

Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y
Biotecnológicas**

Escuela Profesional de Ingeniería Biotecnológica



**REVISIÓN CRÍTICA DEL USO DE LA BIORREMEDIACIÓN COMO
ALTERNATIVA ACTUAL PARA EL TRATAMIENTO DE PROBLEMAS DE
CONTAMINACIÓN EN SUELOS.**

Tesis presentada por el Bachiller:

Pacheco Paredes, Juan Alberto

Para optar por el Título Profesional
de:

Ingeniero Biotecnólogo

Asesor:

**Mgter. Alvarado Quiroz, Keny
Davi**

Arequipa – Perú

2023

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA BIOTECNOLOGICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 03 de Agosto del 2023

Dictamen: 007358-C-EPIB-2023

Visto el borrador del expediente 007358, presentado por:

2007110111 - PACHECO PAREDES JUAN ALBERTO

Titulado:

**REVISIÓN CRÍTICA DEL USO DE LA BIORREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA ACTUAL PARA
EL TRATAMIENTO DE PROBLEMAS DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR**



**42098888 - CORDOVA BARRIOS CINTHIA CAROL
DICTAMINADOR**



**43085216 - MEDINA CABRERA EDILBERTO VICENTE
DICTAMINADOR**



REVISIÓN CRÍTICA DEL USO DE LA BIORREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA ACTUAL PARA EL TRATAMIENTO DE PROBLEMAS DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS.

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Fundación Universitaria del Area Andina Trabajo del estudiante	<1 %
2	amb-express.springeropen.com Fuente de Internet	<1 %
3	repebis.upch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
4	repositorio.iiap.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
5	revista.cnic.edu.cu Fuente de Internet	<1 %
6	Submitted to Anglia Ruskin University Trabajo del estudiante	<1 %
7	medcraveonline.com Fuente de Internet	<1 %
8	aquichan.redalyc.org Fuente de Internet	<1 %

DEDICATORIA

A Cristina y Erick, mis padres, por esforzarse siempre por darme la mejor educación y oportunidades que pudieron darme.

A Paola, mi enamorada, por recordarme siempre de lo que soy capaz.



ÍNDICE GENERAL

CARÁTULA	1
DEDICATORIA	2
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. METODOLOGÍA	10
2.1 Bases de datos	10
2.2 Selección de descriptores / cadena de búsqueda	10
2.3 Criterios de inclusión y exclusión	10
3. ANÁLISIS CRÍTICO	11
3.1 Evaluación de la eficacia	12
3.1.1. Variedad de organismos y microorganismos utilizados	12
3.1.2. Variedad de métodos aplicables e innovación en la técnica	15
3.1.3. Versatilidad del método de biorremediación para distintos tipos de contaminantes	18
3.1.3.1. Biorremediación de suelos con hidrocarburos	18
3.1.3.2. Biorremediación de suelos con metales pesados	23
3.1.3.3. Biorremediación de suelos con plaguicidas	27
3.1.3.4. Biorremediación de suelos con herbicidas	29
3.1.3.5. Biorremediación de suelos con diésel y gasolina	31
3.2. Limitaciones y desafíos	34
3.2.1. Especificidad de los microorganismos	34
3.2.2. Condiciones ambientales	35

3.2.3.	Tiempo requerido	35
3.2.4.	Complejidad de los contaminantes	36
3.2.5.	Viabilidad económica	37
3.3.	Estudios de caso y ejemplos destacados	38
4.	PERSPECTIVAS FUTURAS	43
4.1.	Desarrollo de nuevas tecnologías	43
4.2.	Integración de enfoques de biorremediación	43
4.3.	Biorremediación de contaminantes emergentes	44
4.4.	Aplicación de la biorremediación a diferentes contextos	45
4.5.	Consideraciones de sustentabilidad	46
5.	CONCLUSIONES	48
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
	ANEXOS	59

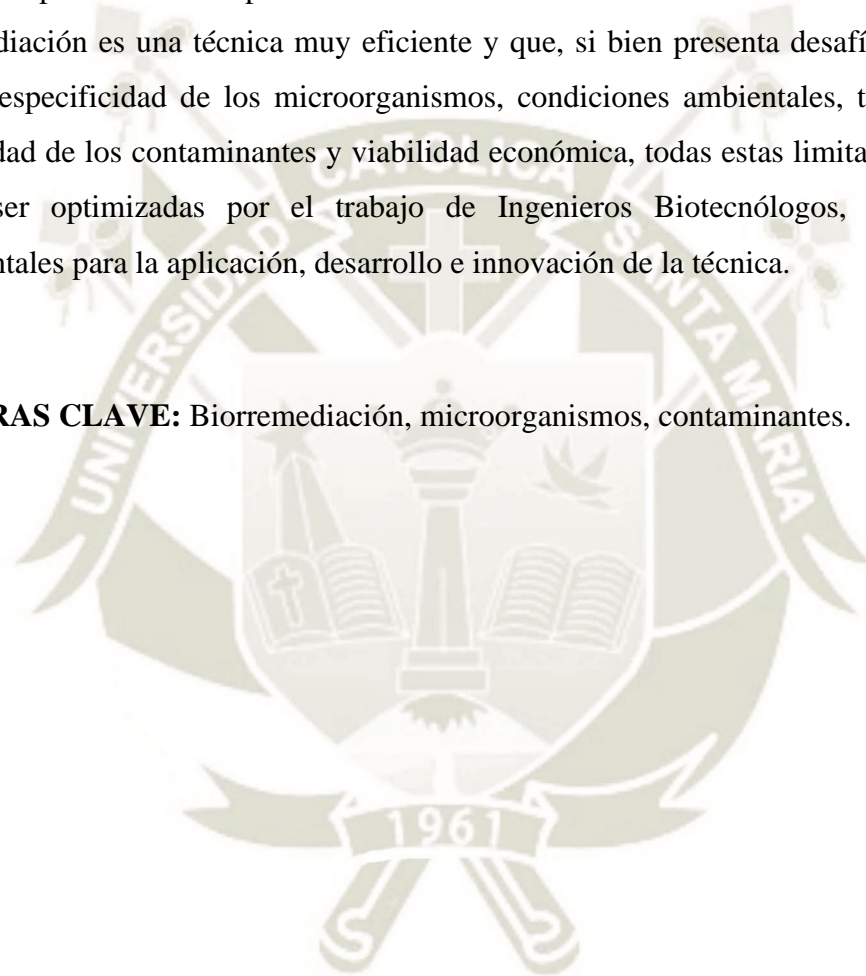
Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de la revisión sistemática	12
Figura 2. Diagrama de flujo de la evaluación de la eficacia	13
Figura 3. Tabla que muestra el número de menciones de los organismos biorremediadores en los documentos analizados	16
Figura 4. Infografía sobre las técnicas innovadoras revisadas	18
Figura 5. Factores por los que la biorremediación de hidrocarburos es importante	20
Figura 6: Impactos negativos de la contaminación por metales pesados	27
Figura 7: Importancia de la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas	29
Figura 8: Importancia de la biorremediación de suelos contaminados con herbicidas	31
Figura 9: Importancia de la biorremediación de suelos contaminados con diésel y gasolina	33
Figura 10: Mapa mental de las limitaciones y desafíos de la técnica de Biorremediación	35
Figura 11: Diagrama que representa los pasos utilizados en el proceso de biorremediación en el derrame de diésel 2 en Camaná	41

RESUMEN

El presente estudio tuvo el objetivo de realizar una revisión crítica respecto al uso de la biorremediación como alternativa actual para el tratamiento de problemas de contaminación en suelos, fue una investigación de tipo descriptiva en la que se realizó la revisión sistemática de más de 70 documentos, se analizó la eficacia de la técnica en base a 3 factores, la variedad de organismos utilizados, la variedad de métodos innovadores que se están aplicando y la versatilidad para distintos tipos de contaminantes. El resultado del análisis concluyó que la biorremediación es una técnica muy eficiente y que, si bien presenta desafíos y limitaciones como la especificidad de los microorganismos, condiciones ambientales, tiempo requerido, complejidad de los contaminantes y viabilidad económica, todas estas limitaciones y desafíos pueden ser optimizadas por el trabajo de Ingenieros Biotecnólogos, quiénes resultan fundamentales para la aplicación, desarrollo e innovación de la técnica.

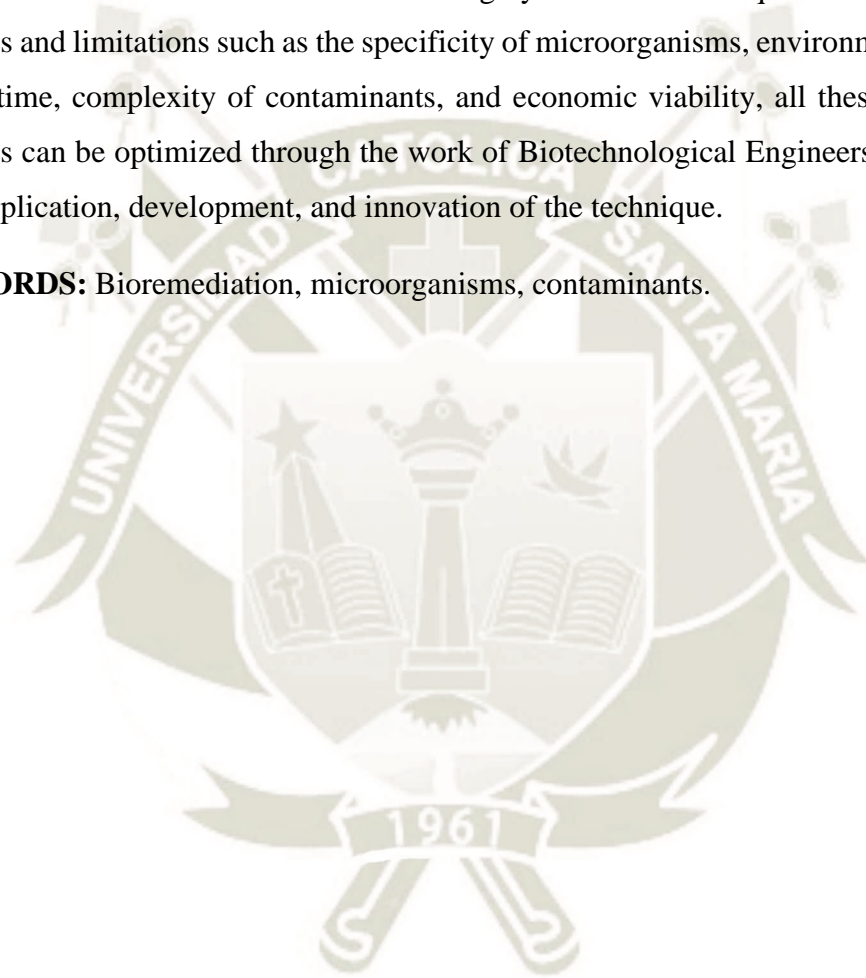
PALABRAS CLAVE: Biorremediación, microorganismos, contaminantes.



ABSTRACT

The present research, aimed to conduct a critical review regarding the use of bioremediation as a current alternative for the treatment of soil contamination issues. It was a descriptive study in which a systematic review of 70 documents was conducted. The effectiveness of the technique was analyzed based on three factors: the variety of organisms used, the variety of innovative methods being applied, and the versatility for different types of contaminants. The analysis results concluded that bioremediation is a highly efficient technique. Although it presents challenges and limitations such as the specificity of microorganisms, environmental conditions, required time, complexity of contaminants, and economic viability, all these limitations and challenges can be optimized through the work of Biotechnological Engineers, who are crucial for the application, development, and innovation of the technique.

KEY WORDS: Bioremediation, microorganisms, contaminants.



1. INTRODUCCIÓN

La biorremediación es una técnica de remediación ambiental que utiliza organismos vivos para degradar y eliminar contaminantes del suelo, el agua y el aire. Es una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente en comparación con los métodos convencionales de remediación, que a menudo son costosos y pueden tener impactos negativos adicionales. La biorremediación ha demostrado ser efectiva en la eliminación de una amplia gama de contaminantes, como hidrocarburos, compuestos orgánicos persistentes y metales pesados (1).

Esta técnica si bien es muy efectiva, también es muy compleja, dado que implica un gran número de parámetros y variables que son fundamentales para la eficacia y eficiencia de la misma, es por esto que el trabajo de los Ingenieros Biotecnólogos en el análisis, diseño, desarrollo y monitoreo del proceso de biorremediación resulta fundamental (1).

En este sentido, la biorremediación se presenta como una estrategia prometedora para abordar los desafíos de la contaminación ambiental. Su enfoque basado en microorganismos naturales permite la degradación y transformación de contaminantes en formas menos tóxicas o incluso en productos inocuos. Además, la biorremediación puede ser aplicada in situ, evitando la necesidad de trasladar grandes cantidades de suelos o agua contaminados (2).

Con el inicio del siglo XX y en adelante, las actividades antropogénicas y la rápida industrialización, en actividades como la minería, uso no controlado de agroquímicos, la manufactura, uso excesivo de hidrocarburos y el rubro de la construcción han generado una gran cantidad de desechos tóxicos que causan peligros ambientales (1). Darles un tratamiento eficaz a los distintos tipos de contaminantes es muy importante para mejorar la calidad ambiental y prevenir los problemas de salud que generan (2). El suelo es uno de los medios más afectados por las distintas actividades antropogénicas y las actividades industriales (3), la gravedad de los daños causados depende de las características de los contaminantes, los cuales provienen generalmente de actividades no controladas; asimismo se debe tener en cuenta la magnitud del evento contaminante. En este sentido, es importante brindar una solución inmediata o a largo plazo, que sea sostenible, eficaz, económica y sobre todo eco-amigable con el medio ambiente, es aquí donde surge la importancia del uso de la biorremediación (4) (5) (6). Debido a que las estrategias de remediación, como los enfoques químicos y físicos, no son suficientes para mitigar los problemas de contaminación debido a la generación continua de nuevos contaminantes (7), se acentúa el uso de la biorremediación como un método eficiente y preferible ante otros tipos de prácticas, debido a que incluye métodos basados en asociaciones

de microorganismos y plantas y otros métodos innovadores que se emplean para restaurar los suelos contaminados (8) (3), esto debido a que los microorganismos juegan un papel muy importante en el proceso de desintoxicación al degradar, mineralizar y acumular las diversas formas de contaminantes, ya sean nocivos o biodegradables, para poder transformarlos y devolverlos al entorno en formas no letales (6). Los principales agentes de biorremediación son predominantemente bacterias, enzimas, hongos, algas, plantas y protozoos (9).

La aplicación de la biorremediación puede ser de manera ex situ o in situ, según las características del contaminante, ubicación del sitio contaminado y requerimientos de quienes lo practican, entre las metodologías más populares para la biorremediación se incluyen, la bioaumentación, bioestimulación, bioatenuación, biosorción, bioacumulación, bioconversión, entre otras (1) (6). Estos métodos dependen altamente su éxito de factores ambientales adecuados para los sistemas de microorganismos, ya que estos brindarán las condiciones adecuadas para su proliferación y ejecución de la actividad remedial, entre estos factores se encuentran la luz, temperatura, oxígeno, pH, tipo de sustrato, suplementos, entre otros (10). Todas estas condiciones han hecho que la biorremediación siga siendo una técnica desafiante, por lo que la mayoría de estudios permanecen aún en la etapa de laboratorio (11).

El objetivo del presente trabajo, es analizar de manera crítica la eficacia de la técnica de biorremediación para la remediación de suelos contaminados, así como sus limitaciones y perspectivas futuras. El aspecto innovador de esta revisión es dar a conocer la factibilidad del uso de la biorremediación como alternativa actual para el tratamiento de problemas de contaminación de suelos, brindando la actualización de las tecnologías usadas, métodos y potencial de las mismas, por último, dar un alcance respecto a qué factores hay que tomar en cuenta para garantizar su sustentabilidad.

El presente trabajo de investigación se plantea la hipótesis que la biorremediación será efectiva como alternativa actual para el tratamiento de problemas de contaminación en suelos según la revisión sistemática de diferentes investigadores.

2. METODOLOGÍA

2.1. Base de datos

La literatura relevante se buscó y se recopiló de la base de datos en línea utilizando Scopus, Web of Science, Springer, Frontiers, EBSCOhost, Taylor and Francis, Science Direct, Google Scholar, IEEE Xplore Digital Library.

2.2. Selección de descriptores / cadena de búsqueda

Las palabras clave utilizadas para la búsqueda de literatura incluyen biorremediación, contaminación de suelos, metales pesados, hidrocarburos, agroquímicos, remediación usando organismos vivos, fitorremediación, remediación a través de plantas/microorganismos, etc.

2.3. Criterios de inclusión y exclusión

La obtención de los artículos a revisarse se llevará a cabo en revistas especializadas en biorremediación, usos, técnicas, de remediación de suelos contaminados, como Bioremediation Journal, International Journal of Phytoremediation, Frontiers in Microbiology, Journal of Environmental Management, Fronteras en la ciencia de las plantas, la ciencia del medio ambiente total, la quimiosfera, la contaminación del agua, el aire y el suelo, la ciencia ambiental y la investigación de la contaminación, entre otros.

Se revisó por volumen para rastrear los artículos relevantes, la literatura incluyó principalmente artículos de revistas indexadas, seguido secundariamente por libros, tesis, documentos de conferencias, actas e informes técnicos, no se incluyó documentación de estudios empíricos o páginas sin sustento.

3. ANÁLISIS CRÍTICO

En la presente investigación se presenta los resultados de la revisión sistemática, para una mejor representación se realizó el Diagrama de Flujo

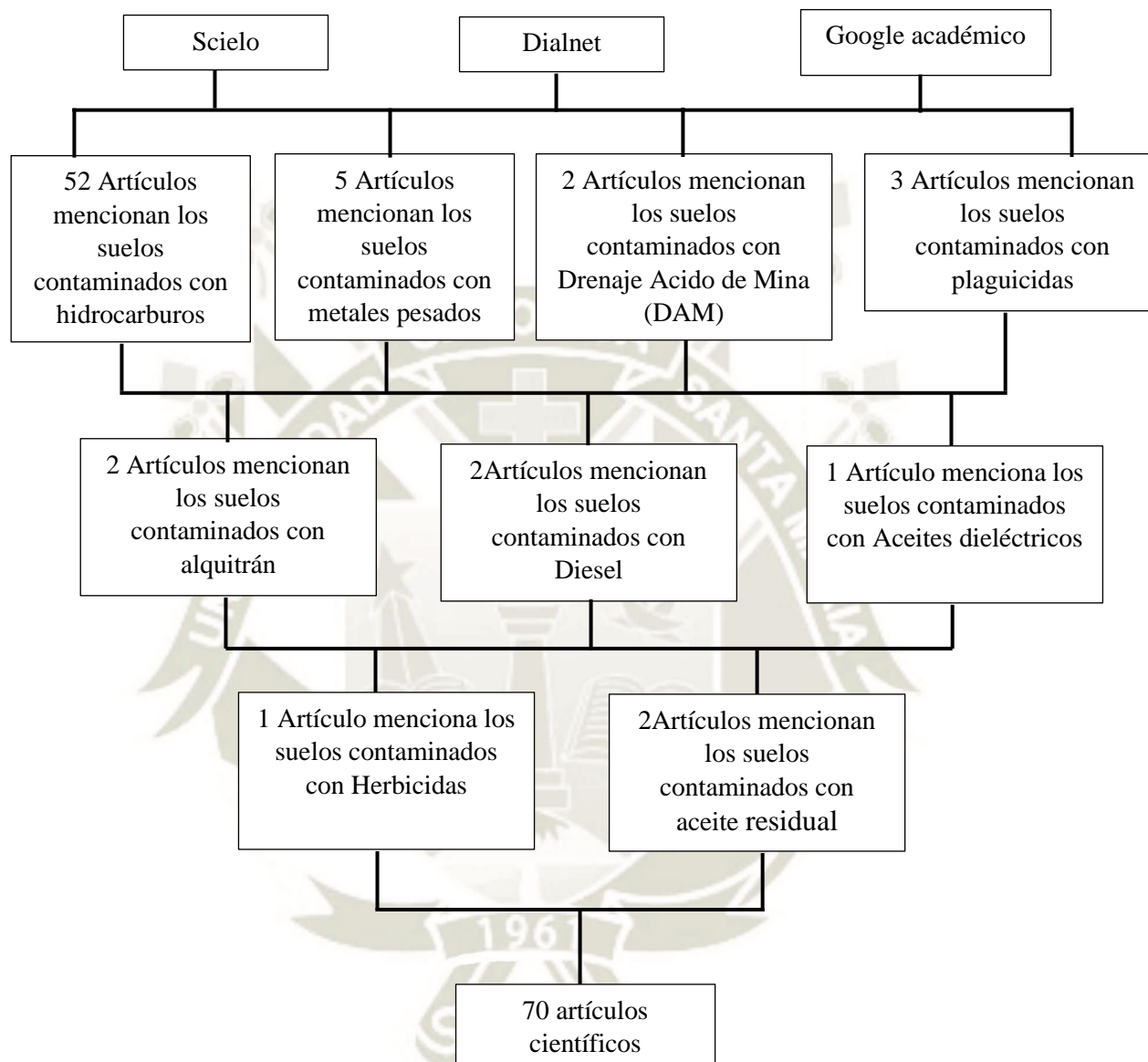


Figura 1. Diagrama de flujo de la revisión sistemática

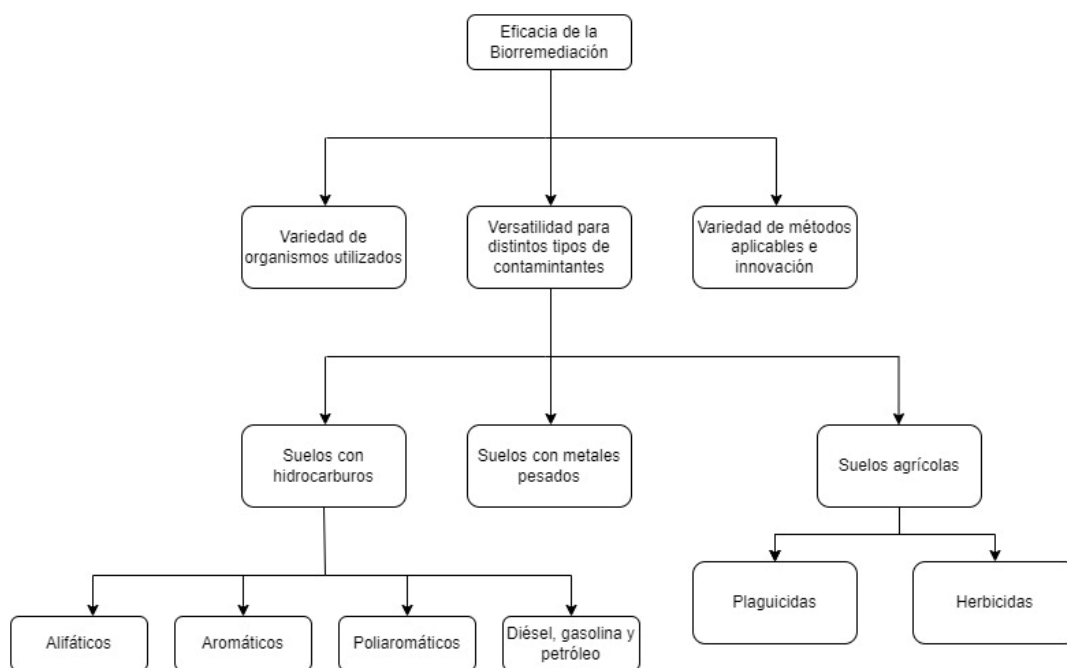
En la Figura 1 se observa de manera esquemática la cantidad de artículos por tipo de suelo contaminado en la base de datos establecida para este estudio, encontrándose un total de 70 artículos científicos de fuentes de revistas indexadas distribuidas de forma que al ingresar en la base de datos de Google académico se obtuvo 50 artículos, 10 artículos de Dialnet y 10 artículos de Scielo.

