones rurales o amazónicas con limitaciones económicas y alta vulnerabilidad ambiental, reforzando así la validez del enfoque local y facilitando la identificación de buenas prácticas replicables desde otras realidades internacionales. especialmente en el uso de técnicas combinadas como la bioaumentación con consorcios bacterianos y compostajes orgánicos. Por ejemplo, iniciativas desarrolladas en Brasil, México y España han demostrado altos niveles de eficiencia en la remoción de hidrocarburos mediante el aprovechamiento de microorganismos autóctonos, residuos agrícolas y tecnologías complementarias como la espectroscopía o el monitoreo biológico. Estas estrategias no solo evidencian la viabilidad técnica de la

biorremediación, sino que ofrecen modelos que pueden ser adaptados al contexto ecuatoriano, particularmente en regiones rurales o amazónicas con limitaciones económicas y alta vulnerabilidad ambiental, reforzando así la validez del enfoque local y facilitando la identificación de buenas prácticas replicables desde otras realidades internacionales.

Otro importante resultado que se ha encontrado en el desarrollo del análisis bibliométrico es el porcentaje considerable en la mayoría de las publicaciones ecuatorianas se encuentran en revistas de bajo impacto (Cuartil Q3 y Q4), lo que posiblemente se limite la observación e influencia de los estudios en un contexto internacional. Esta situación es similar en América Latina en el que (Velásquez & Tocuy O, 2021) ha desarrollado un análisis sobre las diferentes revistas indexadas en Scopus, Web of Science (WoS) señalando que, aunque haya crecientes, los índices de internacionalización son bajos, registrando una escasa colaboración internacional. Tal realidad manifiesta la necesidad de fortalecer la calidad científica, promover que las publicaciones sean indexadas en revistas de alto impacto (Cuartil Q1), y buscar colaboraciones internacionales.

Las instituciones que lideran los estudios ecuatorianos están, la universidad de las fuerzas armadas ESPE, Universidad Nacional de Chimborazo y centros de investigaciones con destacada participación en los estudios que tienen la finalidad de solucionar los grandes problemas ambientales. Países como España, México, Venezuela e Italia han sido participes en los estudios de Ecuador, aportando con conocimientos, análisis, tecnologías, el flujo de los datos, formación del capital humano, con el fin de buscar estrategias sostenibles. En Brasil se han creado iniciativas como Biota-FAPESP que han logrado la integración de instituciones académicas, gubernamentales, ONGs e incluso sectores privados en proyectos enfocados en mejoras ambientales (Rosa et al., 2021). Ecuador podría ir aplicando este tipo de modelos a

menor escala para permitir el fortalecimiento de consorcios, repositorios nacionales, encuentros entre autores o instituciones que tengan enfoques ambientales y biotecnológicos.

Otra observación destacada del análisis bibliométrico que fue muy notoria al visualizar el mapa de Ecuador y sus estudios, es la ausencia de investigaciones sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en la región sur del Ecuador. Esta ausencia no necesariamente indica una falta de contaminación ambiental, sino que puede responder a una orientación temática y territorial distinta de las investigaciones realizadas de esa zona. A diferencia del norte, centro y oeste del país donde la actividad petrolera ha tenido una fuerte presencia histórica y, por tanto, genera investigaciones enfocadas en hidrocarburos, el sur de Ecuador provincias como Loja, Zamora Chinchipe o El Oro ha estado más asociado a la minería metálica legal e ilegal, lo cual ha provocado una concentración de estudios centrados en la contaminación por metales pesados, como mercurio, plomo y arsénico, en cuerpos de agua y suelos.

En este contexto, la falta de publicaciones sobre hidrocarburos en el sur puede explicarse por la especialización temática de las instituciones y centros de investigación locales, los cuales responden a problemáticas ambientales prioritarias en sus territorios. Esto evidencia la necesidad de fomentar agendas de investigación más integrales y articuladas territorialmente, que consideren la diversidad de contaminantes y ecosistemas afectados a nivel nacional. Además, se sugiere impulsar investigaciones comparativas que analicen los impactos de distintos tipos de contaminación hidrocarburos vs. metales pesados en el suelo, con el fin de generar soluciones técnicas diferenciadas pero complementarias.