Estos artículos fueron revisados y analizados en función de responder la problemática de la investigación, en la Tabla 1 de Anexos, se muestran los artículos que se han revisado y se resaltó los puntos más relevantes.

3.1. Evaluación de la eficacia

La biorremediación como técnica de remediación de contaminantes en comparación con métodos físicos o químicos o como complemento de estos, se presenta como un método sumamente interesante y tras un análisis crítico de toda la documentación, se concluye que su eficacia se da por tres principales motivos que se sustentarán a continuación:

Figura 2. Diagrama de flujo de la evaluación de la eficacia



3.1.1. Variedad de organismos y microorganismos utilizados

El primero es que se utiliza la capacidad natural de los microorganismos, plantas y hongos para degradar compuestos orgánicos como fuente de carbono para sus procesos biológicos, Vélez (21) identificó más de 86 tipos de bacterias capaces de degradar hidrocarburos, esto es sólo una muestra del enorme potencial biológico que existe en la naturaleza para degradar contaminantes orgánicos, dentro de estas bacterias, destacan varios géneros como las *Pseudomonas spp.*, Lozano (25) investigó que dicho tipo de bacteria posee adaptaciones genéticas naturales para metabolizar compuestos orgánicos tóxicos como el tolueno, y no solamente éste compuesto,

sino subespecies como la *Pseudomona aeuroginosa*, es capaz de degradar petróleo crudo en suelos salinos hasta en un 30%, Luján (29). Otras especies de bacterias como *Streptomyces spp.* cómo descubrió Cando (31), han demostrado eficiencia para remover hidrocarburos alifáticos tales como el fenantreno, naftaleno y fluoranteno en más del 97%, otras especies como *Bacillus spp.*, han demostrado como afirma Trejos (46) que, en reactores aerobios, en condiciones controladas, pueden remediar hidrocarburos hasta en un 92%.

Esto demuestra la enorme capacidad que tienen los microorganismos para degradar compuestos orgánicos, y no sólo esto, investigadores como Figueroa (48), han demostrado incluso que consorcios bacterianos, tales como la combinación de *Sacharomyces spp.*, *Streptomyces spp.* y *Estreptococos spp.*, lograron remover aceites dieléctricos en condiciones de laboratorio hasta un 76.23% en un margen de tiempo de 90 días, con toda esta información podemos afirmar que las bacterias poseen un gran potencial como degradadores de contaminantes orgánicos que van desde hidrocarburos, aceites, compuestos aromáticos policíclicos, entre otros. Y no solamente demuestran enorme potencial remediador en entornos controlados de laboratorio sino *in situ* y en condiciones de contaminación reales, Patiño (55) demostró que *Pseudomonas sp.*, así como *Stenetrophomonas sp.* son capaces de degradar tolueno en sitios en los que se ha producido derrames de petróleo, así también como en talleres mecánicos.

Y no solamente degradan los contaminantes orgánicos resistiendo su toxicidad, incluso logran crecer y prosperar en estos medios hostiles, Patiño (55) descubrió que, en suelos contaminados con petróleo, *Bacillus thuringiensis*, logró incrementar su biomasa.

Si bien hemos visto hasta el momento la enorme capacidad bacteriana de remediar suelos contaminados con hidrocarburos y sus derivados, no solamente se pueden aplicar en estos tipos de remediación, Betancourt (57), evaluó que el consorcio bacteriano de *Klebsiella spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Enterobacter spp.* y *Citrobacter spp.*, logran reducir el tiempo de vida útil del fungicida clorotalonil de 6.2 a 2.5 días en suelos de cultivos de plátano, con esto podemos ver que las bacterias biorremediadoras pueden ser útiles en distintos campos y áreas en las que se necesite biorremediación de suelos y aguas contaminadas.

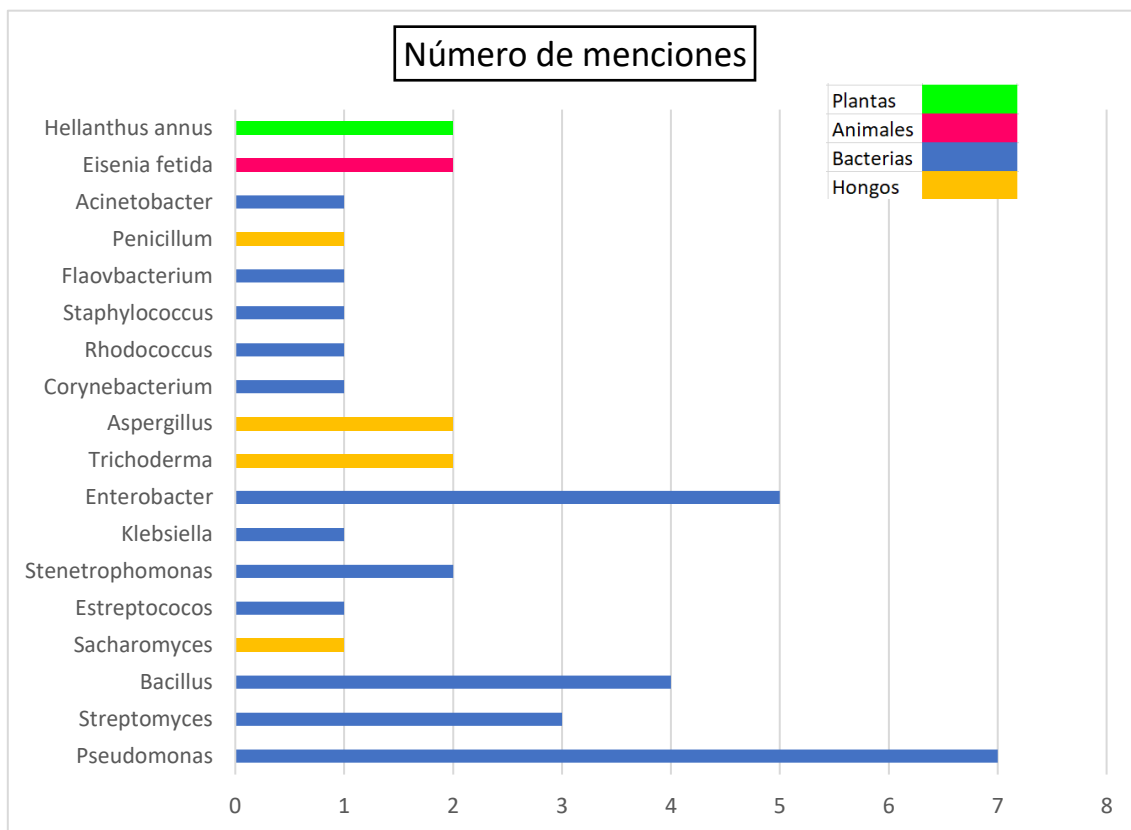
Todo esto refuerza la afirmación que las bacterias tienen un enorme potencial remediador de contaminantes orgánicos.

Pero no solamente las bacterias demuestran enorme potencial remediador, los hongos con su capacidad de degradar compuestos orgánicos, absorber metales pesados y su habilidad de

generar simbiosis con las raíces de las plantas para otorgarle mayor resistencia a las mismas, se convierten en organismos biológicos importantes en el proceso de biorremediación de contaminantes, Cayotopa (39), estudió la capacidad de 3 distintos tipos de *Trichoderma spp.* para absorber Cadmio, descubriendo que la subespecie *T. brevicompactum* fue la más eficiente con una capacidad de remoción de 83.1%. Otras especies de hongos tales como *Phanerochaete*, *Pleurotus* y *Aspergillus*, han demostrado capacidad para degradar incluso hidrocarburos difíciles de remediar como los HAPs (Hidrocarburos aromáticos policíclicos), podemos ver entonces que son varios organismos, no solamente bacterianos que pueden ser muy útiles en el proceso de biorremediación, esto refuerza aún más el potencial de la técnica de biorremediación por su amplio espectro de organismos que pueden ser utilizados (39).

Inclusive organismos más complejos como *Eisenia fétida* (*lombriz roja californiana*) han sido estudiados, Nobili (52), para descontaminar suelos con Diésel mostrando eficacia y resistencia al contaminante. De esa misma manera las plantas juegan un papel fundamental también en el proceso de biorremediación, Lizana (23) mostró que, en suelos contaminados con gasolina, *Hellanthus annus* (*Girasol*), logró disminuir la concentración del contaminante en casi 99.5%. Con todo este sustento podemos observar que uno de los factores más importantes en la eficacia de la técnica, es la variedad y cantidad de organismos que pueden ser utilizados.

Figura 3. Tabla que muestra el número de menciones de los organismos biorremediadores en los documentos analizados



3.1.2. Variedad de métodos aplicables e innovación en la técnica

El segundo motivo por el cuál, el método de biorremediación se presenta como una técnica eficaz, es por la variedad de técnicas que pueden usarse en el mismo, y esto se debe a la gran adaptabilidad que tienen los organismos vivos a distintos entornos y circunstancias, así como del desarrollo y prueba de nuevas técnicas y métodos por parte de Ingenieros Biotecnólogos en todo el mundo, Martínez (35), probó utilizar lodos activados como biosólidos para la remoción de hidrocarburos en suelos contaminados, si bien la remoción de los mismos, no fue más eficiente que la de los organismos locales, vemos los intentos por probar nuevas técnicas de biorremediación (35).

Complementando a esta técnica de usar lodos activados, Villena (41), probó utilizar lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales para remediar Diésel, logrando remediar hasta el 87% cuando la concentración del contaminante es del 25%. Del mismo modo, se están probando métodos de lombricompostaje, Pinzón (37), para mejorar la técnica de remediación de suelos, probó esta técnica dado que las lombrices airean el suelo facilitando los procesos de degradación

aerobia de los microorganismos, así como la producción de enzimas que aumentan la efectividad de la actividad microbiana. Mosquera (50), evaluó también el uso de lombricompostaje en suelos contaminados con mercurio, en el que, tras adicionar compost, se logró una remoción de hasta el 65%. Otras técnicas como el uso de ecopilas (pila controlada de materiales biodegradables), como afirma Martínez (49), pueden ser usadas para mejorar la degradación de hidrocarburos como el petróleo, dicha técnica puede ser incluso utilizada en entornos extremos como la Antártida siempre y cuando las condiciones sean bien controladas, pero esto nos demuestra, reforzando el segundo motivo de la eficacia del proceso de Biorremediación, que puede ser una técnica muy potente para su propósito remediador (41)(37).

La naturaleza adaptable de los organismos vivos incluso permite que técnicas más ambiciosas como la electro-biorremediación, Barba (13), puedan ser probadas para la remoción de herbicidas como el oxifluorfen, si bien los resultados de remoción no fueron eficaces, se observa el intento de innovar en técnicas que aumenten la eficacia de la biorremediación.

Además de estos intentos, los conocimientos de los Ingenieros Biotecnólogos sobre el desarrollo de biorreactores, puede aumentar significativamente la eficacia del método, Trejos (46) cómo se mencionó antes, logro remover el 92% de hidrocarburos en un reactor aerobio y Vásquez (44) determinó la importancia del pH en la remediación de drenajes ácidos de mina.

Cabe resaltar que la innovación en técnicas que se utilizan en biorremediación no solamente se enfoca en las condiciones de remediación sino también en los organismos en sí, ya sea en bioaumentar su capacidad de remediación con factores externos, darles mayor resistencia a los contaminantes o mejorar su capacidad genética de biorremediar, Lizana (23) realizó una interesante investigación en la que adicionando carbón activado de cáscara de coco a las raíces de *Hellanthus annuus* (*Girasol*), logró en un plazo de 70 días, disminuir en 99.5% la contaminación de suelos con gasolina, podemos observar aquí, que utilizando un compuesto netamente biodegradable y de fuente natural como es la cáscara de coco, podemos mejorar la capacidad de biorremediación del girasol, esta es sólo una muestra de cómo la sinergia entre elementos de origen biológico, pueden mejorar la remediación de contaminantes sin generar nuevos contaminantes, éste es un punto clave en la eficacia como ventaja que tiene la Biorremediación con respecto a una remediación química o física (23).

Incluso innovaciones en otras áreas como la farmacéutica y agrícola influyen positivamente en la biorremediación, Lizcano (33), adicionó nano partículas de ácido salicílico a la planta *Isatis*

cappadocica, y de esta manera se mejoró su resistencia al arsénico, así como se mejoró la capacidad de crecimiento bacteriano capaz de degradar el contaminante.

Y cómo punto final en este argumento sobre el segundo motivo por el cuál la biorremediación es una técnica efectiva, tenemos a un punto clave para la Ingeniería Biotecnológica que es, la Ingeniería Genética, Rodríguez (36), evaluó cepas de *Corynebacterium glutamicum* genéticamente modificadas y se comprobó que pueden remover hasta 100 veces más arsénico que las cepas nativas, dicha cifra no es despreciable o marginal, podemos con este estudio, ver que mejorar genéticamente las organismos biorremediadores puede convertirse en una enorme ventana de posibilidades para esta técnica, es aquí donde el trabajo de los Ingenieros Biotecnólogos resulta fundamental.

Figura 4. Infografía sobre las técnicas innovadoras revisadas



3.1.3. Versatilidad del método de biorremediación para distintos tipos de contaminantes

El tercer motivo, que se desarrollará a mayor profundidad, es la versatilidad del método, cuando se habla de versatilidad, se refiere a los distintos tipos de suelos con contaminantes en los que se puede desarrollar el método de biorremediación, que van desde suelos con hidrocarburos,

suelos con metales pesados, con pesticidas, entre otros; cada punto se desarrollará por separado dado que uno de los puntos centrales de ésta tesis, es que funcione como un documento de consulta y dado que el primer paso al querer desarrollar un proceso de biorremediación es entender el tipo de contaminante que se quiere remediar, cada tipo de contaminante se detalla a continuación:

3.1.3.1. Biorremediación de suelos con hidrocarburos

Dado que la naturaleza de este trabajo de investigación es un análisis crítico, es necesario entender la importancia real y su efectividad en comparación con otras técnicas, por es en primer lugar hay que contextualizar la importancia del mismo (87).

La biorremediación de hidrocarburos es un enfoque importante y ampliamente utilizado para la limpieza y recuperación de suelos y cuerpos de agua contaminados por derrames de petróleo y productos derivados. Los hidrocarburos son compuestos químicos presentes en el petróleo y sus derivados, y su liberación accidental puede tener graves impactos ambientales y económicos (87).

Los principales factores por los que la biorremediación de hidrocarburos es una solución efectiva son los que se desarrollan a continuación. La protección del medio ambiente dado que los derrames de hidrocarburos pueden contaminar suelos, cuerpos de agua y ecosistemas, causando daños a la flora, la fauna y los organismos acuáticos. La biorremediación proporciona una estrategia de limpieza más sostenible y menos invasiva en comparación con métodos convencionales, reduciendo los efectos adversos en el medio ambiente (88).

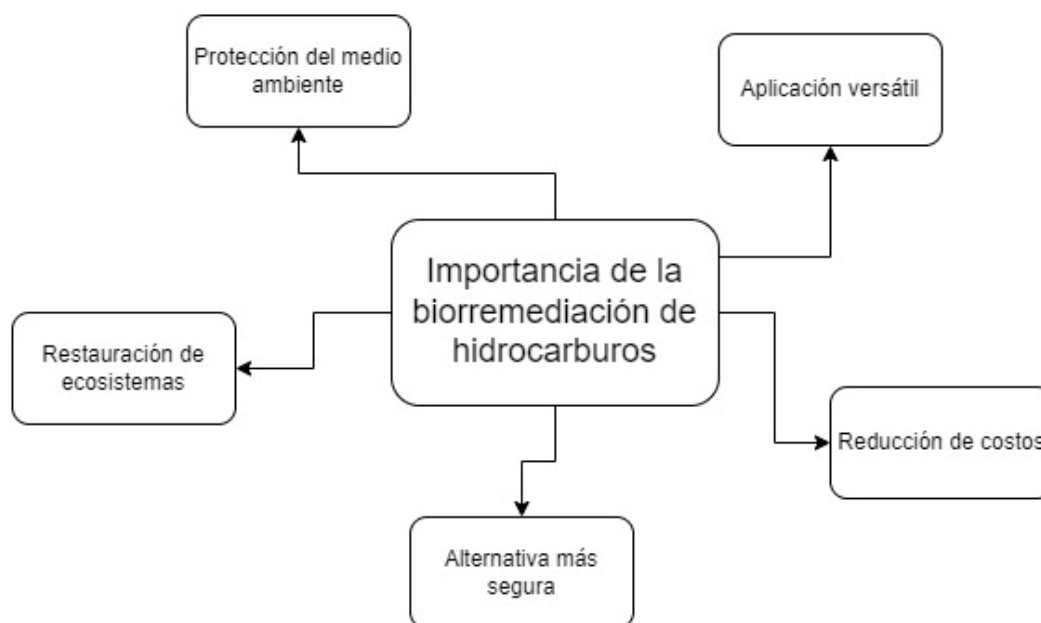
Otro factor importante es la restauración de ecosistemas dado que la biorremediación de hidrocarburos contribuye a la restauración de ecosistemas contaminados, promoviendo la recuperación de la biodiversidad y restableciendo los procesos naturales en los suelos y cuerpos de agua afectados. Además de eso, es una alternativa más segura dado que en comparación con los métodos químicos o físicos de remediación, la biorremediación es considerada una alternativa más segura y respetuosa con el medio ambiente. Se basa en la utilización de microorganismos, como bacterias y hongos, que degradan los hidrocarburos de manera natural, evitando así la introducción de productos químicos dañinos en el entorno (88).

La reducción de costos es otro factor por el que la biorremediación puede resultar más económica en comparación con otros métodos de limpieza de hidrocarburos. Requiere menos

infraestructura y maquinaria costosa, lo que puede ser beneficioso en términos de costos operativos y de mantenimiento. La aplicación versátil es otro factor por el que la biorremediación de hidrocarburos puede aplicarse en diferentes entornos y escalas, desde derrames de petróleo en áreas terrestres hasta la remediación de cuerpos de agua contaminados. Además, puede adaptarse a condiciones ambientales variables y diferentes tipos de hidrocarburos (88).

Por todos estos factores, podemos entender la enorme importancia que genera el entender bien la técnica, innovarla, y aplicarla de manera eficiente, a continuación, se revisará la documentación que sustenta la importancia de su uso.

Figura 5. Factores por los que la biorremediación de hidrocarburos es importante



De acuerdo a la investigación puedo señalar según Vega (58) que, el rendimiento de los surfactantes producidos por los microorganismos *Pseudomonas spp.* Son eficientes, los cuales degradan hidrocarburos, la concentración inicial de hidrocarburos fue 22900mg/g realizando tratamiento con las *Pseudomonas spp.*, de las cuales el 84.62% de bacterias utilizaron el petróleo como fuente de carbono y produjeron surfactantes durante 24 horas, donde la cantidad de biomasa fue cuantificada por turbidimetría valor que no supera el rango de biomasa, aquí en este estudio, podemos observar la importancia de las bacterias en el proceso, naturalmente producen tensioactivos que rompen la tensión superficial de los hidrocarburos para facilitar la

degradación bacteriana, sumado a esto, se podría combinar la capacidad de las *Pseudomonas spp.*, con la capacidad degradativa de otros microorganismos y crear un consorcio bacteriano mucho más eficaz, pero todas estas investigaciones aportan información que puede ser de mucho uso para un proceso más optimizado (58).

Afirma en su estudio Vila (59) que la técnica de biorremediación intrínseca o bioatenuación natural se basa en la capacidad de los microorganismos autóctonos que son estimulados o adicionando inóculos con la bioaumentación que el suelo contaminado por técnicas de biorremediación tuvo como concentración inicial 3500ppm de hidrocarburos, donde se tuvo la remediación de 60% de contaminantes durante dos meses de tratamiento con la adición de N y P, se utilizaron microorganismos heterótrofos para la biorremediación de hidrocarburos como poliaromáticos y alcanos, en este estudio podemos resaltar otro de los enormes beneficios que tiene la biorremediación como técnica, la utilización de microorganismos nativos, cabe mencionar que es necesario aplicar un proceso de bioaumentación para mejorar los resultados, ése tipo de consideraciones en cuanto al tipo de nutrientes que se deben suplementar para los microorganismos nativos, debería ser manejado por un Ingeniero Biotecnólogo que al entender el tipo de sustratos que los microorganismos necesitan, puede mejorar el proceso (59).

Por otro lado, sostiene Trujillo (60) en su estudio sobre el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos, usando microorganismos como bacterias, hongos que degradan el hidrocarburo en CO₂, H₂O y humus, existe la atenuación natural por la disminución de hidrocarburo por bacterias, presenta esta técnica bajo costo de operación y puede implementarse para el saneamiento de áreas contaminadas con hidrocarburos producto de derrames de refinación, y de distribución de combustibles fósiles, se ve en casos como por ejemplo, el derrame de petróleo de Repsol que si se hubieran utilizado técnicas de Biorremediación desde el inicio, se hubiera logrado disminuir los daños, el mismo presidente de Indecopi Julián Palacín declaró de manera oficial para el Peruano, que si la empresa hubiera realizado estas medidas, los daños hubieran sido menores, las razones exactas por las que Repsol no contrató a empresas de Biotecnología a pesar que se incluía esto en el seguro, no han sido expuestas, lo que sí podemos deducir, es que si Repsol hubiera tenido un área con Biotecnólogos especializados en biorremediación, ellos hubieran podido ser de mucha ayuda en éste desastre (60).

Por su parte, Nústez (61) evaluó la bioaumentación y bioestimulación de suelos contaminados con hidrocarburos, el período de tratamiento fue de 23 semanas, el sustrato fue 60% de sedimentos contaminados y 40% de suelos con microorganismos, se mencionó que la

concentración de hidrocarburos disminuyó entre 90 y 105mg/kg con un porcentaje de remoción de 83 y 94%, donde se demostró que el mayor porcentaje, se obtuvo en el tratamiento en el que se aplicó urea como bioestimulante con la presencia de microorganismos. En este estudio también podemos observar la importancia del conocimiento Biotecnológico sobre factores que influyen el crecimiento y capacidad de degradación de microorganismos, el adicionar urea al tratamiento, dado que la urea se utiliza principalmente como fuente de nitrógeno, el precio de la urea no es elevado y es un sustrato que normalmente se adiciona en los suelos para proporcionar nitrógeno no solamente en los procesos de biorremediación, sino también para el desarrollo de los cultivos, todo esto refuerza los beneficios que hacen efectiva la técnica de biorremediación, que va alineada con los procesos naturales existentes (61).

En su estudio, Pesántez (62) extrajo suelos de áreas de la refinería de Ecuador producto de los derrames por la ruptura de calentadores, extrajo suelos en cada tramo de los ductos, donde se diseñó ensayos por cada cepa de *Trichoderma sp.* para remover hidrocarburos y metales pesados del suelo. Se realizaron la inoculación después de 96 días, tomando 9kg por cajón de suelo contaminado. demostró que las cepas de *Trichoderma sp.* redujeron la concentración de contaminantes en el suelo, para la especie *Trichoderma harzianum* tuvo como porcentaje de remoción 69.1% de hidrocarburos, para el plomo su remoción fue 53.72%. Haciendo una comparativa con el derrame de petróleo producido en Perú por la empresa Repsol, podemos ver una clara diferencia, el uso de técnicas biotecnológicas, representa una gran diferencia en los resultados obtenidos, fue noticia cómo Repsol contrataba personas para que removieran el petróleo con palas, poniendo en riesgo su propia salud, utilizar microorganismos como hongos, en este caso, *Trichoderma sp.* pueden remediar hidrocarburos y plomo del suelo sin generar un riesgo de salud para los trabajadores y en armonía con la naturaleza dado que esos hongos se pueden integrar luego en el bioma local o servir como fuente de nutrientes para otros microorganismos, si bien siempre es probable que se afecte negativamente, con los conocimientos biotecnológicos adecuados, como elegir cepas inocuas, entender los tiempos de permanencia y un monitoreo adecuado, no deberían afectar los organismos externos como los hongos biorremediadores la biota local (62).

En otra investigación, menciona Vázquez (63) que la biorremediación de suelos con hidrocarburos usando cepas bacterianas Antárticas psicófilas, donde se tomó muestras de suelo hasta los 20cm de profundidad con 0.25kg de suelo, y luego se inocularon las cepas *Rhodococcus sp.*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Stenotrophomonas sp.* y las *Pseudomonas sp.* en suelos contaminados con hidrocarburos de tipo alifáticos y aromáticos, para luego

bioestimular el proceso con nutrientes de N y P, luego del proceso se determinó la concentración final de hidrocarburo en el suelo biorremediado, la flora autóctona fue bioestimulada con N y P, presentando un porcentaje de remoción de 80% en 45 días, mientras que con un consorcio aislado presentó una baja remoción llegando únicamente a 62%. Es por ello que concluyeron que es factible la realización de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando bacterias autóctonas sicrotolerantes. Este estudio nos muestra algo muy interesante sobre la eficacia de la biorremediación y es la gran capacidad que tienen los microorganismos para adaptarse a medios extremos y ser incluso transferidos a otros medios, las bacterias sicrofilas, o que tienen afinidad por ambientes con falta de humedad, así como bacterias anaerobias que usan para sus procesos metabólicos, otros compuestos como sulfatos, nitratos e incluso hierro como aceptores de electrones para mantenerse biológicamente activos incluso en medios sin oxígeno, podemos entonces inferir que dichas bacterias pueden ser utilizadas en procesos de biorremediación en los que el lugar afectado, no tenga dicha disponibilidad (sin oxígeno y sin humedad), cabe mencionar que se hace cada vez más claro, la enorme importancia del conocimiento biotecnológico sobre estos procesos y estos microorganismos (63).

Asimismo, en su estudio, Ortiz (64) evaluó la eficacia del producto *BIOIL-FC* para la degradación en suelos contaminados con hidrocarburos, los suelos fueron contaminados con 10% de gasolina de 85 de octanaje mezclada con aceite de motor y gasolina de 96% de octanaje, se observó que fueron incrementando los microorganismos heterótrofos degradadores de petróleo, con lo que se logró remover cada tipo de gasolina, en la mezcla de gasolina de 85 octanos y aceite de motor se removió entre 50 a 61% en un tiempo de 28 días, para gasolina de 96 octanos se removió 98% en 15 días, los microorganismos facilitaron la bioconversión de los compuestos tóxicos (hidrocarburos) en compuestos biodegradables, podemos por ejemplo observar en éste estudio, algo muy interesante, que realizando un consorcio de bacterias degradadores de hidrocarburos y bacterias surfactantes, se ha creado un producto comercial que puede ser comercializado dado que está comprobado que es muy eficiente para degradar hidrocarburos, podemos inferir aquí otra rama muy interesante para la Ingeniería Biotecnológica, la creación y patente de consorcios específicos con altas tasas de efectividad en biorremediación, de esta manera el campo de la Biorremediación puede resultar atractivo a nuevos Ingenieros Biotecnólogos, no solamente por su capacidad de remediar el medio ambiente, si no por su potencialidad de creación de productos comercialmente rentables (64).

Finalmente Arrieta (65) analizó la capacidad de degradación de un consorcio bacteriano conformado por 6 bacterias, *Enterobacter sp.*, *Bacillus sp.*, *Staphylococcus aureus*,

Sanguibacter soli, *Arthrobacter sp.* y *Flavobacterium sp.*, en su estudio, evaluó la capacidad que tiene este consorcio para degradar diésel en suelos contaminados con este contaminante a una concentración inicial de 40 000ppm, se evaluó en condiciones de laboratorio el consorcio en base a dos tecnologías, atenuación natural y bioestimulación y se realizó la comparativa entre ambas, luego de un período de 4 meses, la atenuación natural logró una remediación del 36.86%, mientras que la bioestimulación logró un 50.99%, en este estudio, podemos observar que la tasa de remediación, a pesar de haber bioestimulado el consorcio bacteriano, los resultados no fueron muy altos, cómo análisis crítico podríamos sugerir que al consorcio bacteriano, se le complemente con alguna bacteria con capacidad de producir surfactantes tales como las que se mencionan en otros estudios, estas bacterias podrían ser, *Pseudomona aeuroginosa*, *Bacillus subtilis*, entre otras, con esto se podría romper la tensión superficial del diésel y ayudar a las otras bacterias a realizar un mejor proceso de degradación, el resultado incluso, si fuera muy eficiente, podría ser patentado y comercializado como en el caso que vimos en *BIOIL-FC* en el estudio de Ortiz (64).

3.1.3.2. Biorremediación de suelos con metales pesados

Por su parte, Quispe (66) realizó la búsqueda de artículos en revistas indexadas, libros y publicaciones en general, 13 artículos científicos y 2 libros fueron revisados, donde mostró que dentro de la biorremediación de suelos contaminados, los organismos más estudiados fueron las especies de hongos como *Aspergillus sydowii*, *Penicillium funiculosum*, *Aspergillus flavus*, *Penicillium sp.*, *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus flavus*, *Clitocybe máxima*, a todos estos microorganismos, en sus procesos de degradación se les aplicó la bioestimulación. La concentración máxima presentó como porcentaje de remoción 70.66% de Cd, 96.24% de Cu, para la especie *A. flavus* removió 73% de Cr (VI), 93.50% de Hg, *A. fumigatus* removió 74% de Cd (II), *Penicillium sp.* removió 84% de Hg. Podemos observar en esta revisión que los microorganismos también pueden remediar de manera muy eficiente los metales pesados, esto refuerza el argumento de la eficacia de la biorremediación como técnica medio ambiental, pero cabe resaltar que el conocimiento Biotecnológico de qué especies y de cómo se pueden bioestimar, es fundamental (66).

Mendoza (67) analizó suelos contaminados con metales pesados como Cd, Cu, Co, Zn, Fe, Mn, Ni, Ar y Se, las muestras de suelo fueron extraídas de dos profundidades (0-10cm y 10 a 20cm), se tomaron 2g de suelo que fueron pesados y secados por 24h, donde se utilizó una pistola de fluorescencia para la cuantificación de los metales pesados, las concentraciones iniciales de

metales pesados en el suelo fueron para el Cd, Cu, Co sobrepasaron los límites, esto es debido al uso prolongado de agroquímicos en vez de abonos fosfatados, las concentraciones de Cd superiores de 30mg/L está muy elevado, muy por encima de los estándares internacionales ambientales, los investigadores concluyen en su informe, que recomiendan utilizar biorremediación como método de eliminar estos metales pesados, esto es debido a la gran variedad de maneras como los organismos vivos logran remediar dichos metales, se pueden usar desde plantas hiperacumuladoras, microorganismos capaces de mineralizar dichos metales, o de adsorberlos en sus componentes biomoleculares, es por todo esto, que la biorremediación de metales pesados en suelos contaminados para agricultura, puede presentarse como una técnica muy efectiva y contribuir no solamente con el medio ambiente, sino en el cuidado de la salud alimenticia de las personas, tomando en cuenta que estos suelos para agricultura llevan parte de los contaminantes a los consumidores (67).

Aparicio (68) realizó un estudio en el que probó la capacidad que tienen las actinobacterias para remediar suelos contaminados con Cr (VI) y lindano, cabe resaltar que el lindano es un contaminante muy perjudicial para la salud por lo que su eficiente remediación es muy importante, en el estudio se buscó optimizar los parámetros de biorremediación, se evaluó la capacidad degradadora de las bacterias, los mejores resultados de remoción se obtuvo con un consorcio de bacterias conformadas por *Streptomyces* y *Amycolatopsis tucumanensis*, la importancia de este estudio radica en la demostración del efecto que tienen los parámetros tales como concentración inicial de contaminantes, temperatura y humedad, con esto, el autor demostró que un conocimiento biotecnológico más técnico en control de parámetros es fundamental para la eficacia del método, otro punto muy interesante que cabe destacar de éste estudio que puede servir como referencia para otros estudios, es el análisis posterior de los bioensayos eco toxicológicos, en este estudio en específico, los autores luego de verificar el éxito de la biorremediación por parte de su consorcio bacteriano, verificaron que 4 especies vegetales (*Raphanus sativus*, *Latuca sativa*, *Lycopersicon esculentum* y *Zea mays*) así como de una especie animal (*Eisenia fetida*), al verificar que no había toxicidad en los marcadores de dichas especies, se puede concluir que el proceso de biorremediación fue exitoso, esto mencionado en el estudio es fundamental dado que no es solamente cuestión de lograr eliminar los contaminantes del suelo, sino asegurarse que los mismos no perjudiquen a las especies (68).

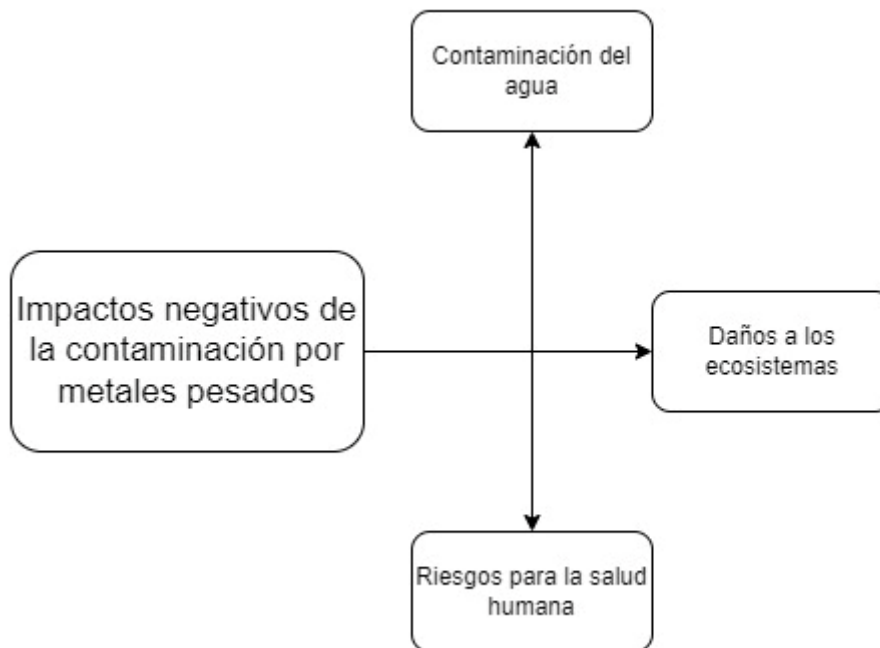
Podemos observar con los estudios presentados, que la efectividad de la biorremediación se sustenta también en la variedad de contaminantes que pueden ayudar a descontaminar, los metales pesados está comprobado que tienen diversos efectos adversos tanto para el medio

ambiente como para la salud, la importancia de su eficaz remediación se da por los efectos negativos en el medio ambiente y en la salud humana. Los metales pesados, como el plomo, el mercurio, el cadmio y el arsénico, son sustancias tóxicas que pueden persistir en el medio ambiente durante largos períodos de tiempo y acumularse en los seres vivos a lo largo de la cadena alimentaria (89).

Estos metales pesados pueden ingresar al suelo, el agua y el aire a través de diversas fuentes, como la actividad industrial, la minería, los desechos químicos y el uso de productos contaminados. Una vez presentes en el medio ambiente, pueden causar una serie de impactos negativos, tales como la contaminación del agua, esto se debe a que los metales pesados pueden filtrarse en las fuentes de agua subterránea y superficial, afectando la calidad del agua potable y los ecosistemas acuáticos. Esto puede tener consecuencias graves para la vida acuática y para las personas que dependen de esas fuentes de agua para su consumo. Además de esto, los daños a los ecosistemas debido a que los metales pesados pueden afectar negativamente la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas. Pueden alterar los procesos biológicos y químicos esenciales en los suelos y los cuerpos de agua, lo que afecta la salud de las plantas, los animales y otros organismos (89).

Los riesgos para la salud humana que resultan de la exposición a metales pesados puede tener efectos perjudiciales para la misma. Estos metales pueden acumularse en los tejidos del cuerpo a lo largo del tiempo y causar problemas de salud como daño neurológico, trastornos renales, enfermedades respiratorias, trastornos del desarrollo en niños, entre otros (90).

Figura 6. Impactos negativos de la contaminación por metales pesados



La biorremediación de metales pesados es una técnica importante para reducir la presencia de estos contaminantes en el medio ambiente. Al utilizar microorganismos o plantas especiales, se busca transformar o eliminar los metales pesados del suelo, el agua u otros medios contaminados, ayudando a restaurar la calidad ambiental y proteger la salud humana. La remediación de metales pesados es fundamental para preservar la biodiversidad, garantizar la seguridad del suministro de agua potable y mantener un entorno saludable para las generaciones futuras (90).

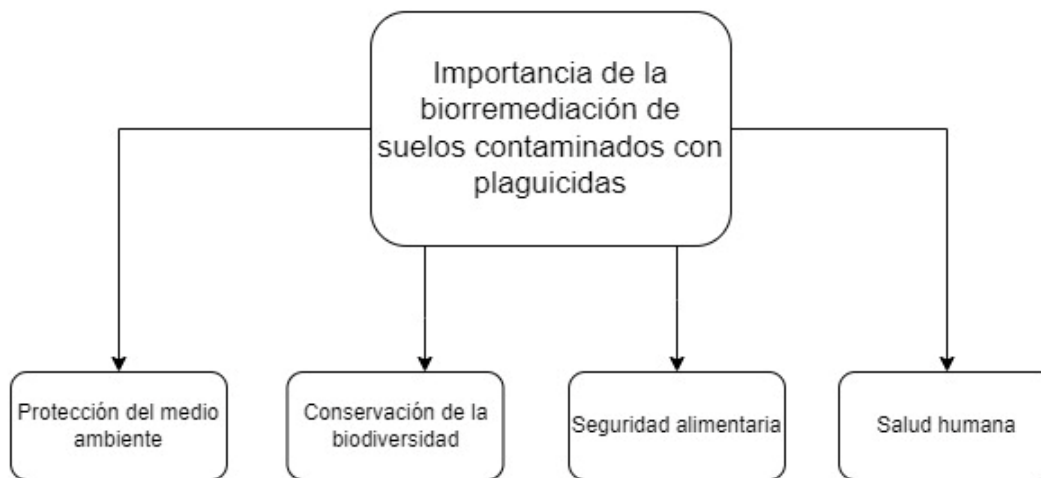
3.1.3.3. Biorremediación de suelos con plaguicidas

En el caso de suelos contaminados con plaguicidas, la biorremediación se presenta como una alternativa de solución importante y necesaria dado que es importante una correcta protección del medio ambiente debido a que los plaguicidas son sustancias químicas utilizadas para controlar plagas en la agricultura y otros sectores. Sin embargo, su uso inadecuado o excesivo puede resultar en la contaminación del suelo, el agua y el aire. La biorremediación ofrece una forma natural y sostenible de eliminar o reducir los niveles de plaguicidas en el suelo, evitando su dispersión y minimizando los impactos negativos en el medio ambiente. Además de esto, la

conservación de la biodiversidad resulta fundamental dado que los plaguicidas pueden ser tóxicos para una amplia variedad de organismos, incluyendo microorganismos, plantas y animales. La contaminación por plaguicidas puede afectar la biodiversidad de los suelos, reducir la población de organismos beneficiosos y afectar el equilibrio de los ecosistemas. La biorremediación ayuda a restaurar la salud del suelo al eliminar los plaguicidas y promover el crecimiento de microorganismos y plantas beneficiosas, lo que contribuye a preservar la biodiversidad (70).

La seguridad alimentaria es otro factor fundamental en la contaminación de suelos agrícolas con plaguicidas puede tener un impacto directo en la seguridad alimentaria. Los cultivos que crecen en suelos contaminados pueden absorber los plaguicidas y acumular residuos en sus tejidos. Esto puede representar un riesgo para la salud humana cuando se consumen estos alimentos contaminados. La biorremediación puede ayudar a reducir los niveles de plaguicidas en el suelo, lo que a su vez reduce la exposición a través de los alimentos y contribuye a la seguridad alimentaria. Además, que puede tener efectos perjudiciales sobre la salud humana dado que la exposición a largo plazo a los plaguicidas puede tener efectos perjudiciales para la salud humana. Algunos plaguicidas son carcinógenos, neurotóxicos o disruptores endocrinos, y su presencia en el suelo puede representar un riesgo para las comunidades cercanas. La biorremediación ayuda a eliminar o reducir la concentración de plaguicidas en el suelo, disminuyendo así el riesgo de exposición y protegiendo la salud humana (70).