En definitiva, los hallazgos de este análisis bibliométrico no solo permiten comprender el estado actual de la investigación sobre biorremediación de suelos contaminados con

hidrocarburos en Ecuador, sino que también abren líneas de reflexión sobre los desafíos estructurales, institucionales y científicos que enfrenta el país. Si bien se identifican avances metodológicos relevantes, una inclinación hacia prácticas sostenibles y una incipiente articulación internacional, los bajos niveles de citación, la concentración institucional del conocimiento, la escasa presencia en revistas de alto impacto y las brechas territoriales ponen de manifiesto la necesidad de consolidar un ecosistema de investigación más robusto, equitativo y articulado. Este trabajo, al ofrecer una visión crítica y respaldada por evidencia empírica, puede servir como insumo para la formulación de políticas científicas, el diseño de estrategias de financiamiento y el fortalecimiento de agendas territoriales e interinstitucionales, contribuyendo así para poder cerrar la brecha entre el conocimiento generado localmente y su inserción en el circuito científico global.

5.2. Conclusiones

El presente estudio bibliométrico sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador permitió evidenciar una evolución sostenida en la producción científica nacional entre 2019 y 2025, en relación al total de los 21 estudios, de los cuales, al aplicar un proceso riguroso de limpieza, validación análisis de relevancia, se seleccionaron 9 artículos científicos enfocados directamente al tema. Las principales tendencias de biorremediación sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador, los resultados evidencian un crecimiento, con realce a partir del 2022 y 2023. Aunque aún mínima frente a otros países latinoamericanos como México o Brasil, este crecimiento muestra un compromiso creciente de la academia y centros de investigación por abordar problemáticas ambientales asociadas a la actividad petrolera, particularmente en la región amazónica.

Se planteó evaluar la evolución temporal y cuantificar el impacto mediante indicadores bibliométricos, se evidenció que si bien es cierto la producción ecuatoriana es modesta en términos cuantitativos, existen signos de consolidación a partir del 2021. A nivel regional, México es el país con más citaciones 142 seguido de Brasil con 132, lo que demuestra el alto trabajo de estos países de investigaciones científicas de biorremediación. En contexto ecuatoriano, el artículo con más citas fue el de Gonzales-Torres et al. (2023) con cinco citas, reflejando el bajo nivel de visibilidad de los estudios nacionales en comparación a los de países de América Latina. Sin embargo, este análisis indica una visibilidad de oportunidades para fortalecer la producción científica ecuatoriana a través de estrategias de publicaciones internacionales y cooperaciones académicas.

Las técnicas de mayor frecuencia en los estudios ecuatorianos fueron la bioaumentación, bioestimulación y fitorremediación, con un uso destacado de bacterias autóctonas, especialmente del género *Pseudomonas*. Este patrón coincide con las tendencias latinoamericanas, donde también se priorizan soluciones basadas en microorganismos locales por su eficiencia, bajo costo y adaptabilidad ecológica. Adicionalmente, la incorporación de residuos agroindustriales como el bagazo de palma o la cascarilla de arroz y el uso de tecnologías como la espectroscopía reflejan enfoques integradores, sostenibles e innovadores.

En el enfoque de análisis de red de coautorías y colaboraciones institucionales, se dedujo que los investigadores ecuatorianos tienden a trabajar de manera aislada, sin redes de coautorías consolidadas. No se evidenciaron patrones de coescritoras ni mecanismos que se note la integración entre universidades locales. Los resultados también destacan que, si bien existe producción académica en diversas regiones del país, esta se concentra principalmente en las provincias amazónicas y costeras afectadas por derrames, y está liderada por instituciones como la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) y la Universidad Nacional de Chimborazo. No obstante, las publicaciones ecuatorianas se ubican predominantemente en revistas de cuartil Q3 y Q4, y muestran redes de colaboración científica aún limitadas, lo cual reduce su impacto e internacionalización. De los 9 artículos seleccionados se evidenció que las principales revistas tres como Sustainability, PeerJ y Resources se encuentran en niveles de alta calidad (Q1), y los demás estudios están en niveles medios (Q2 y Q3) o de baja calidad (Q4). Estos resultados indican que existen una proporción significativa en revistas de alto impacto, en mayor proporción se encuentran en menos factor de visibilidad. Por ello la elección de revistas con mejor calidad pueden ayudar a que los estudios tengan mejor visibilidad nacional e internacional.