Figura 7. Importancia de la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas



Se realizó el análisis de dos documentos científicos de investigación para poder de manera concreta, observar la capacidad remediadora de plaguicidas por parte de los organismos vivos, con esto se busca reforzar el argumento de la eficacia de la biorremediación como método para remediar distintos tipos de contaminantes.

Es importante mencionar que un factor fundamental en el proceso de biorremediación es la capacidad de los microorganismos para tolerar el contaminante, a pesar que los microorganismos son los encargados de biorremediar el proceso, hay que tomar en cuenta que igual los contaminantes son tóxicos y pueden no solamente inhibir el crecimiento biológico sino incluso eliminar los agentes remediadores, por eso la capacidad de supervivencia y tolerancia a los mismos resulta fundamental en el proceso de biorremediación, en el estudio de Rosado (69) se evaluó los efectos de los plaguicidas 2, 4-D y malatión, llegando a la conclusión que el género bacteriano *Pseudomonas spp.*, así como el género fúngico *Penicillium sp.*, dentro de estos géneros, las cepas específicas tolerantes fueron *Pseudomona aeuroginosa*, *Stenotrophomonas pavanii* y *Acinetobacter lactucae*, con esto podemos concluir algo muy importante, los estudios biotecnológicos para determinar resistencia y tolerancia, resulta fundamental dado que los organismos que son capaces de tolerar los contaminantes, si se combinan con otras técnicas como por ejemplo la de bioestimulación o bioaugmentación, pueden generar procesos biorremediadores más eficaces (69).

Así mismo De la Rosa (70) realiza un estudio muy interesante en el que resalta la importancia del uso de Biosurfactantes para la remediación de plaguicidas, es un estudio muy interesante

dado que remarca un punto fundamental en el proceso que es el acceso de los microorganismos al contaminante, esto se dificulta en muchos casos por la naturaleza hidrofóbica de los mismos, por esto es común el uso de surfactantes para romper la tensión superficial, en este estudio en específico se destaca el uso de Biosurfactantes, es decir, moléculas anfipáticas pero de origen biológico, estos Biosurfactantes son usados comúnmente en procesos de biorremediación de petróleo por la misma naturaleza hidrofóbica del contaminante, pero en el estudio de De la Rosa (70) se analizó su aplicabilidad en plaguicidas, las conclusiones del estudio refuerzan la eficacia de la técnica de biorremediación dado que se presenta en el estudio, una gran variedad de agentes biológicos capaces de producir Biosurfactantes y que combinados con otras técnicas como bioaumentación y bioestimulación, así como con el uso de consorcios bacterianos, se puede obtener resultados muy eficientes en el proceso de biorremediación de plaguicidas (70).

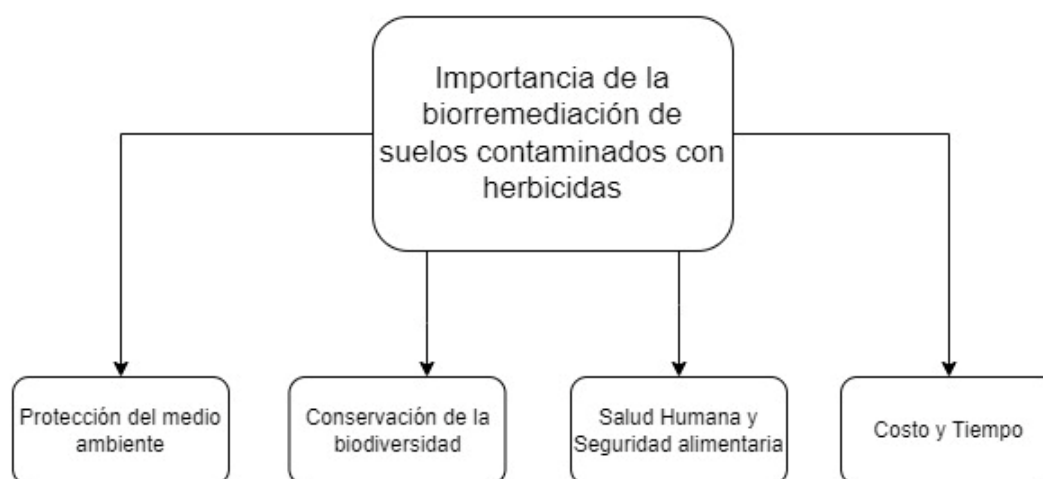
3.1.3.4. Biorremediación de suelos con herbicidas

La biorremediación de suelos con herbicidas es importante para reducir la contaminación ambiental, preservar la biodiversidad del suelo, proteger la salud humana y mejorar la seguridad alimentaria. Es una alternativa sostenible y eficaz que contribuye a restaurar los suelos contaminados y mantener un equilibrio saludable en los ecosistemas, la protección del medio ambiente resulta fundamental dado que los herbicidas, son compuestos químicos utilizados para controlar las malezas en la agricultura y otros sectores. Sin embargo, su uso excesivo o inadecuado puede resultar en la contaminación de los suelos y las aguas subterráneas. La biorremediación ofrece una forma natural y sostenible de reducir la concentración de herbicidas en el suelo, evitando así su dispersión y minimizando los efectos negativos en el medio ambiente. Esto también contribuye a la conservación de la biodiversidad ya que estos pueden tener efectos adversos en la biodiversidad del suelo, afectando a los microorganismos, insectos beneficiosos, lombrices y otras formas de vida del suelo. La biorremediación contribuye a restaurar y preservar la diversidad biológica del suelo al degradar los herbicidas y restablecer un equilibrio microbiológico saludable (91).

El cuidado de la salud humana y seguridad alimentaria es fundamental también dado que algunos herbicidas pueden ser tóxicos para los seres humanos y representar un riesgo para la salud, especialmente cuando se consumen alimentos producidos en suelos contaminados. La biorremediación de suelos con herbicidas reduce la concentración de estas sustancias químicas, disminuyendo así el potencial de exposición humana y mejorando la seguridad alimentaria. De la misma manera el costo y tiempo que la misma representa dado que la biorremediación de

suelos contaminados con herbicidas puede ser una opción más económica y rápida en comparación con otras técnicas de remediación, como la excavación y disposición de suelos contaminados. Además, la utilización de organismos vivos y procesos naturales en la biorremediación evita la generación de residuos adicionales y reduce la necesidad de productos químicos sintéticos (91).

Figura 8. Importancia de la biorremediación de suelos contaminados con herbicidas



Es por estos motivos, que el estudio y desarrollo de la biorremediación como técnica eficaz para remediar suelos contaminados con herbicidas resulta fundamental.

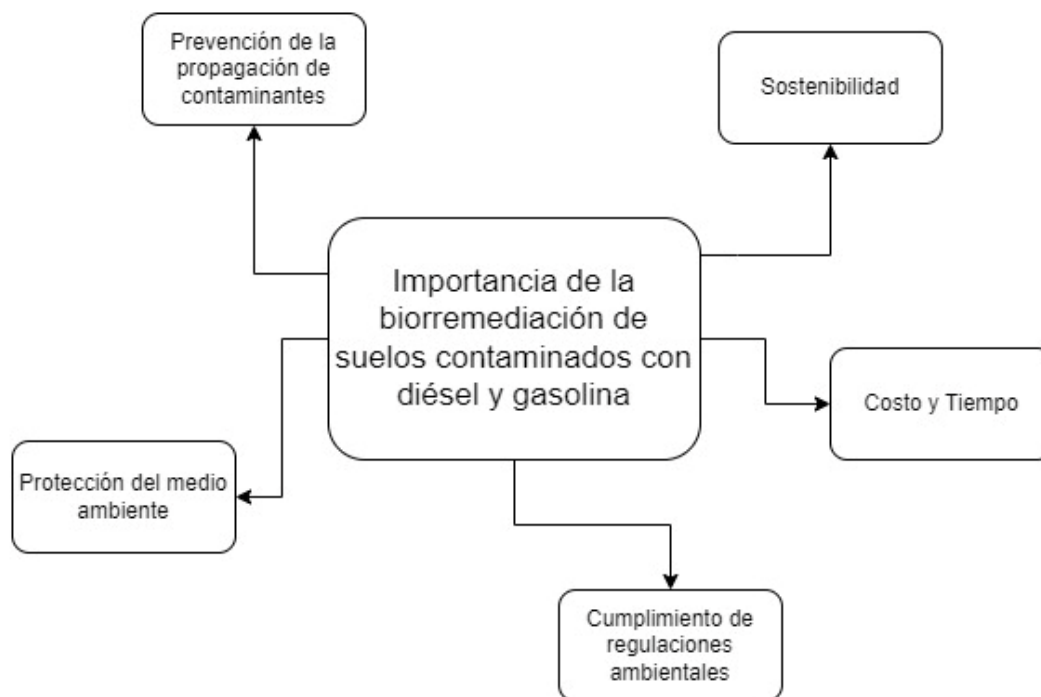
Ponz (71) en su investigación, aplicó la técnica de biorremediación así como la bioaumentación y la bioestimulación en suelos contaminados con pendimetalina que es usado como herbicida, utilizó cepas bacterianas, donde mostró que la cepa *Pseudomonas fluorescens* tuvo la capacidad de degradar suelos de un vivero con presencia de pendimetalina, dicha bacteria presentó como porcentaje de remoción 30% usando como estimulante el surfactante llamado sorbitan trioleato en un periodo de 35 días, con este estudio podemos reforzar el argumento planteado en esta tesis sobre la eficacia de la Biorremediación de su capacidad de remediar distintos tipos de contaminantes y de combinar e innovar en el uso de técnicas que permitan aumentar la eficacia de la misma, vemos en el estudio de Ponz (71) que bioaumentar la eficacia utilizando surfactantes es efectivo, cómo sugerencia al estudio y luego de haber revisado el estudio de De la Rosa (70), se hubiera podido utilizar en vez de un surfactante químico como el sorbitan trioleato, un biosurfactante como bioestimulante.

3.1.3.5. Biorremediación de suelos con diésel y gasolina

Cómo parte del argumento sobre la eficacia de la técnica de biorremediación, por su capacidad de remediar distintos tipos de contaminantes, en específico la biorremediación de suelos contaminados con diésel y gasolina, es importante por la protección del medio ambiente dado que los derrames y fugas de diésel y gasolina pueden contaminar el suelo y el agua, lo que tiene un impacto negativo en los ecosistemas y la salud humana. La biorremediación es una técnica efectiva para eliminar o reducir la presencia de estos contaminantes, ayudando a restaurar la calidad del suelo y el agua. Es también importante por la prevención de la propagación de contaminantes dado que el diésel y la gasolina pueden migrar a través del suelo y llegar a fuentes de agua subterránea, lo que puede resultar en la contaminación de acuíferos y pozos de agua potable. La biorremediación puede detener o minimizar la propagación de estos contaminantes, evitando así su impacto en las fuentes de agua (92).

También es fundamental el cumplimiento de regulaciones ambientales dado que la contaminación por diésel y gasolina está sujeta a regulaciones ambientales estrictas en muchos países. La biorremediación ofrece una solución natural y eficiente para tratar estos contaminantes, lo que ayuda a las empresas y a las autoridades a cumplir con los estándares ambientales y evitar sanciones legales. El costo efectivo comparado con otros métodos de remediación, la biorremediación puede ser una opción más rentable. Al utilizar microorganismos y procesos biológicos naturales, se reduce la necesidad de intervención y disposición costosa de los contaminantes, lo que puede resultar en ahorros significativos. Por último, la sostenibilidad de la biorremediación dado que es una técnica más sostenible en comparación con otros métodos de remediación que pueden requerir el uso de productos químicos o equipos especializados. Al aprovechar los procesos biológicos naturales, se promueve la conservación del medio ambiente y se minimiza el impacto negativo en los ecosistemas (92).

Figura 9. Importancia de la biorremediación de suelos contaminados con diésel y gasolina



Pérez (72) en su estudio, se propuso determinar el rol que juegan los aditivos como el etanol en el proceso de biorremediación, hay que tomar en cuenta que si bien estos aditivos ayudan a mejorar la combustión de los vehículos, pueden tener otros efectos no deseados, como los que demostró Pérez (72) en su estudio, concluye que el etanol añadido en la gasolina, hace que el proceso de biorremediación sea más lento dado que actúa como sustrato inhibitorio.

Pérez (72) utilizó la técnica de bioventeo, o biorremediación usando microorganismos nativos inyectando aire, de esta manera se bioestimula los microorganismos aerobios, pero el etanol retrasa o disminuye la eficiencia del proceso, lo complejo de esto es que, si bien queda demostrado en el estudio que el etanol complica el proceso de biorremediación, así como por su naturaleza volátil hace que sea más fácil contaminar aguas subterráneas y acuíferos (72).

También ayuda a disminuir las emisiones de dióxido de carbono, así como de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles dado que el etanol es renovable, por eso en el estudio, no es concluyente la sugerencia de prohibición del mismo, el análisis crítico de esta investigación, sería el utilizar consorcios bacterianos, dado que si bien en este grupo bacteriano en específico, el etanol actúa como sustrato inhibitorio, existen otros microorganismos que pueden utilizar el etanol como sustrato y degradarlo directamente, es por esto que el estudio de

nuevos consorcios bacterianos así como de los parámetros para optimizar su proceso por parte de la Ingeniería Biotecnológica, resulta de crítica importancia para el desarrollo y efectividad de la técnica a futuro (72).

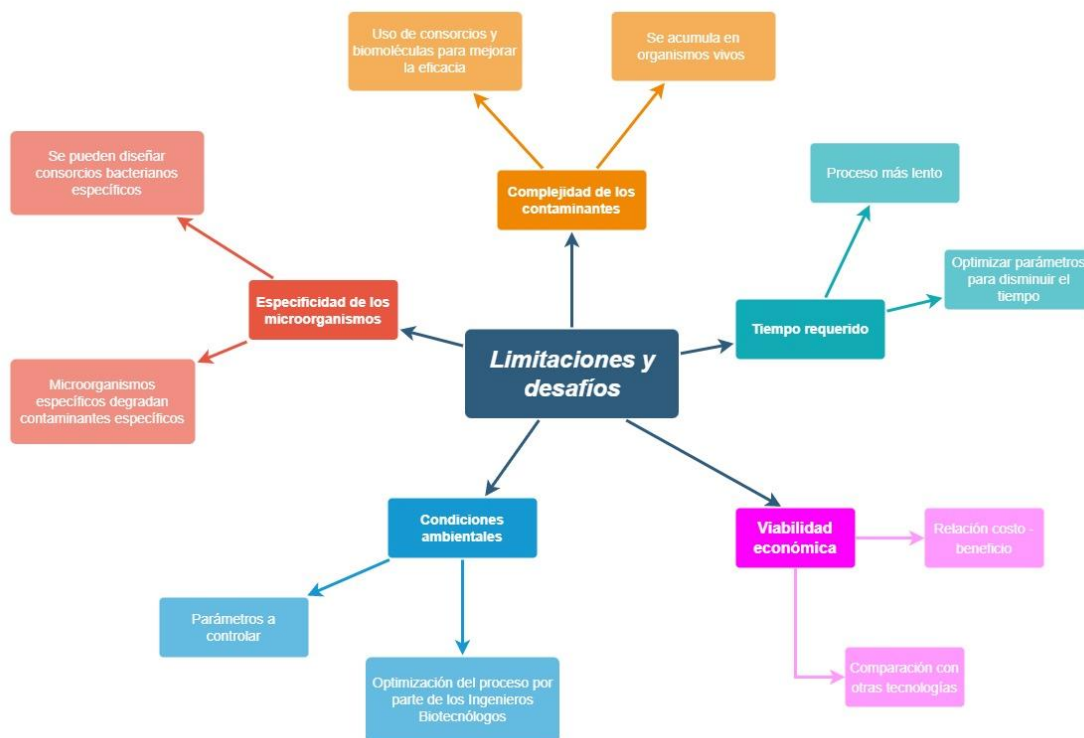
A pesar de la presencia de etanol, en el estudio se verificó la alta efectividad que tiene la biorremediación para remediar diésel, gasolina y hasta biodiésel, en su investigación, Pérez (72), determinó que en el día 16 de tratamiento, disminuyó la concentración de los contaminantes tras la bioestimulación de los microorganismos, tanto de nutrientes como por la aireación, su eficiencia fue 99.85% del suelo con diésel y para suelos con gasolina se llegó a reducir entre un rango de 0-60ppm a 0-2ppm, con esto podemos observar la alta eficacia que tiene la técnica para este tipo específico de contaminante (72).

En su estudio, Lizana (73), evaluaron la capacidad remediadora que tienen los microorganismos provenientes del estiércol "vacuno" de *Bos taurus* en combinación con aserrín *Polylepsis* "queñual" en la biorremediación de diésel de un taller, como parámetro de eficacia de la técnica, se evaluó el crecimiento vegetal de *Hordeum vulgare L.* "cebada", se midió el crecimiento radicular, folicular y altura de la planta, como análisis crítico del estudio, se presenta como un método interesante de medir la eficacia de la técnica, el medir el crecimiento de una especie vegetal, dado que el propósito final de un proceso de biorremediación, es contribuir con la descontaminación y el crecimiento de la flora natural, la cual muchas veces se ve inhibida o perjudicada por los contaminantes derivados de las actividades humanas, normalmente y en otros estudios se mide la remoción del contaminante en sí, el problema es que podría suceder, que al disminuir la concentración del contaminante, se puede pensar en el éxito de la técnica, pero podría suceder que concentraciones bajas del mismo, igual sean inhibitorias para el desarrollo normal de la flora local y de esta manera no permitir un restablecimiento adecuado de la biodiversidad, es por esto que medir la efectividad de la técnica no por la disminución de los contaminantes solamente, sino también el crecimiento vegetal, puede ser un indicador más preciso de la verdadera remediación ambiental y de la futura capacidad del medio para recuperarse (73).

3.2. Limitaciones y desafíos

Si bien la técnica de biorremediación tiene fuertes argumentos a favor que contribuyen con su eficacia, tiene también limitaciones y desafíos que limitan la eficacia de la técnica, como parte del análisis crítico del método, a continuación, se realizará el respectivo análisis de las limitaciones y desafíos del mismo.

Figura 10. Mapa mental de las limitaciones y desafíos de la técnica de Biorremediación



3.2.1. Especificidad de los microorganismos

Los microorganismos utilizados en la biorremediación pueden presentar limitaciones en términos para degradar ciertos contaminantes, si bien parte de los argumentos a favor de la eficacia de la técnica es la enorme variedad de organismos vivos capaces de biorremediar contaminantes, estos organismos son altamente especializados en degradar o utilizar como parte de sus procesos biológicos tipos específicos de contaminantes, es decir, no todos los organismos pueden degradar todos los contaminantes, ése proceso es un desafío porque no siempre, los microorganismos nativos son capaces de biodegradar los contaminantes presentes en su suelo, un conocimiento biotecnológico más avanzado para poder usar consorcios bacterianos externos, suele ser necesario en la técnica, esto si bien es una limitación, representa también una

oportunidad para la profesión de Ingeniería Biotecnológica ya que son los Ingenieros Biotecnólogos los encargados de determinar los microorganismos necesarios para el proceso de biorremediación, ya sea usando microorganismos nativos o consorcios de microorganismos externos, esto también si bien es una limitación de la técnica, representa una oportunidad de negocio ya que vimos en algunos estudios, la patente y uso de consorcios bacterianos específicos, dado que los organismos vivos biorremediadores son específicos para los diferentes tipos de contaminantes, se pueden bio diseñar con ingeniería, consorcios bacterianos específicos para contaminantes ambientales específicos (94).

3.2.2. Condiciones ambientales

Uno de los puntos limitantes del proceso de biorremediación más complejos, son las condiciones ambientales, dado que el proceso de biorremediación utiliza organismos vivos, dichos organismos vivos, necesitan de toda una serie de condiciones para su florecimiento y eficacia, factores como la temperatura, la disponibilidad de nutrientes, la presencia de inhibidores, la acidez del suelo o del agua contaminada, el nivel de aireación, son sólo algunos de los factores que determinan la eficacia de la técnica de biorremediación, pero si bien estos limitantes hacen que sea más difícil la aplicabilidad de la biorremediación, hacen que el trabajo de los Ingenieros Biotecnólogos sea aún más importante, tener Ingenieros Biotecnólogos que sistematicen y optimicen los parámetros de biorremediación, resulta fundamental para el desarrollo y expansión de la técnica (94).

3.2.3. Tiempo requerido

La biorremediación puede ser un proceso relativamente lento en comparación con otras técnicas de remediación. La degradación microbiana de los contaminantes puede llevar semanas, meses o incluso años, dependiendo de la naturaleza y concentración de los contaminantes, así como de las condiciones ambientales. Hay que tomar en cuenta que los procesos de biorremediación son procesos naturales biológicos, por lo que en comparación con una remediación física o química, toma más tiempo, entonces en casos en los que el tiempo es el factor determinante, la técnica de biorremediación puede no ser la más óptima, pero salvo el caso del tiempo, los beneficios que presenta el remediar contaminantes sin generar nuevos contaminantes y yendo en concordancia con los procesos biológicos naturales, la biorremediación es una técnica muy prometedora (94).

Lo que hay que tomar en cuenta en éste limitante en específico, es que si bien el tiempo es un desafío, los tiempos de biorremediación también pueden ser optimizados si se controla adecuadamente los parámetros, en los estudios revisados en esta tesis, se han observado varios casos en los que moviendo los parámetros biológicos, se han acortado los tiempos de remediación de los contaminantes, esto refuerza el argumento que el trabajo de los Ingenieros Biotecnólogos resulta fundamental para el desarrollo y eficacia de la técnica (94).

3.2.4. Complejidad de los contaminantes

Algunos contaminantes, como los compuestos orgánicos persistentes o los metales pesados, pueden ser más difíciles de degradar mediante procesos de biorremediación. Estos contaminantes pueden ser tóxicos para los microorganismos o presentar características químicas complejas que dificultan su degradación completa. Este factor limitante de la técnica de biorremediación es más compleja de manejar con conocimientos biotecnológicos porque influyen factores intrínsecos de la relación entre los microorganismos y los contaminantes como su persistencia, algunos de estos contaminantes pueden permanecer sin degradarse fácilmente por períodos prolongados de tiempo, esto puede deberse a su naturaleza físico química haciéndolos resistentes a la acción de los microorganismos, entre la documentación revisada se ha visto que compuestos producidos por los mismos microorganismos como enzimas y Biosurfactantes pueden ayudar a disminuir esta resistencia de los contaminantes (94).

Otro factor que limita la técnica desde la complejidad de los contaminantes es la toxicidad que presentan los contaminantes para los mismos microorganismos, esta toxicidad puede inhibir el crecimiento y también afectar la capacidad remediadora de los organismos vivos, algunos contaminantes logran esto incluso en cantidades bajas, además de esto, muchos de estos contaminantes orgánicos tienen estructuras químicas muy complejas, como por ejemplo anillos aromáticos, enlaces químicos fuertes o grupos funcionales que presentan baja reactividad biológica, todo esto hace que se necesite microorganismos muy específicos, muchas veces en consorcios o correctamente bioestimulados para poder degradar este tipo de contaminantes complejos. Por último, otro factor que limita la técnica de biorremediación es la bioacumulación de los contaminantes y es que, al tratarse de procesos biológicos, muchas veces los contaminantes tienen la capacidad de acumularse en los organismos vivos a lo largo de la cadena alimentaria (94).

Estos contaminantes pueden ser difíciles de eliminar debido a su persistencia y capacidad para transferirse de un organismo a otro. La biorremediación de contaminantes bioacumulativos puede ser más desafiante debido a la necesidad de abordar no solo la contaminación en el medio ambiente, sino también la acumulación en los organismos (94).

3.2.5. Viabilidad económica

Uno de los principales factores limitantes de la técnica de biorremediación es la viabilidad económica porque hay que tomar en cuenta que se requiere de inversión no solamente en la aplicación, sino en la investigación previa y en el desarrollo, sumado a esto es el hecho cómo se menciona en el punto 3.2.3 del tiempo requerido, es una técnica generalmente a largo plazo, por esto es necesario realizar un adecuado análisis de costos y beneficios, entre los beneficios que se pueden obtener es la valorización de la propiedad en la que se está aplicando la técnica y los beneficios ambientales (94).

A estos beneficios se debe tomar en cuenta los costos de implementación que como veíamos en los estudios analizados, una correcta investigación inicial para determinar los microorganismos nativos, el tipo exacto de contaminantes que se desea remediar, puede marcar una diferencia en la eficiencia del proceso de biorremediación, adicional a estos costos iniciales de implementación, también hay que tomar en cuenta los costos operativos dado que como se sugería, para poder obtener los mejores resultados, es necesario controlar los parámetros, además de la correcta selección de microorganismos, para esto se necesitan Ingenieros Biotecnólogos, además de esto, es un factor común en casi todos los estudios revisados que la bioestimulación, es decir el adicionar nutrientes al proceso, aumenta la eficacia, esto implica costos adicionales también, adicional a esto, otro factor económico a tener en cuenta es que la biorremediación como técnica, es un proceso a largo plazo, y si bien a largo plazo se puede mejorar el valor de las propiedades, reutilización de área inutilizadas, protección de recursos naturales entre otros, se debe analizar adecuadamente la relación costo beneficio de un proceso ambientalmente responsable pero proyectado a usarse a largo plazo. Y, por último, el factor económico principal a tener en cuenta es la comparación con otras tecnologías dado que lo que va a garantizar el uso expandido de la biorremediación es en la medida que tenga mejores relaciones de costo beneficio con las técnicas físicas o químicas de remediación (94).

3.3. Estudios de caso y ejemplos destacados

Se ha revisado de manera crítica más de 70 documentos científicos sobre biorremediación, se pudo observar que su eficacia radica en 3 puntos principalmente, la gran variedad de microorganismos y organismos vivos capaces de biorremediar contaminantes, dichos organismos van desde bacterias, hongos, incluso animales y plantas, los cuáles son capaces de remover de manera muy eficiente, en la mayoría de casos más del 80%, distintos tipos de contaminantes que van desde hidrocarburos, metales pesados, plaguicidas, herbicidas, diésel y gasolina, además de esto, la innovación de técnicas que se están aplicando en el proceso de biorremediación hacen que el método se presente como una técnica muy eficiente, los desafíos y limitaciones de la misma, pueden ser manejados con conocimientos Biotecnológicos especializados, esto hace que las perspectivas futuras de la técnica de biorremediación sea prometedora en la medida que la Ingeniería Biotecnológica la desarrolle, tanto en la investigación, desarrollo y aplicación de la misma (86).

Uno de los puntos más interesantes del análisis de toda la documentación, es la creación y patente de consorcios bacterianos específicos para un tipo específico de contaminante, dado que la Ingeniería Biotecnológica, puede caracterizar, aislar y cultivar microorganismos específicos, la creación de productos comercializables, se presenta como una alternativa muy prometedora para el área, Ingenieros Biotecnólogos pueden crear emprendimientos cuyo foco sea biorremediar suelos contaminados específicos. Sería función de los Ingenieros Biotecnólogos, determinar qué microorganismos en sinergia, por ejemplo, complementar microorganismos remediadores de hidrocarburos combinados con microorganismos que produzcan Biosurfactantes y monitoreando los parámetros que influyen en el proceso y eligiendo los correctos nutrientes para bioestimular el proceso, se puede lograr resultados muy eficaces en el proceso de Biorremediación.

Reforzando este punto sobre la utilización de consorcios bacterianos, se presentará a continuación un caso de estudio local que representa de manera muy clara, el enorme potencial que tiene la técnica de biorremediación, se desarrollará detalladamente todo el proceso, analizando el mismo y revisando su potencial a futuro.

Rodríguez (86), en el año 2009, realizó un estudio muy interesante en el que realizó un proceso de Biorremediación completo ante un derrame de combustible, en específico diésel 2, por la volcadura de un camión cisterna en la Quebrada del Toro en Camaná, dicho cisterna en una de las curvas consideradas “más peligrosas”, sufrió una volcadura que hizo que se rompiera el

cisterna en el que contenía más de 9000 galones de diésel 2, todo éste combustible se derramó y generó contaminación en el suelo de la zona, Rodríguez (86), implementó ante este derrame, todo un proceso completo de Biorremediación en el que se observan todos los pasos, la eficacia del método, el potencial de la técnica y los desafíos y limitaciones de la misma. Se utilizó un consorcio bacteriano desarrollado por científicos japoneses de la universidad de Okinawa, ellos diseñaron un consorcio de microorganismos, llamado EM por sus siglas en inglés de Effective Microorganisms, de más de 80 tipos de microorganismos entre los que destacan 3 tipos, bacterias acidolácticas que generan el medio necesario para el crecimiento de las bacterias beneficiosas, inhiben también el crecimiento de organismos no deseados, el otro tipo son las bacterias fototrópicas que generan toda una serie de metabolitos que pueden ser beneficiosos no sólo para los otros microorganismos, sino que degradan los hidrocarburos y ayudan a las raíces de las plantas a absorber mejor los nutrientes, por último, el tercer tipo de organismos son las levaduras que producen hormonas y enzimas que ayudan al crecimiento vegetal, entre estos 3 tipos de microorganismos, no solamente logran remediar los hidrocarburos contaminantes, sino que transforman el suelo, en un suelo fértil y rico de nutrientes y nitrógeno que puede ser aprovechado para agricultura o como abono para parques y jardines, con esto podemos observar uno de los puntos más importantes a favor de la eficacia de la biorremediación, que es la capacidad de no solamente limpiar el suelo de los contaminantes, sino en mejorarlo (86).

Menciona Rodríguez (86) también otro punto importante, la creación de sistemas de contingencia obligatorios para todas las empresas que trabajan con hidrocarburos, ya sea en producción o transporte, Rodríguez demostró el gran potencial de la biorremediación y podemos entender que como parte de las municipalidades y empresas, debería haber contratados Ingenieros Biotecnólogos que se encarguen de estos procesos, esto es sumamente importante porque parte de la problemática de la Ingeniería Biotecnológica en países en vías de desarrollo como el nuestro, es la falta de trabajo específico y especializado para Biotecnólogos, podemos ver a muchos Ingenieros Biotecnólogos realizando labores propias de otras áreas, como la Ingeniería Ambiental o la Ingeniería de seguridad y salud ocupacional, leyes que promuevan la implementación de planes de contingencia netamente biotecnológicos, haría que las municipalidades y empresas se vean en la necesidad de contratar dentro de sus áreas ambientales, a Ingenieros Biotecnólogos. En el estudio de Rodríguez (86), menciona otro punto fundamental en el proceso de biorremediación, la bioestimulación, menciona la importancia de agregar fertilizantes (como fuente de nitratos y sulfatos) para poder proporcionar todos los nutrientes necesarios a los consorcios de microorganismos, si bien Rodríguez no lo aplica

directamente en su proceso de Biorremediación, es importante mencionarlo porque como perspectivas futuras, la implementación de técnicas de biorremediación in situ, resulta también prometedor, en el caso de Rodríguez (86) se realizó un proceso de biorremediación ex situ, el cual se detallará a continuación a manera de entender las implicancias en costo y complejidad en relación con los resultados finales obtenidos, el flujograma del proceso se puede resumir de la siguiente manera:

Figura 11. Diagrama que representa los pasos utilizados en el proceso de biorremediación en el derrame de diésel 2 en Camaná



1. Análisis preliminar de la zona, se realizó un muestreo y mapeo de la zona contaminada, éste paso es importante porque permite armar un posterior plan de acción más efectivo.

2. Análisis de la concentración de los contaminantes y muestreo de suelo no contaminado para conocer la composición local y hacer una comparativa suelo – contaminante.
3. Test de percolación para determinar la permeabilidad del suelo y velocidad de distribución del contaminante, podemos observar que la permeabilidad del suelo determina cuánto se logra expandir el contaminante, esta herramienta será de mucha utilidad para determinar cuánto de suelo tiene que ser transportado a otra área, esto es importante porque los costos operativos, varían dependiendo de la cantidad de tierra que sea necesario transportar.
4. Remoción manual del terreno afectado, esto se determina en base al test de percolación, esta remoción fue llevada a cabo por obreros que se contrataron para el proceso, es necesario tomar en cuenta lo que se aplicó en el estudio de Rodríguez, asegurarse que antes de empezar con el proceso de remoción, se dio una charla de seguridad a los obreros, luego su correspondiente entrega de EPPs.
5. Abrir rutas de acceso para que, entre la maquinaria pesada, es necesario tomar en cuenta que esto es importante para prevenir accidentes, sobre todo es este caso en específico que la remediación se está dando como resultado de un accidente.
6. Remoción del terreno, desde 10cm en algunas zonas hasta 50cm en otras zonas, esto depende del test de percolación y dado que toda la tierra removida tiene que ser transportada, los cm de diferencia representan gastos adicionales em transporte en los camiones.
7. Las piedras no podían ser removidas, tuvieron que ser dejadas en el sitio para ser descontaminadas con microorganismos posteriormente.
8. Adecuar la zona de tratamiento, dado que es un proceso de Biorremediación ex situ, el terreno que se utilizó tenía un metraje de 750m², sin población cercana y con un nivelado de gradiente de 10 grados de este a oeste.
9. Se impermeabilizó el área de trabajo con una capa de 20cm de arcilla compactada, además se colocaron pilas aisladas por polímeros de alta densidad para evitar lixiviados.
10. Preparación de las pilas para la biorremediación, se arman pilas de 1m por 1,5m por 10m, con forma trapezoidal.
11. Activación de los EMs, dado que para su transporte y conservación, se encuentran en estado de latencia y deben ser activados 96 horas antes de su aplicación, para el proceso de activado son necesarias muchas habilidades biotecnológicas, por lo que el manejo biotecnológico resultado fundamental en las perspectivas futuras, este proceso involucra la elaboración de un medio de cultivo, la posterior hidratación de los microorganismos,

incubación de los mismos y monitoreo de los parámetros de crecimiento, como podemos observar, la activación de los EMs, requiere de los conocimientos y habilidades de los Ingenieros Biotecnólogos para la correcta activación, parte fundamental del proceso de Biorremediación.

12. Aplicación de los microorganismos afectivos activados a las pilas de biorremediación controlando parámetros de aireación y temperatura en las pilas.

Los resultados del estudio de Rodríguez fueron sumamente interesantes como caso de estudio porque la concentración inicial del contaminante era muy alta, el primer análisis que se realizó el 29 de Mayo del 2009, mostró una muy elevada concentración de hidrocarburos, 234 508mg/kg exactamente, se realizaron 3 análisis posteriores y el último, realizado el 24 de Septiembre del 2009, es decir casi 4 meses después del inicio del tratamiento, mostró una concentración de 6 981.15mg/kg, lo que representa una remoción de casi el 97%, con esto podemos observar categóricamente que el método de biorremediación, cuando utiliza los microorganismos adecuados para el contaminante adecuado, es sumamente eficiente, y no solamente esto, sino que tras los 4 meses de tratamiento, el suelo que inicialmente era un terreno árido, por la alta concentración de bacterias y nutrientes, se convirtió en suelo fértil, dicho suelo fue donado a la municipalidad de Camaná para su uso en parques y jardines, podemos observar gracias a éste estudio otro beneficio enorme de la biorremediación en comparación con los métodos físicos, por ejemplo el de palear el contaminante para volatilizarlo.

Y por último en el análisis de este caso de estudio, es sumamente interesante también no solamente por todo lo positivo, sino también porque ejemplifica los desafíos y limitaciones de la técnica, factores como costos, tiempo y la necesidad de conocimientos biotecnológicos específicos son ejemplificados en este proceso de biorremediación aplicado en nuestra ciudad.

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

4.1. Desarrollo de nuevas tecnologías

Uno de los argumentos sustentados en este trabajo de tesis a favor de la eficacia de la técnica de biorremediación, es la diversidad e innovación de técnicas que pueden ser aplicadas, se han revisado técnicas que van desde el uso de bioelectroremediación, adicionar partículas de ácido salicílico, uso de lodos activados como fuente de microorganismos, entre otras, pero sin lugar a duda, la técnica más prometedora y con mayor proyección a futuro, es la modificación y mejora genética de los microorganismos, Rodríguez (36) en su estudio demostró que las cepas de *Corynebacterium glutamicum* genéticamente modificadas remueven hasta 100 veces más arsénicos que las cepas no modificadas genéticamente, podemos observar aquí que un incremento de magnitud de capacidad remediadora de más de 100 veces es significativo, es aquí dónde el rol de la Ingeniería Biotecnológica juega un rol fundamental, pudimos observar en el caso de estudio del derrame de diésel 2 en Camaná, que la biorremediación fue muy eficaz, Rodríguez (86) se reporta en el estudio que es Ingeniero Ambiental, podemos inferir que dado que los EMs mencionados vienen con todo lo necesario para su activación, conocimientos sobre microbiología son necesarios pero dichos conocimientos microbiológicos no son exclusivos de los Ingenieros Biotecnólogos, Ingenieros Ambientales, Biólogos y hasta Ingeniero Químicos, pueden llevar a cabo proceso de Biorremediación, dónde la Biotecnología se diferencia, es en este punto señalado, la mejora genética de microorganismos, esto se puede vincular con uno de los puntos analizados en el cuerpo de la revisión, la importancia de crear y patentar consorcios bacterianos, si combinamos ambas, es decir, diseñar genéticamente organismos con mucho mayor potencial biorremediador y combinarlos entre sí para tener un producto específico para tipos distintos de contaminantes y que estos consorcios especializados genéticamente mejorados puedan ser patentados para ser vendidos y comercializados, es un enfoque muy interesante y con mucha oportunidad de crecimiento y desarrollo para la Ingeniería Biotecnológica y la biorremediación.

4.2. Integración de enfoques de biorremediación

Otro punto interesante en el desarrollo de la técnica como perspectiva futura, es la integración de distintos enfoques de biorremediación, por ejemplo, en el estudio de Nobili (52), se utilizó *Eisenia fetida* (Lombriz roja californiana), como complemento del proceso de biorremediación, en el que el lombricompostaje sirvió como método de aireación del suelo para mejorar la efectividad de los microorganismos, se ha mencionado en esta tesis como parte de las limitaciones y desafíos de la técnica de biorremediación, el control de los parámetros y los

costos, generalmente los microorganismos remediadores son aerobios, lo que implica que en determinadas situaciones, se debe airear el suelo, lo que implica mayores costos, integrar técnicas como el lombricompostaje hace que el suelo se airee de manera natural reduciendo así potencialmente los costos pero manteniendo uno de los puntos fuertes de la biorremediación que es la integridad de los procesos naturales con el proceso de descontaminación, no solamente esto, sino que las lombrices secretan enzimas y subproductos que en combinación con la actividad de los microorganismos, terminan como vimos en el estudio de Rodríguez (86), convirtiendo los suelos contaminados en suelos incluso más fértiles que al inicio del proceso.

Además de esto, el potencial que existe para combinar incluso técnicas físicas como la electroremediación en el proceso de biorremediación, como se vio en el estudio de Barba (13) en el que agregando celdas eléctricas en pilas de remediación, se logró incrementar la eficacia del proceso, si bien el incremento no fue significativo, esto podría deberse a que los microorganismos vivos, entre los parámetros que se necesita optimizar para su óptimo crecimiento, no está la corriente eléctrica, pero podría ser un método que se aplique antes del proceso de biorremediación, dado que la electroremediación puede desplazar los contaminantes hacia los electrodos, lo que haría que por ejemplo, para la biorremediación de metales pesados, los contaminantes se encuentran más concentrados en una zona específica facilitando y optimizando el proceso.

4.3. Biorremediación de contaminantes emergentes

La biorremediación se presenta como una técnica muy eficiente para descontaminar suelos de manera armónica con los procesos naturales, pero es importante señalar que conforme la tecnología avanza, las sociedades se desarrollan, se crean nuevos y mejores productos para mejorar la vida humana, surgen también toda una serie de nuevos contaminantes que como consecuencia del manejo actual de residuos, terminan siendo nuevas fuentes de contaminación que terminan afectando el medio ambiente, esto abre un nuevo mundo de oportunidades de investigación para futuros ingenieros biotecnólogos (93).

Por ejemplo, con el desarrollo de la industria farmacéutica, medicinas, analgésicos, antibióticos, hormonas y antidepresivos están siendo cada vez más detectados contaminando fuentes de suelo y aguas a través de desechos humanos y aguas residuales no tratadas. Estos compuestos pueden tener toda una serie de efectos negativos en los ecosistemas y la vida silvestre y dada su naturaleza orgánica, son candidatos a ser biodegradados por microorganismos con la técnica de biorremediación, pero es necesario que se realicen los estudios adecuados tanto para

determinar los microorganismos más adecuados para realizar esos procesos así de cómo los parámetros y técnicas necesarias para optimizar el proceso y obtener los mejores resultados, es aquí dónde la investigación de Ingenieros Biotecnólogos se hace indispensable (95).

De la misma manera, productos químicos para el cuidado personal como filtros solares, productos para el cuidado del cabello y productos de limpieza, están encontrando su camino hacia suelos y fuentes de agua contaminándolos, la biorremediación podría aplicarse para reducir su impacto ambiental.

Por último, el desarrollo de productos nuevos de la industria química, así como la creación de nuevos plaguicidas y herbicidas para optimizar los procesos agrícolas, crean toda una nueva serie de productos de desecho que contaminan el medio ambiente y afectan a la fauna y flora, dado que muchos de estos contaminantes son de carácter orgánico, se presenta la biorremediación como una técnica prometedora para descontaminar estos nuevos contaminantes. Pero es importante resaltar la importancia de desarrollar investigaciones sobre esto, probar consorcios bacterianos que biorremedien estos contaminantes específicos y los parámetros necesarios para optimizar el proceso quedan a manos de Ingenieros Biotecnólogos calificados y motivados que quieran desarrollar la técnica cada vez más (93) (95).

4.4. Aplicación de la biorremediación a diferentes contextos

Aplicar la biorremediación a distintos contextos es otro punto de desarrollo e investigación a los que se les debe dedicar a futuro, esfuerzo, tiempo y recursos. En este trabajo de investigación documental se ha revisado con mayor énfasis la biorremediación de suelos contaminados, pero los microorganismos y la técnica no se limitan solamente a suelos contaminados, la biorremediación de aguas contaminadas, aguas subterráneas y suelos áridos son contextos en los que la técnica de biorremediación puede ser muy eficiente también, en el contexto local, en los últimos años, se han realizado en nuestra ciudad, 2 estudios interesantes que se enfocan en biorremediar los efluentes del parque industrial de Río Seco en Arequipa, estos estudios buscan remediar el agua contaminada con metales pesados como el Cr(VI), dado que dichos efluentes, provenientes en su mayoría por las curtiembres que operan en la zona así como de otras industrias, terminan siendo usados para regadío de vegetales en la zona generando problemas de salud para la población local, por esto su biorremediación resulta importante (96).