La comparación de estudios latinoamericanos permitió el reforzamiento de los diferentes hallazgos. Los filtros latinoamericanos identificaron patrones similares como las técnicas, donde bioaumentación y fitorremediación son las más usadas, así mismo el implemento de residuos orgánicos. Países como México y Brasil han logrado consolidar redes nacionales, lo que contrasta la realidad de Ecuador donde aún no existen plataformas formales de vinculaciones entre autores e instituciones académicas públicas o privadas.

De manera general, Ecuador presenta un crecimiento en estudios científicos, con enfoques metodológicos que se adaptan a las condiciones locales, pero enfrenta importantes limitaciones en citaciones, colaboraciones locales e internacionales. Este trabajo de titulación ha evidenciado la urgente necesidad de fomentar redes de investigaciones, políticas institucionales que apoyen las publicaciones científicas, generar repositorios para autores nacionales y globales. De esta manera será posible ir consolidando un sistema de ciencia y biotecnología que respondan a los desafíos que presenta el país y de esta manera fortalecer soluciones sostenibles a la contaminación de suelos con hidrocarburos. La experiencia de programas regionales como Biota-FAPESP sugiere que Ecuador podría avanzar en la creación de redes de cooperación científica más sólidas, fomentando consorcios interinstitucionales y mayor visibilidad de sus estudios en foros globales.

5.3. Recomendaciones

Como línea de trabajo futuro, se sugiere ampliar este tipo de análisis bibliométrico incluyendo otras bases de datos científicas como Web of Science, RedALyC, SciELO o Google Scholar. Esto permitiría incorporar estudios relevantes que no aparecen en Scopus y ofrecer una visión más amplia y representativa de la producción científica ecuatoriana sobre biorremediación.

También es fundamental fomentar espacios de encuentro entre investigadores ecuatorianos, ya sea a través de congresos nacionales, seminarios, talleres o plataformas virtuales. Estos espacios pueden facilitar el intercambio de ideas, la construcción de proyectos conjuntos y el fortalecimiento de redes de colaboración entre universidades, centros de investigación y otras instituciones, tanto públicas como privadas. Una opción a considerar es el desarrollo de consorcios científicos similares al modelo de la red Biota en Brasil, que ha demostrado ser eficaz para articular esfuerzos interdisciplinarios.

Desde el ámbito estatal, se recomienda que instituciones como el Ministerio del Ambiente, Energía y Minas incluyan en su normativa ambiental las tecnologías de biorremediación desarrolladas por investigadores locales. Estas soluciones, al basarse en microorganismos autóctonos y tener costos accesibles, pueden ser clave para resolver problemas ambientales de manera sostenible y contextualizada.

Asimismo, sería conveniente establecer alianzas a largo plazo con universidades y centros de investigación de países con experiencia consolidada en esta área, como México, Brasil y España. Estas alianzas pueden favorecer el intercambio de conocimientos, recursos tecnológicos y metodologías.

Otro aspecto relevante es impulsar la publicación de los estudios ecuatorianos en inglés y en revistas científicas de alto impacto. Esto contribuiría a visibilizar internacionalmente el trabajo que se realiza en el país y a posicionar a Ecuador como un referente emergente en el campo de la biorremediación.

De igual forma, es importante valorar e integrar los saberes ancestrales y el conocimiento de las comunidades locales en el diseño e implementación de los proyectos de remediación. Estas comunidades, al convivir directamente con los impactos ambientales, poseen experiencias y prácticas que pueden enriquecer las soluciones tecnológicas desde una perspectiva intercultural y participativa.

Para fortalecer el acceso al conocimiento, se propone la creación de una plataforma digital pública en la que se puedan registrar y consultar los resultados experimentales, protocolos, artículos científicos, tesis y otros productos relacionados con la biorremediación en Ecuador. Esta base de datos debe ser de acceso libre y estar disponible para investigadores, estudiantes, tomadores de decisiones y ciudadanía en general.

Además, se recomienda que las universidades y centros educativos prioricen la formación de profesionales en áreas clave como microbiología ambiental, biotecnología, ciencias del suelo, química ambiental y conservación. Esto puede complementarse con políticas de becas, apoyo financiero para movilidad académica y fondos para la publicación de resultados científicos.