El grupo de investigación de Ciencia y Tecnología de la Universidad Católica San Pablo y financiada por el Concytec, investigaron, identificaron y aislaron 3 cepas de bacterias, *Proteus mirabilis*, *Hymenobacter campaniensis* y *Bacillus pumilus* y descubrieron que el consorcio de

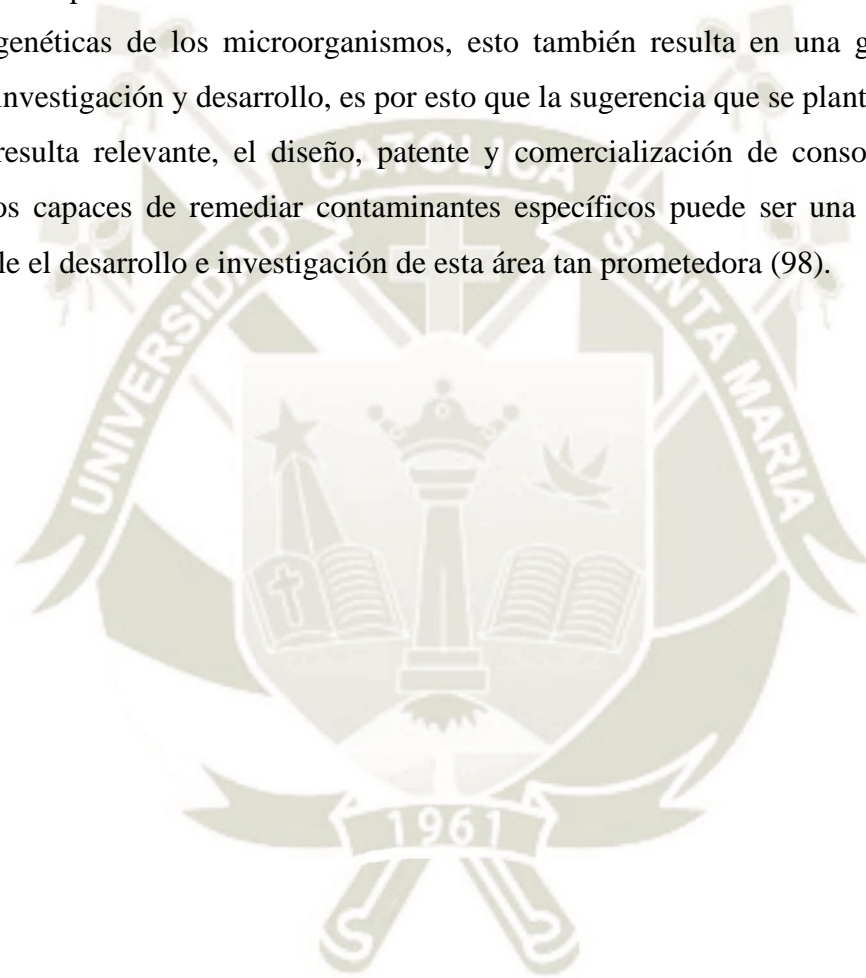
estas 3 bacterias, por sus distintas propiedades y sinergia, logran reducir el cromo 6 a cromo 3, además de ser resistentes a otros metales pesado y mostrar capacidad de biosorción, mostrando potencial biorremediador no solamente en curtiembres sino en otras áreas. Otro estudio buscó aislar algas de ecosistemas impactados por actividades industriales tanto en el parque Industrial de Río Seco como en desechos de minas informales del Río Ocoña y el Río Acarí, con esto se buscaba tener algas resistentes a aguas contaminadas y que mostraran potencial biorremediador. De similar manera, otro grupo de investigadores Arequipeños probaron utilizar microalgas como *Acutodesmus dimorphus* y *Arthrospira platensis* y evaluaron su capacidad para biorremediar aguas contaminadas en un fotobiorreactor. Vemos en los dos últimos casos que se da mayor prioridad a las algas sobre las bacterias o hongos, esto se debe a que se busca una biorremediación de aguas, y las algas se adaptan mejor que las bacterias y hongos a este medio en específico, con esto podemos reforzar el argumento que parte de lo que hace que la técnica de Biorremediación sea tan eficiente, es la enorme cantidad de organismos vivos que pueden ser usados en distintos contextos, pero esto abre una vez más la necesidad de realizar mayor número de investigaciones para el desarrollo y optimización de la técnica por parte de los Ingenieros Biotecnólogos (96) (97).

4.5. Consideraciones de sustentabilidad

Respecto a la biorremediación como método, se ha sustentado extensamente en este trabajo de tesis su eficacia, estudios y sus respectivos resultados, pero como en todo análisis crítico, y cómo se revisó en las limitaciones y desafíos, la técnica no es perfecta y tiene mucho margen de mejora, esto es un aspecto positivo para los Ingenieros Biotecnólogos ya que son ellos los más especializados para realizar esas mejoras. La implicancia ambiental de la técnica es uno de los aspectos más importantes que tiene a favor el método dado que la integración de los microorganismos, al ser seres biológicos, remedian los contaminantes sin generar nuevos incluso en determinadas situaciones, dejando el suelo más fértil que antes cómo se revisaba en el trabajo de Rodríguez (86), el desafío en sustentabilidad de la técnica de biorremediación podríamos centrarla en dos puntos principales, tiempo y costo, hemos revisado en la bibliografía que los niveles de remoción de contaminantes son elevados pero luego de 3 a 4 meses de tratamiento en varios de los estudios, esto representa un desafío para los Ingenieros Biotecnólogos dado que si bien no se puede reducir el tiempo más allá de los límites biológicos de los organismos, se puede optimizar este proceso controlando adecuadamente los parámetros o se puede mejorar el tiempo también, combinando otras técnicas o usando consorcios mejorados de microorganismos. El otro punto de sustentabilidad, el costo, realizar una

biorremediación ex situ en una zona de tratamiento específica, puede obtener resultados muy eficientes, pero implica unos costos adicionales de transporte del suelo contaminado, de la misma manera, la aplicación in situ requiere que los parámetros de aireación, aislamiento de las pilas, entre otros factores, sean controlados de manera eficiente para obtener mejores resultados, lo que implica un costo adicional también, es por eso que la investigación y el desarrollo constante de la técnica por parte de los Ingenieros Biotecnólogos resulta fundamental (98) (86).

Otro punto importante a mencionar en la sustentabilidad de la técnica es la realización de mejoras genéticas de los microorganismos, esto también resulta en una gran inversión en equipos, investigación y desarrollo, es por esto que la sugerencia que se planteó en este trabajo de tesis resulta relevante, el diseño, patente y comercialización de consorcios bacterianos específicos capaces de remediar contaminantes específicos puede ser una manera de hacer sustentable el desarrollo e investigación de esta área tan prometedora (98).



5. CONCLUSIONES

Se concluye que la biorremediación es una técnica eficiente para la remediación de suelos, su eficacia se basa en 3 puntos, los cuáles se apoyan en estudios reales con evidencia en la eficacia de los resultados de remoción del contaminante.

El primer punto es la diversidad y gran variedad de organismos capaces de biorremediar contaminantes, dichos organismos van desde bacterias, hongos, algas, plantas y hasta animales, dichos organismos pueden trabajar en consorcios generando sinergias, ya sea sinergias entre distintas bacterias en las que complementan su capacidad metabólica para degradar los contaminantes, también pueden hacer sinergias en las que los microorganismos ayudan a las plantas confiriéndoles resistencia al contaminante, y distintos tipos de interacciones beneficiosas como la producción de enzimas y Biosurfactantes, entre otras interacciones bioquímicas.

El segundo punto es la capacidad de combinar técnicas e innovar, se ha demostrado este argumento con distintos estudios como la aplicación de lombricompostaje para airear el suelo aumentando la eficacia de los microorganismos, la modificación genética de microorganismos para aumentar su capacidad remediador, la aplicación de lodos activados de plantas de tratamiento de aguas como fuente de microorganismos remediadores entre otras técnicas.

El tercer punto es la variedad de contaminantes que pueden ser biorremediados, dichos contaminantes van desde hidrocarburos, derivados del petróleo, metales pesados, herbicidas, plaguicidas, entre otros. La biorremediación como se demuestra en los estudios analizados, es una técnica muy eficiente y que se puede aplicar en un amplio rango de situaciones en las que el suelo haya sido contaminado con alguno de estos contaminantes, en todas las situaciones, la efectividad de la biorremediación fue alta, siempre y cuando hubiera un manejo adecuado de los parámetros biológicos que necesitan los organismos vivos para poder remediar dichos contaminantes.

Se concluye también que si bien la técnica de biorremediación es una técnica eficiente, presenta distintos desafíos que se analizaron de manera crítica como resultado de la revisión documental, dichas limitaciones son la especificidad de los microorganismos, este punto se refiere al hecho que no todos los microorganismos pueden remediar todos los contaminantes, el proceso es específico, microorganismos específicos y combinados adecuadamente, remedian contaminantes específicos en condiciones específicas, esto representa un desafío dado que biorremediar usando los microorganismos nativos no siempre es una opción. Otro desafío son

las condiciones ambientales, entiéndase por condiciones ambientales a todos los parámetros que influyen en la eficacia del proceso, esto es un desafío, así como una oportunidad para los Ingenieros Biotecnólogos dado que son ellos los encargados de optimizar el proceso. El tiempo requerido es otra limitación de la técnica dado que, al ser un proceso biológico, tiene un tiempo natural que, si bien puede ser optimizado, tiene una limitación bioquímica. La complejidad de los contaminantes es otra limitación dado que muchas veces los mismos contaminantes actúan inhibiendo o ralentizando el proceso y es por esto que una adecuada selección de los organismos vivos resulta fundamental y el último desafío es la viabilidad económica, y esto se debe a que si bien la biorremediación tiene altos niveles de eficiencia, requiere de tiempo, conocimientos biotecnológicos especializados y toda una serie de parámetros y métodos que hay que controlar, lo que resulta en que puede convertirse en una inversión significativa, por eso es necesario optimizar el proceso para poder disminuir los costos y hacerlo económicamente viable.

Se concluye entonces que la biorremediación es un proceso muy eficiente pero que necesita de Ingenieros Biotecnólogos para su correcto desarrollo, innovación y optimización. En nuestro contexto local de Arequipa, la biorremediación se presenta como una técnica prometedora para ser aplicada sobre todo a la remoción de contaminantes como herbicidas y plaguicidas dado que es una región con mucha agricultura y estos contaminantes vienen siendo usados hace mucho tiempo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kapahi, M. y Sachdeva, S., (2019). Bioremediation Options for Heavy Metal Pollution, *Journal of health and pollution*, Vol. 9, pág24.
2. Agüero, A. y Jiménez, J., (2021). Environmental pollution and health problems in the “valle hondo” community, cojedes state, venezuela., *Revista Geografica Venezolana*, Vol. 62, págs. 248 - 254.
3. Saha, L., et al., (2021). Recent Developments in Microbe–Plant-Based Bioremediation for Tackling Heavy Metal-Polluted Soils., *Frontiers in Microbiology*, Vol. 12:731732.
4. Vikrant, Kumar, et al., (2018). Recent advancements in bioremediation of dye: Current status and challenges, *Bioresource Technology*, Vol. 253, págs. 355-367.
5. García Vizuete, Ricardo Abel, et al., (2020). Bioremediation of soils contaminated with hydrocarbons based on bacteria used as bioproducts., *Revista Lasallista de Investigacion*, Vol. 17, págs. 177-187.
6. Patel, Anil Kumar, et al. (2022). Organic wastes bioremediation and its changing prospects, *Science of The Total Environment*, Vol.824(2):153889.
7. Dangi, Arun Kumar, et al., (2019). Bioremediation through microbes: systems biology and metabolic engineering approach, *Critical Reviews in Biotechnology*, Vol. 39, págs. 79-98.
8. Ojewumi, Modupe Elizabeth, et al. (2018). Bioremediation: Data on *Pseudomonas aeruginosa* effects on the bioremediation of crude oil polluted soil., *Data in brief*, Vol. 19, págs. 101-113.
9. Quintella, Cristina M. , Mata, Ana M.T. y Lima, Leandro C.P. (2019). Overview of bioremediation with technology assessment and emphasis on fungal bioremediation of oil contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, Vol. 241, págs. 156-166.
10. Hernández-Ruiz, Gina María, Álvarez-Orozco, Natalia Andrea y Ríos-Osorio, Leonardo Alberto. (2017). Bioremediation of organophosphates by fungi and bacteria in agricultural soils. A systematic review., *Corpoica Ciencia y Tecnologia Agropecuaria*, Vol. 18, págs. 139-159.

11. Xia, Shaopan, et al. (2019). A critical review on bioremediation technologies for Cr(VI)-contaminated soils and wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 49, pág 252.
12. Brutti, L., Beltrán, M. y García, (2018). *Biorremediación de los Recursos Naturales*. Buenos Aires : INTA Ediciones.
13. Barba, Silvia Piedrabuena. (2018). *Electro-biorremediación de suelos contaminados con pesticida*. España : Universidad de Castilla La Mancha.
14. Islas & Peralta. S., (2016). *Biorremediación por bioestimulación y bioaumentación con microorganismos nativos de un suelo agrícola contaminado con hidrocarburos*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados.
15. Carretero, F., et al. (2016). Bioestimulación de cultivos mediante *Trichoderma Saturnisporum*. 246, *Terralia : Hortícolas Transferencia tecnológica*.
16. Carvajal, P., (2012). Comparación entre bioestimulación y bioaumentación para la recuperación de suelos contaminados con diesel. *Rev. P+L*, Vol. 7,pág 1.
17. Morales, S., Hernandez, S., (2018). Estado actual de la investigación sobre plaguicidas en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.
18. Rodríguez & Zárate. s.l. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. : *Revista de Ciencias Ambientales*, Vol. 56, pág 1.
19. Mogollón, J. (2014). Efecto del uso del vermicompost para la biorremediación de suelos salinosódicos del estado Falcón, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, 2014, Vol. 28, pág 108.
20. Garzón & Gómez. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible.
21. Vélez. (2020). Evaluación de bacterias y hongos potencialmente utilizables para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos.
22. Martinez, Luis Manchego. (2018). Evaluación del estado de conservación de suelos contaminados por la relavera El Madrigal-Arequipa y propuesta de fitorremediación. Arequipa : Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

23. Lizana, Jean Carrasco. (2019). Aplicación de carbón activado de cáscara de “coco” y cascarilla de “arroz” para la biorremediación de suelos contaminados por gasolina, distrito y provincia de Moyobamba. Moyobamba : Universidad Nacional de San Martín.
24. Ramirez, K. y Yarleque, V. (2021). Técnicas de biorremediación y su aplicación en suelos contaminados con hidrocarburos. Trujillo : Universidad Privada del Norte.
25. Lozano & López. (2022). Aislamiento y caracterización de bacterias endémicas colombianas con capacidad de degradar tolueno.
26. Montoya, M., Serna, K. y Pinilla, L. (2022). Aislamiento y caracterización de hongos filamentosos a partir de muestras de madera y suelo de “La Lorena”, Sonsón, Antioquia (Colombia), reserva natural. Colombia : Universidad de Antioquia.
27. Pérez. (2020). Comportamiento de factores abióticos en la biorremediación de residuos petrolizados mediante biopilas a escala semi-piloto.
28. Vizúete & Pascual. s.l. (2019). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos. : Revista Lasallista de Investigación.
29. Luján, Daniel. (2019). Uso de Pseudomonas aeruginosa en biorremediación.
30. Quintero & Sandoval. Colombia : Acta Agron., (2016). Evaluación del efecto de la bioestimulación sobre la biorremediación de hidrocarburos en suelos contaminados con alquitrán en Soacha, Cundinamarca.
31. Cando, M. (2011). Determinación y análisis de un proceso de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Cuenca : Universidad Politécnica Salesiana,.
32. Acuña & Pucci, (2020). Caracterización de un proceso de biorremediación de hidrocarburos en deficiencia de nitrógeno en un suelo de Patagonia Argentina. Centro de Estudios e Investigación en Microbiología Aplicada. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Ciudad Universitaria. Comodoro.
33. Lizcano & Cortes. (2020). Análisis teórico de las técnicas mixtas de nano-biorremediación en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados.
34. Guerrero, Vásquez & s.l. (2010). Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados. Revista Colombiana de Biotecnología.

35. Pérez, Martínez. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Rev. Int. Contam. Ambient.*
36. Peña, Rodríguez, (2017). Biorremediación de arsénico mediada por microorganismos.. Mexico : Terra Latinoamericana.
37. Pinzón & Fajardo. (2018). Impacto del mercurio en los ecosistemas colombianos y las técnicas aplicables para su biorremediación.
38. Rosero & Rentería, (2019). Estudios sobre la biorremediación en Colombia. Vol. 10. p. 1 - 2.
39. Cayotopa & Arévalo, (2021). Nuevos agentes de biorremediación de cadmio: Especies de *Trichoderma* nativas de la rizósfera de árboles de cacao. Trujillo : Scientia Agropecuaria, Vol. 12, pág 2.
40. Figueroa, Franklin. (2020). Biorremediación de suelos contaminados con aceite residual automotriz mediante la aplicación del producto DECON.
41. Villena, Jorge Vergara. (2019). Efecto de la aplicación de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales en el proceso de biorremediación de un suelo contaminado por combustible diésel. Lima : Universidad Científica del sur.
42. Rivera & Andrade. (2018). Bioestimulación y biorremediación de recortes de perforación contaminados con hidrocarburos. México : *Rev. Int. Contam. Ambient*, Vol. 34. pág 249 - 262.
43. Fabelo, José Falcón. (2018). Propuesta de metodología para la recuperación de suelos contaminados. Cuba : *cen. az.*, Vol. 44, pág 1.
44. Berrios, Katia Morón. (2022). Biorremediación de suelos contaminados con gasolina de 95 octanos utilizando estiércol caprino. Lima : Universidad Científica del Sur.
45. Carvajal, Derlin Martinez. (2020) Evaluación de los procedimientos de biorremediación para el tratamiento de fluidos aceitosos (borras) en la industria de hidrocarburos del bloque Llanos 34 ubicado en el Municipio de Villanueva. Colombia : Universidad Nacional de Colombia.

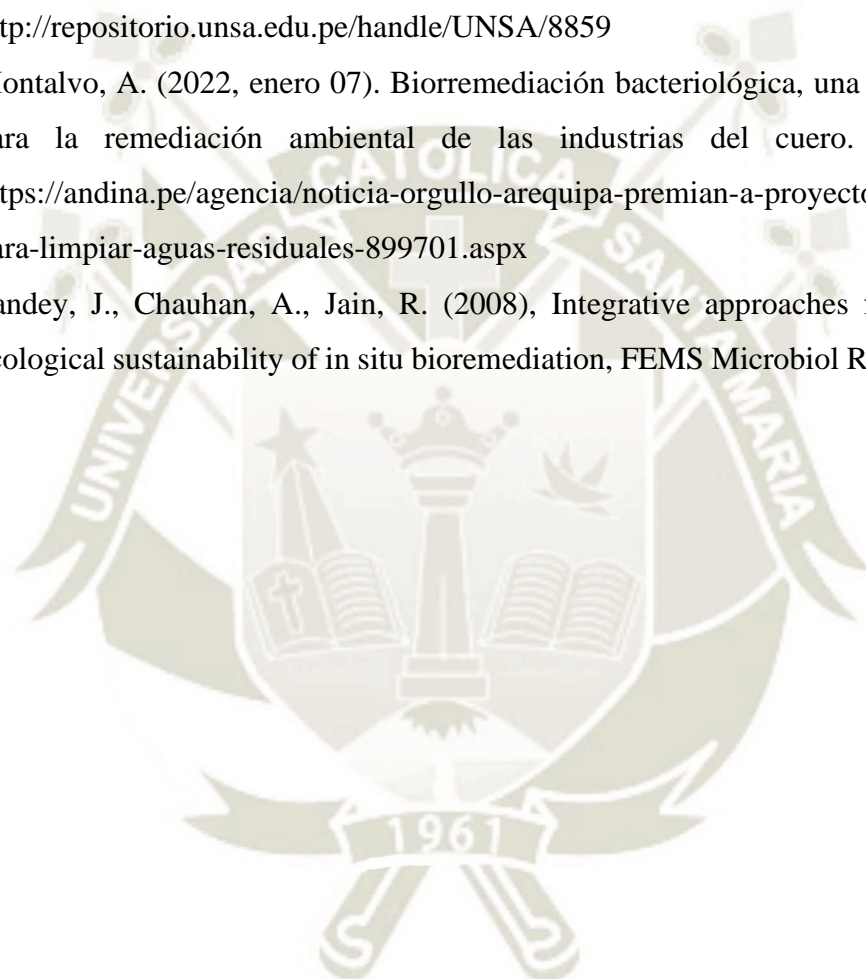
46. Trejos, Maria Delgado. (2017). Evaluación de un proceso de biorremediación aplicado a un suelo contaminado con petróleo crudo.
47. Terrones, E., et al. (2018). Influencia del tiempo de tratamiento de biorremediación con pseudomonas, sobre el porcentaje de remoción de hidrocarburo, en un suelo contaminado. Cajamarca : Universidad Privada del Norte.
48. Figueroa, Ray Pacheco. (2020). Evaluación de la eficacia de un consorcio bacteriano para la biorremediación de suelos contaminados por aceites dieléctricos. Guayaquil : Universidad de Guayaquil.
49. Martínez & Ruberto. (2020). Gestión y biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Antártida., Vol. 7.
50. Mosquera, Tatiana. (2017). Eficiencia de Lombricompostaje en la Biorremediación de suelos degradados por la minería a cielo abierto en el Municipio de Unión Panamericana, departamento del Chocó.
51. Simanca, Paola. (2017). Evaluación del desempeño de la biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos mediante el método de landfarming en la planta de tratamiento del Municipio de Aguachica.
52. Nobili, Sofía. (2022). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando materiales orgánicos locales y lombrices de tierra.
53. Silvana & Agustín. (2017). Biodegradación aerobia de fracciones de hidrocarburos provenientes de la actividad petrolera en un suelo de la región patagonia norte. Argentina : Rev. Int. Contam. Ambient, Vol. 33.
54. López & Lozano. (2018). Aislamiento y caracterización de bacterias endémicas colombianas con capacidad de degradar tolueno. Rev. colomb. biotecnol, Vol. 24.
55. Patiño & Robles., (2017). Biodegradación de petróleo por Bacillus thuringiensis como alternativa para la recuperación de suelos agrícolas. Arnaldoa, Vol. 28
56. Chao, Romero (2020). Evaluación eco-toxicológica del manejo de residuos contaminados con diésel. Cen. az. Vol. 47.
57. Biodegradation of Chlorothalonil Fungicide in Coastal Areas of the Colombian Caribbean Suitable for Banana Crops. Tecciencia, 2018, Vol. 13.