Finalmente, se sugiere establecer mecanismos de seguimiento periódico al menos cada tres años sobre la evolución de la producción científica en este campo. Esta evaluación permitiría identificar avances, desafíos persistentes y nuevas áreas de oportunidad, orientando así la toma de decisiones estratégicas con base en datos actualizados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, J. C., Mafla, S., Riofrío, K., Hernández, J., Tobes, I., & Lara-Basantes, C. (2024). Hydrocarbon tolerance evaluation of the microbiota associated with the Roystonea oleracea palm from Santay Island (Ecuador). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1434(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1434/1/012005>
- Araújo, H. W. C., Andrade, R. F. S., Montero-Rodríguez, D., Rubio-Ribeaux, D., Alves Da Silva, C. A., & Campos-Takaki, G. M. (2019). Sustainable biosurfactant produced by *Serratia marcescens* UCP 1549 and its suitability for agricultural and marine bioremediation applications. *Microbial Cell Factories*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-018-1046-0>
- Benítez, L. P. T., Miranda, L. M., & Castro, C. A. C. (2022). Phytoremediation to Remove Pollutants from Water, Leachates and Soils. *Chemical Engineering Transactions*, 92, 553–558. <https://doi.org/10.3303/CET2292093>
- Bidja Abena, M. T., Chen, G., Chen, Z., Zheng, X., Li, S., Li, T., & Zhong, W. (2020). Microbial diversity changes and enrichment of potential petroleum hydrocarbon degraders in crude oil-, diesel-, and gasoline-contaminated soil. *3 Biotech*, 10(2). <https://doi.org/10.1007/s13205-019-2027-7>
- Camacho, D. N. D., Macías, T. L. S., Riera, M. A., & Anchundia, B. J. C. (2024). BIOREMEDIATION OF SOIL SAMPLES CONTAMINATED WITH CRUDE OIL USING RICE HUCK-BASED BIOCARBON (ORYZA SATIVA). *International Journal of Conservation Science*, 15(2), 1129–1144. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.02.25>
- Cambarieri, L., Acuña, A. J., & Pucci, G. N. (2021). Optimizing a biostimulation process in a soil of Río Gallegos, Argentina, for use in bioremediation of hydrocarbons | Optimización de un proceso de bioestimulación en un suelo de Río Gallegos, Argentina,

para su utilización en biorremediación de hidrocarb. *Ecosistemas*, 30(1).

<https://doi.org/10.7818/ECOS.2084>

Castillo-Campos, E., Mugica-Álvarez, V., Roldán-Carillo, T. G., Olgún-Lora, P., & Castorena-Cortés, G. T. (2021). Modification of wettability and reduction of interfacial tension mechanisms involved in the release and enhanced biodegradation of heavy oil by a biosurfactant. *Revista Mexicana de Ingeniera Química*, 20(3).

<https://doi.org/10.24275/RMIQ/IA2427>

Chan-Quijano, J. G., Cach-Pérez, M. J., Valdez-Hernández, M., González-Salvatierra, C., & Cecon, E. (2023). Physiological performance of two tree species in oil-contaminated soil | Desempeño fisiológico de dos especies arbóreas en un suelo contaminado con petróleo. *Botanical Sciences*, 101(1), 197–216. <https://doi.org/10.17129/botsci.3060>

Cheffi, M., Hentati, D., Chebbi, A., Mhiri, N., Sayadi, S., Marqués, A. M., & Chamkha, M. (2020). Isolation and characterization of a newly naphthalene-degrading *Halomonas pacifica*, strain Cnaph3: biodegradation and biosurfactant production studies. *3 Biotech*, 10(3). <https://doi.org/10.1007/s13205-020-2085-x>

Cruz-Hernández, M. A., Reyes-Peralta, J., Mendoza-Herrera, A., Rivera, G., & Bocanegra-García, V. (2021). Characterization of a microbacterium sp. Strain isolated from soils contaminated with hydrocarbons in the Burgos Basin, Mexico | Caracterización de una cepa de microbacterium sp. Aislada en suelos contaminados con hidrocarburos de la cuenca de Burgos, Méx. *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*, 37, 227–235. <https://doi.org/10.20937/RICA.53837>

Cruz-Narváez, Y., Rico-Arzate, E., Castro-Arellano, J. J., Noriega-Altamirano, G., Piña-Escobedo, A., Murugesan, S., & García-Mena, J. (2019). Obtaining microorganisms in cloud forest soils for the degradation of aromatic hydrocarbons | Obtención de microorganismos en suelos de un bosque de niebla, para la degradación de hidrocarburos

aromáticos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 25(1), 95–106.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.06.055>

Darío, T., Velásquez, M., & Velasquez, M. (2024). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica: revisión entre 2010-2023. *Revista Estudios Ambientales*, 12(1), 27–43.

Davoodi, S. M., Miri, S., Brar, S. K., & Martel, R. (2023). *Formulation of Synthetic Bacteria Consortia for Enzymatic Biodegradation of Polyaromatic Hydrocarbons contaminated soil: Soil Column Study*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2365484/v1>

de la Cruz-Izquierdo, R. I., Paz-González, A. D., Reyes-Espinosa, F., Vazquez-Jimenez, L. K., Rivera, G., Salinas-Sandoval, M., & González-Domínguez, M. I. (2021). Analysis of phenanthrene degradation by Ascomycota fungi isolated from contaminated soil from Reynosa, Mexico. *Letters in Applied Microbiology*, 72(5), 542–555.
<https://doi.org/10.1111/lam.13451>

Dike, C. C., Rani Batra, A., Khudur, L. S., Nahar, K., & Ball, A. S. (2024). Effect of the Application of Ochrobactrum sp.-Immobilised Biochar on the Remediation of Diesel-Contaminated Soil. *Toxics*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/toxics12040234>

Dike, C. C., Shahsavari, E., Surapaneni, A., Shah, K., & Ball, A. S. (2021). Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils? In *Environment International* (Vol. 154). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106553>

Domínguez-Rodríguez, V. I., Hernández-Acosta, L., Gómez-Cruz, R., Rosique-Gil, J. E., Adams, R. H., & Guzmán-Osorio, F. J. (2024). Recovery of Petroleum Brine-Contaminated Soil by Eleocharis sp. in a Tropical Marshland. *Tropical Life Sciences Research*, 35(2), 141–165. <https://doi.org/10.21315/tlsr2024.35.2.7>

- Du, J., Jia, T., Liu, J., & Chai, B. (2024). Relationships among protozoa, bacteria and fungi in polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115904>
- El-Housseiny, G. S., Aboshanab, K. M., Aboulwafa, M. M., & Hassouna, N. A. (2020). Structural and Physicochemical Characterization of Rhamnolipids produced by *Pseudomonas aeruginosa* P6. *AMB Express*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-020-01141-0>
- Escudero-López, H. J., Jácome-Pilco, C. R., Sanaguano-Salguero, H. D. R., Bayas-Morejón, I. F., & Serrano-Carrillo, K. A. (2022). Bacterial selection of the *Pseudomonas* genus with the capacity to treat water and contaminated soils. *Journal of Water and Land Development*, 53, 238–241. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140803>
- García, R. A. V., Barrera, A. E. P., Taco, C. W. T., & Padilla, M. M. M. (2020). Bioremediation of soils contaminated with hydrocarbons based on bacteria used as bioproducts | Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos. *Revista Lasallista De Investigacion*, 17(1), 177–187. <https://doi.org/10.22507/rli.v17n1a19>
- García, V. J., Márquez, C. O., Cedeño, A. R., & Montesdeoca, K. G. (2019). Assessing bioremediation of soils polluted with fuel oil 6 by means of diffuse reflectance spectroscopy. *Resources*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/resources8010036>
- García-Uitz, K., León-Pech, M. G., Cruz, J. C., Moreno-Andrade, I., Giácoman-Vallejos, G., & Ponce-Caballero, C. (2024). Isolation and characterization of microbial diversity in phenanthrene-degrading consortia in a pollution zone in Ciudad del Carmen, Mexico | Aislamiento y caracterización de la diversidad microbiana de consorcios degradadores de fenantreno de una zona con. *Revista Mexicana De Ingeniera Quimica*, 23(2). <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio24241>