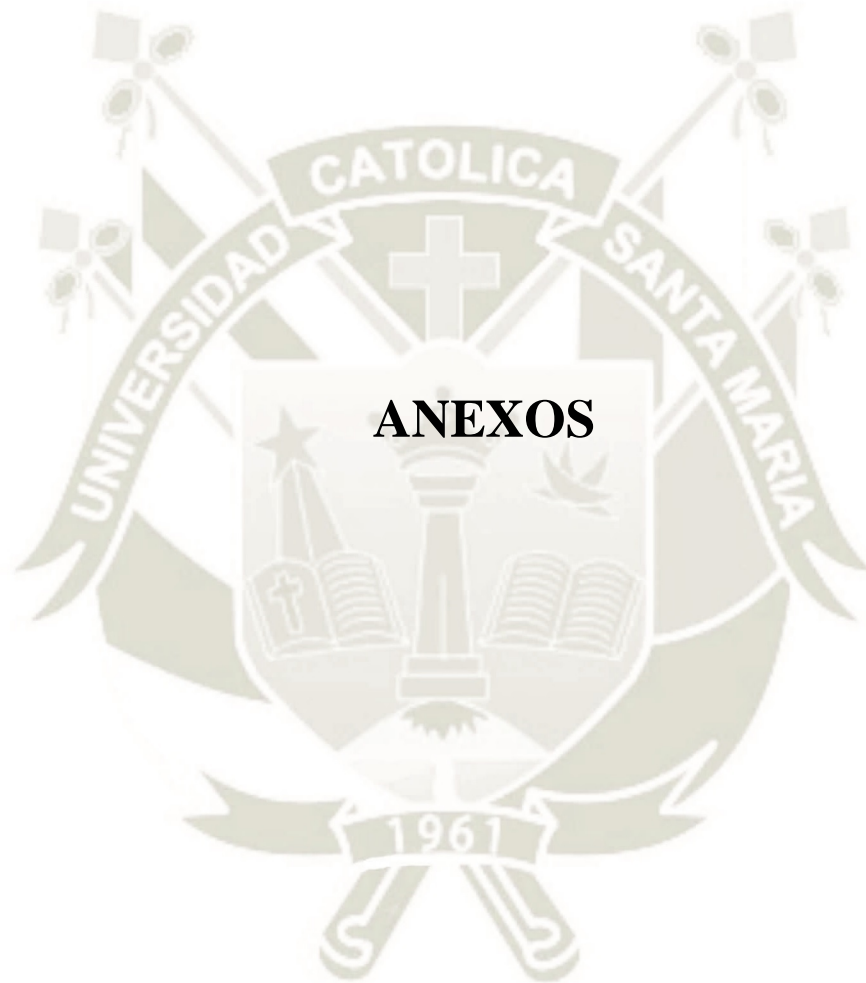
58. Bautista, Betancourt & Vega, Ugaz (2020). Biosurfactants in the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils.
59. Vila & Urbizu. (2014). Técnicas de biorremediación para el saneamiento del subsuelo.
60. Trujillo & Ramírez, (2012). Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia.
61. Núñez & Paredes, (2014). Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia.
62. Pesántez, Marcia & Castro, Rosa. (2016). Potencial de cepas de *Trichoderma* spp. para la biorremediación de suelos contaminados con petróleo.
63. Vásquez, Claudia. (2017). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburo utilizando bacterias Antárticas sicrotolerantes.
64. Ortiz, E. (2017). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos.
65. Arrieta & Rivera. (2012). Biorremediación de un suelo con diesel.
66. Quispe, D. (2021). Revisión bibliográfica del uso de hongos para la biorremediación de suelos contaminados por metales pesados. Lima : Universidad César Vallejo.
67. Mendoza & Torres. (2020). Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *TecnoLógicas*, Vol. 24.
68. Aparicio, J. D. (2018). Biorremediación de suelos contaminados con Cr (VI) y lindano por actinobacterias.
69. Rosado & González. (2021). Identificación de microorganismos aislados de suelos agrícolas con capacidad de tolerar 2,4-D y malatión. *TIP*, Vol. 23.
70. De la Rosa & Sánchez. (2014). Biosurfactantes y su papel en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas.
71. Ponz, S. (2010). Biorremediación de pendimetalina en ensayos de microcosmos controlados. 10 Congreso Nacional del Medio Ambiente.

72. Pérez & Silva. (2016). Evaluación de biocombustibles e hidrocarburos del petróleo (gasolina y diesel) en un suelo: proceso de transporte y biorremediación. Colombia: Rev.EIA.Esc.Ing.Antioq.
73. Lizana, Carrasco J. A. (2020). Aplicación de carbón activado de cáscara de “coco” y cascarilla de “arroz” para la biorremediación de suelos contaminados por gasolina, distrito y provincia de Moyobamba.
74. Chimarro, Jhony Imbaquingo. (2021). Evaluación del impacto ambiental en el suelo causado por pesticidas aplicados en cultivos transitorios en la Parroquia Pimampiro-Imbabura.
75. Velarde, L. (2017). Aislamiento e identificación de potenciales rizobacterias promotoras del crecimiento en plantas de una especie vegetal nativa promisorias del distrito de Yarabamba. Arequipa : Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
76. Castillo , Bessy, et al. 10, (2020). Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete (Perú). Espacios, Vol. 41, pág. 11.
77. Jerez, C.A. (2019). Metal extraction and biomining. Santiago : Encyclopedia of Microbiology, págs. 39 - 52.
78. Interiano-López, M.L, et al. (2019). Bioremediation methods assisted with humic acid for the treatment of oil-contaminated drill cuttings. Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 18, págs. 929 - 937.
79. Wang, Qing, et al. (2022). Thermally enhanced bioremediation: A review of the fundamentals and applications in soil and groundwater remediation. Journal of Hazardous Materials, Vol. 433.
80. Organización de las Naciones Unidas. Naciones Unidas. [En línea] 2015. [Citado el: 04 de abril de 2022.] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>.
81. Alarcón (2020). Comportamiento de factores abióticos en la biorremediación de residuos petrolizados mediante biopilas a escala semi-piloto.
82. Vizuete, Pascual & Taco. (2020). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos.

83. Montenegro, S., Yamile, S. y Calderón, L. (2019). Prácticas de biorremediación en suelos y aguas. Bogotá : Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
84. Vásquez, Y. y Escobar, M. (2020). Reactores Bioquímicos Pasivos: Una alternativa biotecnológica para la remediación de drenajes ácidos de mina. Colombia : Revista Colombiana Biotecnológica, Vol. 22.
85. Paredes, K. Fitoestabilización de metales pesados en sedimentos costeros asistida por bacterias rizosféricas. Sevilla : Universidad de Sevilla, 2017.
86. Rodríguez, J. Mitigación y biorremediación de suelos contaminados por el derrame de combustible diésel 2 en la Quebrada del Toro en Camaná, 2009.
87. Riojas González, H. H., Torres Bustillos, L. G., Mondaca Fernández, I., Balderas Cortes, J. J., & Gortáres Moroyoqui, P. (Fecha). Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Revista Química Viva, Número 3, año 9, diciembre 2010.
88. Ponce Contreras, D. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, Concepción Chile, Universidad del Bio - Bio, enero 2014.
89. Covarrubias, S., García, J. y Peña, J., (2015), El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados, Acta Universitaria Multidisciplinary Scientific Journal, Vol. 25, p. 40-44.
90. García, C., Moreno, J. (2002), Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo, Ciencia y Medio Ambiente CCMA - CSIC, p. 126-135.
91. Kaake, R., Roberts, D., Crawford, D. (1992), Bioremediation of Soils with the Herbicide 2-sec-Butyl-4,6-Dinitrophenol (Dinoseb), Applied and Environmental Microbiology, Vol. 58, No. 5, p. 1683-1689.
92. Garzón, J., Rodríguez-Miranda, J., Hernández, C. (2017), "Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible", Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Recuperado de <http://dx.doi.org/10.22267/rus.171902.93>
93. Azubiuke, C., Chikere, C., Okpokwasili, G. (2016), Bioremediation techniques - classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects, World Journal of Microbiology and Biotechnology, Vol 32:180, p. 1-18
94. Sharma, J. (2019), Advantages and Limitations of in situ Methods of Bioremediation, Recent Advances in Biology and Medicine, Vol. 5, p. 9.

95. Tran, NH, Urase, T, Ngo, HH, Hu, J, Ong, SL. (2013), Insight into metabolic and cometabolic activities of autotrophic and heterotrophic microorganisms in the biodegradation of emerging trace organic contaminants. *Bioresour Technol*, Vol 146:721, p.31.
96. Zevallos, M., (2019), "Biorremediación de efluentes de curtiembre del parque industrial Río Seco, Arequipa, utilizando microalgas *Acutodesmus dimorphus* y *Arthrospira platensis*", Tesis de Maestría, Universidad Nacional de San Agustín, recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8859>
97. Montalvo, A. (2022, enero 07). Biorremediación bacteriológica, una tecnología eficaz para la remediación ambiental de las industrias del cuero. Recuperado de <https://andina.pe/agencia/noticia-orgullo-arequipa-premian-a-proyecto-usa-bacterias-para-limpiar-aguas-residuales-899701.aspx>
98. Pandey, J., Chauhan, A., Jain, R. (2008), Integrative approaches for assessing the ecological sustainability of in situ bioremediation, *FEMS Microbiol Rev* 33 p. 324–375





ARTÍCULOS CIENTÍFICOS REVISADOS Y ANALIZADOS

N°	AUTOR	METODOLOGIA	INSTRUMENTO	RESULTADOS
1	Hernández (17)	En este estudio analizo la concentración de agroquímicos en el suelo agrícola siendo el utilizado el clorpirifos, se muestreo 1kg de suelo donde crecen las hortalizas, se preparó la cepa en caldo nutritivo, se preparó la solución para la bioestimulación con el ajuste de los micro y macroelementos del suelo para que puedan propagar al bioaumentar la población durante 3 semanas. Se analizo por cromatografía de gases para su determinación de clorpirifos.	Pruebas experimentales para la caracterización del suelo	Se obtuvo de los aislamientos microbianos, la selección de 10 colonias, donde se realizó una caracterización macroscópica, también se hizo un segundo repique para purificar y preservar los microorganismos. La caracterización permitió identificar bacterias gram + y gram -, en el análisis taxonómico se determinó hongos y levaduras. Para el análisis de las muestras de clorpirifos se tomó 2g de suelo con 15ml de una mezcla de 1:1 de hexano: acetona, se agito por 12 horas a 240rpm, donde la degradación con microorganismos es muy baja indicando que el proceso de bioaumentación no es eficiente
2	Rodríguez (18)	La metodología de la presente investigación se basó en la búsqueda motores como Medline, Current Contents, PubMed, Google Scholar, Scopus y revistas especializadas	Lista de cotejo para el material acopiado	Los impactos al ambiente por hidrocarburos y sus riesgos a la salud (dolor de cabeza, irritación de la piel, etc), la biorremediación de hidrocarburos en el suelo se lleva de forma in situ (por atenuación natural, se degrada de forma natural) y ex situ (tratar el suelo fuera

				<p>del lugar, donde se le oxigena facilitando su degradación).</p> <p>El metabolismo de los microorganismos consiste en degradar los hidrocarburos (HAPs) en compuestos solubles como CO₂, O₂, H₂O también llamada biodegradación aeróbica.</p> <p>Los compuestos aromáticos son resistentes a la oxidación ya que presenta una estructura estable, sin embargo, existe enzimas como la peroxidasa y oxidasa que favorece la oxidación de derivados de petróleo</p>
3	Mogollón (19)	<p>En la investigación se evaluó la viabilidad del tratamiento, así como las condiciones de biotratabilidad; también se evaluó el diseño como los factores que afecta la eficiencia y se realizó el control y seguimiento.</p> <p>Primero se cuantificaron los contaminantes como la concentración de suelos y aguas subterráneas, luego se</p>	<p>El instrumento de la investigación fue la búsqueda de información</p>	<p>En los resultados mostraron que el paso fundamental para el biotratamiento del suelo es la caracterización de los contaminantes analizando las características y sus propiedades del suelo como el pH, humedad y granulometría, luego se realizó las medidas biocorrectivas como el uso de levaduras, hongos, bacterias) para poder descomponer los contaminantes a menos tóxicos para el ambiente, donde se evaluó la viabilidad del tratamiento y del diseño, así como su</p>

		designó las medidas biocorrectivas eligiéndose el biotratamiento adecuado.		control y seguimiento (control de las condiciones de degradación y biodegradabilidad).
4	Garzón (20)	En la metodología se realizó un estudio descriptivo de revisión sobre las posibilidades y limitaciones del tratamiento, donde se identificaron los problemas descontaminación de la biorremediación y sus aplicaciones, como también sus ventajas y desventajas de la biorremediación. Se reviso y analizo el aporte al desarrollo sostenible por la biorremediación.	El instrumento de la investigación fue la búsqueda de información	En los resultados se definió el desarrollo sostenible y su relación con la gestión ambiental donde la sostenibilidad implica el beneficio económico, social y ambiental del desarrollo de productos y servicios, por ello las acciones de gestión ambiental debe tener las exigencias sociales y económicamente viable. El tratamiento por lodos activados para aguas residuales fue una aplicación de biorremediación para el control de la contaminación, donde la biorremediación a contribuido en reducir las emisiones de compuestos tóxicos bajos en Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), algunas desventajas como en el caso de compuestos clorados y con metales pesados no son rápidos de degradar de forma biológica o estabilizados.
5	Vélez (21)	En la metodología se realizó la matriz Aspecto-Impacto que determino impactos por hidrocarburos permitiendo	Pruebas experimentales, registro de toma de	El resultado de la caracterización de impactos de los aspectos negativos mostrando un rango de moderada, crítica y severa, por lo que requiere su prevención,

		<p>valor los impactos de manera cuantitativa donde se cuantifico el daño de la exploración, perforación e incluso transporte.</p> <p>Luego se buscó los microorganismos como bacterias y hongos para la biorremediación de suelos, se calculó la frecuencia con que se utilizan los microorganismos como bacterias y hongos para la biorremediación de suelos.</p>	datos de los impactos	<p>control y remediación del hidrocarburo presente en el suelo de la amazonia. Se identificaron 50 géneros y 86 especies de bacterias capaces de degradar el hidrocarburo presente como la <i>Bacillus</i> entre 65 a 91% de remoción, <i>Geobacillus</i>, <i>Gordonia</i> degradadoras de hidrocarburos aromáticos policiclicos</p>
6	Martinez (22)	<p>La metodología consistió en delimitar la zona de estudio en el depósito de relaves de la mina El Madrigal, donde se designaron 4 zonas de muestreo, recolectando suelo a una superficie de 30cm etiquetando la muestra posterior a ello se homogenizo empleando el método de cuarteo para la determinación de la muestra.</p>	Pruebas experimentales, cadena de custodia	<p>Los resultados mostraron que en las zonas muestreadas presentaron una concentración de 307.14 mg/kg sobrepasando el Estandar de Calidad Ambiental de 140mg/kg, dichas especies presentes en el lugar concentraron en sus raíces, tallo y hojas 42.9mg/kg.</p>

		Se llevo a analizar la muestra por el laboratorio de ensayo y su control de la calidad.		
7	Lizana (23)	La metodología consistió en el muestreo de suelo del peaje Moyobamba, el cual se le contamina con 10 litros de gasolina luego se la homogeniza, dividiéndolo por el método de cuarteo obteniendo una muestra representativa de 100 g recogidos en un envase de 40 ml, se trataron 5 muestras de 8.5kg cada una. Se utilizó <i>Hellanthus annuus</i> (girasol) cada 5 días se midió su altura y el peso foliar de la planta durante 70 días.	Su instrumento fue la ficha de muestreo o cadena de custodia, ficha de recolección de datos	La caracterización del suelo llegó a obtener 127 mg/kg de hidrocarburos se realizó el tratamiento de biorremediación durante 70 días y cada 5 días se realizaron mediciones de la concentración de hidrocarburos, después del tratamiento se redujo su concentración a 5mg de hidrocarburos en el suelo para el T1 (Girasol + Suelo contaminado), 0.3 mg para el T2 (Girasol + Carbón activado de cascara de <i>Cocos nucifera L.</i>), 0.7 mg para el T3 (Girasol + Carbón activado de cascara de <i>Cocos nucifera L.</i> “coco”+ Cascarilla de <i>Oryza sativa</i> “arroz”), y 0.9 para el T4 (Girasol + Cascarilla de <i>Oryza sativa L.</i> “arroz”). Su porcentaje de remoción para T1 fue 95.90%, T2 fue 99.59%, T3 fue 99.40% y T4 fue 99.48%.
8	Ramirez (24)	La metodología consistió recolectar documentos experimentales de biorremediación llegando a tener las	El instrumento fue la matriz de autores para	Se realizó 4 tablas de comparación una de ellas es la de los porcentajes de remoción de aplicación de lodos con bioestimulación en suelos con hidrocarburos. El

		investigaciones no mayores de 15 años de antigüedad.	evidenciar la base de datos como resultados y porcentajes de remoción del contaminante.	tratamiento de eficaz fue el de lodos residuales (biosólidos) con 93% de remoción durante 4 meses, para la remoción de hidrocarburos fue de 49.9%.
9	Lozano (25)	La metodología consistió en preparación de medios de cultivo usando como fuente de carbono al tolueno, el crecimiento de las bacterias fue en placa Petri, las muestras de suelo se obtuvieron del Valle del Cauca en Colombia con 15g de muestra por cada lugar. Las muestras fueron inoculadas por 8 días después de colocaron 4g de muestra de suelo.	Pruebas experimentales para el análisis del contaminante	Se procedió a aislar 35 cepas en cada lugar donde se muestreo, donde se eligió de 9 a 10 colonias de muestras de gasolinera, derrame accidental y taller mecánico. Las <i>Pseudomonas</i> es un género con mayor adaptación genética para metabolizar el tolueno, las bacterias como <i>Stenotrophomonas sp.</i> pueden crecer en un medio de sal mineral, a la vez degrada fenol, cloroformo y tricloroetileno.
10	Montoya (26)	Se procedió a recolectar y aislar los hongos de la reserva natural “La Lorena” en Colombia, se incubaron durante una	Pruebas experimentales	Se aisló las colonias 13 hongos filamentosos y 1 levadura, donde se encontró <i>Trichoderma sp.</i> , <i>Penicillium sp.</i> , <i>Mucor sp.</i> , <i>Aspergillus sp.</i> y

		semana a 30°C en cuatro diferentes medios.		<i>Lecythophora sp.</i> , consideradas capaces de ser implementadas en diferentes industrias.
11	Pérez (27)	Se procedió a hacer el monitoreo y control de factores abióticos, durante 365 días se realizó la biodegradación de aceites y grasas y hidrocarburos, siendo contaminado con 26230.4 mg/kg de grasas y aceites y 10626.8 mg/kg de hidrocarburos, el suelo estuvo mezclado con texturizante (pulpa de café, estiércol vacuno, cachaza, <i>Thalassia testudinum</i> y bagazo), se monitoreo la temperatura, humedad relativa media, Ph.	Pruebas experimentales	Los resultados mostraron que el Ph estuvo dentro de un rango de 6 a 8, para la humedad estuvo en 7% para el tratamiento de la pulpa de café y llegando a 34% para el tratamiento con bagazo, llego la temperatura a 25°C y 35°C.
12	Vizuite (28)	Se aislaron 81 bacterias de suelos contaminados con petróleo, agrupándose de acuerdo a su coloración y la forma de sus colonias. La caracterización de la muestra de hidrocarburos fue 31000 ppm para suelos arcillosos, mientras para suelo arenoso fue 46000ppm.	El instrumento de la investigación fue la ficha para el conteo de microorganismos	Se obtuvieron 69 bacterias bacilos, 2 bacterias cocos, dentro de ellas 5 bacterias son Gram "+", 66 Gram "-", creciendo a Ph en rangos de 4.5, 3.5, 8.5 y 9.5. Las bacterias bacilos Gram "-", sin capsula se encuentran presentes en todos los niveles de hidrocarburos