- González-Toril, E., Aguilera, A., Permanyer, A., Gallego, J. R., Márquez, G., & Lorenzo, E. (2023). Metagenomic analysis of the microbial community at the Riutort oil shale mine (NE Spain): Potential applications in bioremediation and enhanced oil recovery. *Fuel*, 349. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128609>
- Hariyo, D. D., Saparrat, M. C. N., & Barrera, M. D. (2020). Changes in microbial communities during phytoremediation of contaminated soil with phenanthrene. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51(4), 1853–1860. <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00309-x>
- Hidalgo-Lasso, D., García-Villacís, K., Urvina Ulloa, J., Marín Tapia, D., Gómez Ortega, P., & Coulon, F. (2024). Updating risk remediation-endpoints for petroleum-contaminated soils? A case study in the Ecuadorian Amazon region. *Heliyon*, 10(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30395>
- Hoang, S. A., Seshadri, B., Bolan, N. S., Sarkar, B., Lamb, D., Vinu, A., Wijesekara, H., Vithanage, M., Liyanage, C., Kolivabandara, P. A., Wang, H., & Kirkham, M. B. (2021). Mitigation of petroleum-hydrocarbon-contaminated hazardous soils using organic amendments: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 416. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125702>
- Kumari, B., & Chandra, R. (2023). Benzo[a]pyrene degradation from hydrocarbon-contaminated soil and their degrading metabolites by *Stutzerimonas stutzeri* (LOBP-19A). *Waste Management Bulletin*, 1(3), 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.07.006>
- Márquez, A., Guevara, E., Pérez, S., Freytez, E., Maldonado, J., & Buroz, E. (2023). Soil and groundwater remediation proposal for hydrocarbons in a tropical aquifer. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 11(2), 141–168. <https://doi.org/10.1080/23249676.2022.2089246>

- Márquez-Romance, A. M., Cárdenas-Izaguirre, S. F., Guevara-Pérez, E., Pérez-Pacheco, S. A., Freytez-Boggio, E., Maldonado-Maldonado, J. I., & Buroz-Castillo, E. (2022). An approach to remediation of a tropical aquifer contaminated with hydrocarbons. *Environmental Quality Management*, *31*(4), 357–390.
<https://doi.org/10.1002/tqem.21820>
- Mauricio-Gutiérrez, A., Jiménez-Salgado, T., Tapia-Hernández, A., & Romero-Arenas, O. (2022). Diesel degradation by residual substrate of *Agaricus bisporus* at the microcosm level | Degradación de diésel por sustrato residual de *Agaricus bisporus* a nivel microcosmos. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, *13*(2), 223–234.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2656>
- Minnikova, T., Kolesnikov, S., Minin, N., Gorovtsov, A., Vasilchenko, N., & Chistyakov, V. (2023). The Influence of Remediation with *Bacillus* and *Paenibacillus* Strains and Biochar on the Biological Activity of Petroleum-Hydrocarbon-Contaminated Haplic Chernozem. *Agriculture (Switzerland)*, *13*(3).
<https://doi.org/10.3390/agriculture13030719>
- Morales-Guzmán, G., Ferrera-Cerrato, R., Esquivel-Cote, R., Alarcón, A., Rivera-Cruz, M. D. C., Torres-Bustillos, L. G., & Mendoza-López, M. R. (2023). Phytoremediation of soil contaminated with weathered petroleum hydrocarbons by applying mineral fertilization, an anionic surfactant, or hydrocarbonoclastic bacteria. *International Journal of Phytoremediation*, *25*(3), 329–338.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2083577>
- Ojeda-Morales, M. E., Álvarez-Ramírez, J. G., Hernández-Rivera, M. Á., Domínguez-Domínguez, M., Zavala-Cruz, J., Herrera-Haro, J. G., Morales-Bautista, C. M., & Severo-Domínguez, A. L. (2025). Biodegradation of bioemulsified heavy oil in mangrove soil | Biodegradación de petróleo pesado bioemulsionado en un suelo de manglar. *Mexican Journal of Biotechnology*, *10*(2), 42–63.
<https://doi.org/10.29267/mxjb.2025.10.2.42-63>

- Orejuela-Romero, J. A., Herrera Cuadrado, Z. V., Heredia Jara, D. A., Núñez Moreno, M. S., Santillán-Quiroga, L. M., Barahona, M., Prado, S., & Zurita Ordóñez, M. E. (2025). Oil Palm Bagasse as a Treatment for Soils Contaminated with Total Petroleum Hydrocarbons. *Sustainability Switzerland*, *17*(2). <https://doi.org/10.3390/su17020422>
- Orellana, R., Cumsille, A., Rojas, C., Stuardo, C., Cabrera, P., Arancibia, G., Cárdenas, F., Salazar, F., González, M., Santis, P., Piña-Gangas, P., & Donghi, S. (2022). Economic Evaluation of Bioremediation of Hydrocarbon-Contaminated Urban Soils in Chile. *Sustainability Switzerland*, *14*(19). <https://doi.org/10.3390/su141911854>
- Páliz, K. P., Licta, E., & Cunachi, A. M. (2021). Reduction of the soil environmental impact caused by the presence of total petroleum hydrocarbons (TPH) by using *Pseudomonas* sp. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, *30*(4), 573–584. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2021.30.4.48>
- Pozo-Rivera, W. E., Quiloango-Chimarro, C., Paredes, X., Landívar, M., Chiriboga, C., Villacís, J., Hidalgo, D., & García, K. (2023). Response of dung beetle diversity to remediation of soil ecosystems in the Ecuadorian Amazon. *Peerj*, *11*. <https://doi.org/10.7717/peerj.14975>
- Quiñones-Cerna, C., Castañeda-Aspajo, A., Tirado-Gutierrez, M., Ugarte-López, W., Salirrosas-Fernández, D., Rodríguez-Soto, J. C., Gutiérrez-Araujo, M., Cruz-Monzón, J. A., Hurtado-Butrón, F., Quezada-Alvarez, M. A., Gálvez-Rivera, J. A., & Esparza-Mantilla, M. (2024). Efficacy of Indigenous Bacteria in the Biodegradation of Hydrocarbons Isolated from Agricultural Soils in Huamachuco, Peru. *Microorganisms*, *12*(9). <https://doi.org/10.3390/microorganisms12091896>
- Rosa, C., Baccaro, F., Cronemberger, C., Hipólito, J., Barros, C. F., De Jesus Rodrigues, D., Neckel-Oliveira, S., Overbeck, G. E., Drechsler-Santos, E. R., Dos Anjos, M. R., Ferregueti, Á. C., Akama, A., Martins, M. B., Tomas, W. M., Santos, S. A., Ferreira, V. L., Da Cunha, C. N., Penha, J., De Pinho, J. B., ... Magnusson, W. E. (2021). The

program for biodiversity research in Brazil: The role of regional networks for biodiversity knowledge, dissemination, and conservation. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 93(2). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120201604>

Ruseva, A., Minnikova, T., Kolesnikov, S., Revina, S., & Trushkov, A. (2023). Ecological State of Haplic Chernozem after Pollution by Oil at Different Levels and Remediation by Biochar. *Sustainability (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/su151813375>

Song, Y., Li, R., Chen, G., Yan, B., Zhong, L., Wang, Y., Li, Y., Li, J., & Zhang, Y. (2021). Bibliometric analysis of current status on bioremediation of petroleum contaminated soils during 2000–2019. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph18168859>

Valdiviezo Gonzales, L. G., Castañeda-Olivera, C. A., Cabello-Torres, R. J., García Ávila, F. F., Munive Cerrón, R. V., & Alfaro Paredes, E. A. (2023). Scientometric study of treatment technologies of soil pollution: Present and future challenges. In *Applied Soil Ecology* (Vol. 182). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104695>

Velásquez, T. D. M., & Tocuy O, D. D. J. A. (2021). Latin American Environmental Journals in Scopus and WoS in 2019: Relationship with Environmental Indicators. *Bibliotecas*, 39(2). <https://doi.org/10.15359/rb.39-2.3>

Vergnano, A., Raffa, C. M., Godio, A., & Chiampo, F. (2024). Speciation of the Removed Pollutants in Bioremediation of Hydrocarbon-Contaminated Soil. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/app14219813>

Wei, Z., Wei, Y., Liu, Y., Niu, S., Xu, Y., Wang, J. J., & Park, J.-H. (2024). Biochar-based materials as remediation strategy in petroleum hydrocarbon-contaminated soil and water: Performances, mechanisms, and environmental impact. *Journal of Environmental Sciences China*, 138, 350–372. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.04.008>

ANEXOS

Anexo A. Tabla de correlación que se trabajó para las preguntas, objetivos e hipótesis.

	Pregunta	Objetivo	Hipótesis
Objetivo G	¿Cuál es el estado actual (enfoques temáticos, metodológicos, redes de colaboración e impacto académico) de la producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025), según la base de datos de Scopus?	Analizar el estado actual de la producción científica sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025) mediante un estudio bibliométrico basado en base de datos Scopus, identificando tendencias temáticas, metodológicas aplicadas, redes de colaboración e impacto científico.	Hipótesis 1: No existe una producción científica significativa ni patrones temáticos, metodológicos o de colaboraciones relevantes en las investigaciones sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador en la base de datos de Scopus
Objetivo E1	¿Cuáles son las líneas temáticas predominantes, organismos y metodologías utilizadas en estudios sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025)?	Identificar las líneas temáticas, organismos biorremediadores aplicados y metodologías mediante análisis de contenido bibliométrico de suelos contaminados con hidrocarburos en el Ecuador (2019-2025)	Hipótesis 2: Existe una producción científica significativa con patrones temáticos, metodológicos y de colaboración relevantes en las investigaciones sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador en la base de datos de Scopus.
Objetivo E2	¿Cómo ha evolucionado la producción científica sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador y que nivel de impacto académico (citaciones, Índice h, Cuartiles u otros) ha alcanzado en Ecuador (2019-2025)?	Evaluar la evolución temporal y cuantificar el impacto mediante un análisis de indicadores bibliométricos sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025).	
Objetivo E3	¿Qué redes de colaboración (autores, instituciones, países) existen sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025)?	Mapear las redes de colaboración (Coautorías, afiliaciones institucionales y cooperación internacional) mediante un análisis de redes	

Objetivo E4	¿Cuáles son las principales revistas/fuentes de publicación y nivel de calidad según su cuartil sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025)	bibliométricas sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025). Identificar las revistas/fuentes principales y evaluar su calidad (cuartil) mediante un análisis de fuentes sobre suelos contaminados con hidrocarburos en Ecuador (2019-2025).
-------------	--	--

Nota: Elaboración de los autores.

Anexo B. Dimensiones que se plantearon para cumplir los objetivos de la investigación.

Dimensión	Descripción
Producción científica	Número de publicaciones por año, autor, institución, país, revista.
Impacto	Citaciones recibidas, índice h, promedio de citas por artículo.
Colaboración	Redes de coautoría entre autores, instituciones, países.
Temática	Palabras clave, co-ocurrencia de términos, evolución de temas de investigación.
Fuentes de publicación	Revistas más frecuentes, cuartiles (Q1–Q4), áreas temáticas.
Tipo de documento	Artículo, revisión, conferencia, capítulo, libro.
Idioma de publicación	Identificación de los idiomas predominantes en el campo.
Acceso abierto	Clasificación de los documentos según tipo de acceso (Gold, Green, etc.).
Afiliación institucional	Universidades o centros con mayor producción en la temática.
País o región geográfica	Distribución geográfica de la producción científica.
Citas por documento	Promedio de citas recibidas por cada publicación.
Palabras clave del autor	Análisis semántico para identificar tendencias y vacíos temáticos.
Tendencias temporales	Evolución del tema a lo largo del tiempo.

Nota. Elaborado por los autores.

Anexo C. Clasificación de los organismos utilizados en los estudios de biorremediación en Ecuador.

Género / Grupo	Organismo(s)	Clasificación
Pseudomonas	<i>P. aeruginosa</i>	Bacteria
	<i>Pseudomonas</i> spp.	
	<i>P. stutzeri</i>	
	<i>P. putida</i>	
Brevundimonas	<i>Brevundimonas</i> spp.	

Lysinibacillus	<i>L. fusiformis</i>	
	<i>L. boronitolerans</i>	
Alcaligenes	<i>A. faecalis</i>	
Bacillus	<i>B. soli</i>	
Bacterias hidrocarbonoclastas	Bacterias hidrocarbonoclastas	
Pseudomona (comercial)	<i>P. aeruginosa</i>	
Scarabaeinae	Scarabaeidae	Animal (insecto)
Elaeis	<i>Elaeis guineensis</i>	Planta
Oryza	<i>Oryza sativa</i>	

Nota. Elaborado por los autores.

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

¡Evolución académica!

@UNEMIEcuador