13	Luján (29)	Se realizó la revisión de investigaciones sobre el microorganismo del suelo <i>Pseudomonas aeruginosa</i> con capacidad desintoxicante de contaminantes orgánicos e inorgánicos, en la limpieza del petróleo se ha demostrado que es un método rentable, ecológico, el cual convierte el hidrocarburo en compuestos no tóxicos como en CO ₂ y H ₂ O.	Ficha de recolección de datos extrayendo datos de cada autor	Las bacterias <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ha demostrado tener eficiencia de degradar el hidrocarburo hasta el 60% usando C20 como sustrato, removiendo un 90% para C10, y llegando a 69% para C20. La biorremediación de suelo salino con petróleo crudo disminuye al contaminante hasta 30% que con suelo no tratado.
14	Islas (14)	Se realizó la biorremediación de suelo con 30g, el cual consistió en 6 tratamientos evaluándose en proporciones de nutrientes (C: N: P) de 100:10:1 con nitrógeno y fósforo, hierro y magnesio. Los microorganismos usados fueron <i>Bacillus sp</i> y <i>Meyerozina sp</i> .	Pruebas experimentales y fichas para el conteo de microorganismos	El tratamiento de suelo con <i>Bacillus sp</i> tuvo una remoción de 14 a 93%, para el microorganismo <i>Meyerozina sp</i> . removió de 12 a 78%, para los días 10 y 20 días presentó baja remoción, aumentando para el día 30 del tratamiento.
15	Quintero (30)	Se evaluó la bioestimulación en la biorremediación en suelos contaminados con alquitrán teniendo 12000 mg/kg	Pruebas experimentales y	Disminuyó la concentración de alquitrán cuando se aplicó nutrientes de NPK en un periodo de 1 a 3 meses, el cual presentó un porcentaje de remoción de 21.4-

		mostrando ocho microorganismos mesocosmos durante un periodo de 60 días se analizó la temperatura, ph, porcentaje de humedad, carbono orgánico, nutrientes	ficha de conteo de microorganismos	53% por la presencia de microorganismos nativos, la adición de nutrientes C:N:P fue 100:10:1 durante 60 días
16		Se tomaron muestras de suelo y lodo con crudo residual con microorganismos nativos ubicado en los alrededores de la laguna formada por hidrocarburos de la central termoeléctrica el Descanso, se procedió a hacer la siembra, aislamiento de los microorganismos, el microorganismo a tratar es <i>Streptomyces spp.</i>	Pruebas experimentales y ficha de conteo de microorganismos	Se identifico los microorganismos como <i>Streptomyces Spp.</i> , se procede a sembrar en soluciones, el cual se le añadió al lodo con crudo residual, donde se realizó análisis de hidrocarburos totales de petróleo y metales como bario, cadmio y plomo, Mostro los resultados para hidrocarburos alifáticos que logro remover 99.79% de fenantreno, naftaleno fue 99.02%, fluoranteno fue 97.76% durante 30 días.
17	Acuña (32)	Se extrajo muestra de suelo proveniente de landfarming a una profundidad de 10 y 30cm con una cantidad de 40g, donde se analizó los hidrocarburos totales (HT)	Ficha de conteo de microorganismos	Los resultados de la biorremediación mostro que para la relación de C:N de 100:13 el suelo con hidrocarburo presento una remoción de 62% con bacterias del género <i>Pseudomonas</i> que tiene la capacidad de biodegradar hidrocarburos.

18	Lizcano (33)	Se realizo la remediación de suelos empleando microorganismos como hongos y bacterias para tratar contaminantes como metales pesados, el tratamiento consistió en el uso de nanomateriales	Ficha de conteo de microorganismos	La técnica de nanopartículas de ácido salicílico aumenta la absorción de nutrientes en plantas como <i>Isatis cappadocica Desv</i> en suelos con arsénico, con la combinación de microorganismos para la biorremediación de suelos con metales redujo su toxicidad para el crecimiento bacteriano
19	Vásquez (34)	Se trato lodos contaminados con aceites lubricantes, donde se presentó microorganismos nativos como <i>Pseudomonas spp</i> , <i>Acinetobacter spp</i> , <i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Citrobacter spp</i> , <i>Bacillus brevis</i> , <i>Micrococcus spp</i> y <i>Nocardia spp</i> durante 40 días	Registro de conteo de microorganismos	La concentración inicial del hidrocarburo mostro 21 275 ppm, aplicando tratamientos a bacterias y hongos, para la bacteria se tuvo un porcentaje de remoción de 42%, mientras que para el tratamiento con hongos llego a remover 87 %, durante un tiempo de remoción para bacterias de 15 días y para el hongo de 40 días.
20	Martínez (35)	Se evaluó la biorremediación de suelos con presencia de hidrocarburos empleando lodos como biosólidos de una Planta de Tratamiento de agua residual (PTAR), el suelo será sometido a aireació, tuvo como relación de	Ficha de conteo de microorganismos y pruebas experimentales	Se reporto que para la caracterización del suelo contaminado fue 1752 mg/kg de hidrocarburo, el tratamiento con suelo a capacidad de campo removió 67% y para suelo a capacidad de campo más lodos mineralizados removió 66%, presento una conductividad eléctrica de 300 μ S/cm hasta los 75 días

		nutrientes C: N de 10:1, el tratamiento duro 2 y 14 meses.		
21	Rodríguez (36)	En dicha investigación se realizó una revisión sistemática de la biorremediación en suelos con arsénico (III) donde se encontró la técnica factible que solucione la problemática encontrada, basándose en la ingeniería genética para la biorremediación.	Ficha de recolección de datos detallando el autor, metodología y resultados	La técnica que se aplicó por la revisión sistemática en dicha investigación fue el uso de microorganismos para reducir la contaminación del suelo, se encontró cepas de <i>Corynebacterium glutamicum</i> que pueden acumular arsénico, demostrando que la remoción por medio de la ingeniería genética para la oxidación de arsénico es una alternativa para la biorremediación
22	Pinzón (37)	En dicha investigación se realizó la revisión sistemática del impacto del mercurio en los ecosistemas, donde se analizó las técnicas de biorremediación que se realizó para plantear la más eficiente.	Ficha de recolección de datos	En la investigación se evaluó los impactos del mercurio en el suelo producto de la explotación de la minería, las técnicas que se mostraron que la técnica de biorremediación por microorganismos como las bacterias, el lombricompostaje y la micorremediación son eficientes y amigables con el ambiente.
23	Rosero (38)	Dicha investigación realizó una revisión sistemática de estudios de biorremediación que fueron aplicados en procesos en Colombia por la contaminación de suelos.	Los instrumentos de la investigación fueron el registro de toma de datos, guía de muestreo	Los resultados de dicha investigación mostraron que de 1758 resultados se seleccionaron 60 artículos relevantes, donde los microorganismos más utilizados fueron las bacterias empleadas para la bioestimulación y bioaumentación, las investigaciones estuvieron más

			de suelos, ficha de recolección de datos, cadena de custodia.	enfocadas en la recuperación con suelos con hidrocarburos
24	Cayotopa (39)	Se realizó la absorción de cadmio de la industria chocolatera por la planta de cacao y con microorganismos como <i>Trichoderma spp</i> que fueron estudiadas en condiciones in vitro en laboratorio.	Guía de muestreo de suelos, pruebas experimentales	En la investigación se preparó las concentraciones de cadmio con 25 ppm, 100 ppm y 250 ppm a partir de la concentración inicial de 5000ppm, analizo la tolerancia de cadmio con los microorganismos nativos como la <i>Trichoderma</i> , resultando para <i>T. harzianum</i> 67% de remoción, <i>T. spirale</i> 65.8% y <i>T. brevicompactum</i> fue 83.1%.
25	Figueroa (40)	En dicha investigación se realizó el tratamiento con la técnica de biorremediación en suelos contaminados con aceite residual automotriz, con la finalidad que se determinó la concentración donde existe la mejor remoción en un periodo de 30 días.	Guía de muestreo de suelos, pruebas experimentales	En la investigación se determinó tres concentraciones de 6500ppm, 10000ppm y 20000ppm que fueron usadas en el tratamiento, donde se evaluó el porcentaje de remoción de hidrocarburos totales del suelo, presento 46.94% para el tratamiento de 20000ppm, en los demás tratamientos sobrepasa los límites máximos permisibles. Se evaluó la fitotoxicidad del suelo con las semillas de <i>Lactuca sativa</i> como indicador de toxicidad

26	Villena (41)	Se realizo el tratamiento por la biorremediación de suelos contaminados con diésel y lodos de Plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas (PTARD), donde se realizaron dos tratamientos y un control, 0%, 25%, 50% con 3 repeticiones.	Registro de toma de datos, pruebas experimentales	Los resultados mostraron como concentración inicial una concentración de 10 000 mg/kg de diésel, el tratamiento del suelo con diésel con microorganismos duro 12 semanas, cuya cantidad de suelo tratado fue 4.5 kg. Se mostro como porcentaje de remediación fue 87% para el tratamiento con 25% y para el tratamiento con 50% de diésel fue 79% para la semana 6.
27	Rivera (42)	En dicha investigación se realizó ensayos con suelo mezclado de las zonas centro y norte del estado de Tamaulipas con presencia de hidrocarburos, estas se colocaron en celdas de remediación con nutrientes de nitrógeno y fosforo donde se evaluó la bioestimulación de los microorganismos y la biorremediación	Pruebas experimentales	Los resultados se mostro que las celdas fueron incubadas durante 13 meses con una concentración inicial de 2700 mg/kg de hidrocarburo, donde se agrego nutrientes de N, P, humedad y aireación de los microorganismos, en el que aumento la descomposición de hidrocarburos impregnados e indujo a la biorremediaión, es así que también se puede aplicar a gran escala en suelos contaminados por la extracción de pozos petroleros.
28	Fabelo (43)	En dicha investigación se analizó la eficiencia y eficacia del tratamiento de suelos, donde se realizó la búsqueda de	Los instrumentos de la investigación fueron el registro de toma de datos,	En dicha investigación a partir de la selección de trabajos se realizo el análisis de la eficiencia, eficacia y economía del tratamiento que se aplicó en la remediación de suelos. Estudios mostraron que al tener

		investigaciones con contaminantes en relación al tipo de suelo	guía de muestreo de suelos, ficha de recolección de datos, cadena de custodia.	un tratamiento con existencia de flora bacteriana se puede remediar con eficacia el suelo contaminado con factibilidad técnica económica del proceso.
29	Berrios (44)	En la investigación se recolecto suelo con 2kg de capacidad posterior se le adiciono 78ml de gasolina de 95 octanos, además se le incorporo estiércol carriño con 5% y 20% en los tratamientos, donde se controló la aireación cada 3 días.	Pruebas experimentales	Los resultados mostraron que el suelo contaminado con hidrocarburo y aplicando nutrientes como N, F, P con diferentes porcentajes para 20% removi6 97%, para el tratamiento con 5% fue 91%. Menciona también que al aplicar estiércol caprino se comporta como un reductor de la gasolina de 95 octanos.
30	Carvajal (45)	En la investigación se realizó la revisión del proceso de biorremediación para el tratamiento del suelo con hidrocarburos en Colombia, se analizó los resultados de investigaciones en el que no se requiere materiales estructurales o mecánicos para el tratamiento del suelo.	Los instrumentos de la investigación fueron el registro de toma de datos, guía de muestreo de suelos, ficha de recolección de datos, cadena de custodia.	Los resultados de las investigaciones presentaron que la concentraciones menores de 50 000 ppm, se le adiciono nutrientes de C:N:P fue de 100:10:1. Por las revisiones se estableció que la biorremediación de suelos con hidrocarburos es rentable, una técnica prometedora para tratamientos con exsitu ya que se ha demostrado que es capaz de degradar el contaminante.

31	Trejos (46)	En dicha investigación se realizó el muestreo del suelo contaminado, luego se realizó el pre-tratamiento de la muestra, su caracterización fisicoquímica, luego se aplicó el tratamiento con microorganismos en laboratorio, se realizó el montaje del reactor aerobio, al final se determinó la eficiencia del método aplicado	Pruebas experimentales	Los resultados mostraron, donde se redujo hasta 53% el hidrocarburo en 15 días, para 30 días de tratamiento se removi6 92%. Los microorganismos asilados de suelos fueron las especies de <i>Bacillus siamensis</i> , <i>bacillus aerius</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Brevundimona</i> , <i>Staphylococcus warneri</i>
32	Terrones (47)	En dicho estudio se evalu6 la influencia del tiempo en el tratamiento de biorremediaci6n con microorganismos <i>Pseudomonas</i> sobre la eficiencia de la t6cnica en la remoci6n de aceites en el suelo, se realiz6 en diferentes tiempos donde se determin6 el m6s 6ptimo.	Guía de muestreo y pruebas experimentales	Los resultados mostraron para un tiempo de 45 días de remoci6n en suelos contaminados con hidrocarburos fue el 6ptimo, los dem6s tiempos de tratamiento fueron 15, 30 y 45 días, donde se evalu6 el porcentaje de remoci6n llegando a 78.24% en el tiempo 6ptimo de 45 días se obtuvo un buen porcentaje de remoci6n
33	Figueroa (48)	En dicha investigación se evalu6 la actividad bacteriana en la t6cnica de biorremediaci6n de suelos con aceites dieléctricos, se tom6 la muestra de suelo	Pruebas experimentales	Los resultados mostraron que la concentraci6n inicial fue 83124.5 mg/kg de grasa y aceites en el suelo, el tratamiento 1 present6 una concentraci6n de 19717 mg/kg con un porcentaje de remoci6n de 76.14% y para

		<p>con 60kg de capacidad donde se le adiciono 5 L de aceite dieléctrico a cada tratamiento.</p> <p>El consorcio bacteriano estaba conformado por bacterias nitrificantes y acido lácticas, levaduras <i>Saccharomyces</i>, <i>Streptomyces</i> y <i>Estreptococos</i></p>		<p>el tratamiento 2 tuvo como concentración 19646.6 mg/kg con remoción de 76.23%, para ambos tratamientos fueron suelo 0.5m3 con 90 días, 5L de aceite dieléctrico y con presencia de consorcio bacteriano de 0.03L/kg</p>
34	Martínez (49)	<p>Se realizo la revisión de suelos contaminados en la Antártida con presencia de hidrocarburos, se adicionaron microorganismos en un diseño de ecopilas que permite una eficiencia de remoción mayor donde se colocó el volumen del suelo en la membrana impermeable donde se hacen orificios en la parte superior donde se colocó los tubos para la aireación.</p>	<p>Los instrumentos de la investigación fueron el registro de toma de datos, guía de muestreo de suelos, ficha de recolección de datos, cadena de custodia.</p>	<p>Se determino en la revisión de investigaciones que los suelos presentan concentraciones de 1000mg/Kg de petróleo, el diseño de la fitorremediación o microorganismos que degraden el contaminante depende del diseño de la ecopila el cual combina la bioestimulación y la fitorremediación por microorganismos.</p> <p>Se alcanzo en las revisiones para concentraciones de 2180 ppm, 6098 ppm y 3531 ppm se tuvieron como eficiencia 75.79%, 55.09% y 74.31% respectivamente.</p>
35	Barba (13)	<p>Dicha investigación se analizó la remediación de suelos contaminados con</p>	<p>Pruebas experimentales</p>	<p>Los resultados de la desorción del compuesto organoclorado como el oxifluorfen del suelo mejoraba</p>

		compuestos organoclorados como pesticidas con el tratamiento de electro-biorremediación considerando que se optimizo la reducción del contaminante organoclorado, donde se evaluó las variables como la adición de surfactante		al aplicarle el campo eléctrico de 1V/cm y de la adición de surfactante de 2.5 g/L, se realizo durante 2 semanas. Al aplicarle biobarreras disminuyo la intensidad de corriente y su flujo, así mismo reduce la eficacia de la remoción del bioestimulación pasando de 15 a 10%
36	Mosquera (50)	En dicha investigación se empleó como técnica la biorremediación, en el que se evaluo el lombricompostaje para suelos contaminados con mercurio de la minería, donde se analizó 4 tratamientos T1 con suelo contaminado con Hg al 100% más lombrices, T2 suelo contaminado al 50% con compost más lombrices, T3 compost contaminado al 100% más lombrices y T4 con compost más lombrices.	Pruebas experimentales	Los resultados mostraron que para el tratamiento 3 presento remoción del 65%, para T2 llego a remover 43% y para T1 removió 28%, así como también se analizó el ph, materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico. La población de lombrices fue afectada en el T1 aumento en 5% y los tratamientos T2, T3, T4 aumento a 50%
37	Simanca (51)	Se realizo en dicha investigación el tratamiento por biorremediaicón durante 45 días, donde se analizó la	Pruebas experimentales	En el tratamiento por landfarming se evidencio que los microorganismos se bioestiman por la presencia de

		concentración de grasas y aceites, hidrocarburos, temperatura, ph y la humedad por el método de landfarming		fertilizantes para poder crecer y tener el control de factores como humedad, temperatura y aireación. Los resultados mostraron que disminuyo de una concentración inicial de 6142ppm a 139ppm y en la cantidad de aceites y grasas fue inicialmente 25.11% llegando a 0.77%. La biorremediación de hidrocarburos fue de 66% con microorganismos, pero al adicionar el método de landfarming llego a 91% de remoción
38	Nobili (52)	Se preparo el suelo con compostaje, con una cantidad de suelo de 90kg y se contamina con diesel 720 g, se analizó las muestras en diferentes periodos 15, 30, 45 y 60 días, se realizaron cuatro tratamientos T1, T2, T3, T4	Pruebas experimentales	Los resultados mostraron que la concentración de hidrocarburos en el suelo disminuyo a 60.81% para T1, T2 se removi6 46.74%, T3 fue 45.2%. Para la supervivencia de los organismos como la especie <i>E. f6tida</i> fue mas resistente comparada con <i>A.morrisi</i> , como tambi6n mostraron alteraciones morfol6gicas y conductuales
39	Silvana (53)	En dicha investigaci6n se recolecto suelo de la actividad petrolera, las cuales se tomaron de profundidad de 0 y 30cm, se homogenizo y tamizo.	Pruebas experimentales	Los resultados mostraron que la concentraci6n inicial fue 941.1 mg/kg, donde participaron microorganismos heter6trofo aerobios totales $5 \cdot 10^5$ N° microorganismos /g de suelo, con microorganismos degradadores de

		Los microorganismos presentes fueron bacterias heterótrofas quienes degradan el petróleo, se realizó tratamientos con 5% de petróleo crudo para T1 y para T2 fue 5% de petróleo con 40g/kg de suelo.		hidrocarburos de 10N° microorganismos /g de suelo, en el tratamiento 1 removió 84% para el tratamiento 2 removió 82%
40	Lozano (54)	Se realizaron tres muestreos de suelo con presencia de hidrocarburos, bajo tres condiciones de gasolinera, derrame accidental y taller mecánico, se aislaron microorganismos capaces de crecer en tolueno	Pruebas de ensayo	Se encontró microorganismos como bacterias que fueron cultivadas en tolueno como <i>Pseudomonas</i> sp y <i>Stenotrophomonas</i> con la finalidad que metabolicen el tolueno, las cuales pueden utilizarse bajo un consorcio para tratamiento de remediación de suelos
42	Patiño (55)	Se realizó tratamientos con diferentes concentraciones de petróleo de 1.5, 3 y 4.5% con presencia de microorganismos como <i>Bacillus thuringiensis</i> , se evaluó la biodegradación cada 3 días por un periodo de 15 días de tratamiento.	Pruebas experimentales	Los resultados mostraron que la biomasa celular se incrementó a 24×10^6 UFC/ml, existiendo una relación entre el petróleo y la biomasa celular, por lo que se indicó que el tratamiento con estos microorganismos es una alternativa para remediar suelos agrícolas, se aplicó la bioaumentación y la bioestimulación.
43	Romero (56)	Se trataron suelos con, es así que se utilizaron semillas de lechuga como bioindicador, también utilizo lombrices	Pruebas experimentales	Los resultados mostraron que usaron como bioindicadores a las semillas de lechuga y la lombriz de tierra por su estabilización química-física, se analizó a

		por biorremediación eficiente con el producto mejorado y la bioaumentación.		concentraciones de 1, 5, 25 y 100%, el cual se ha calculado la concentración para así mejorar y aumentar la bioaumentación
44	Vásquez (39)	Se realizó una revisión sistemática de los suelos con presencia de drenaje ácido de mina (DAM), donde se analizaron procesos químicos como la adsorción, precipitación, coprecipitación utilizando reactores bioquímicos pasivos	Los instrumentos de la investigación fueron el registro de toma de datos, guía de muestreo de suelos, ficha de recolección de datos.	Según la revisión se analizó la eficiencia de los biorreactores pasivos en la reducción de sulfatos en la remediación y de sus factores que afectan, para un pH mayor a 7 se asegura una eficiente remoción de sulfatos, pero para pH menores de 5 se inhibe la remoción de sulfatos, un bajo pH puede afectar en la reducción del sulfato.
45	Betancourt (57)	En dicha investigación se analizó al clorotalonil, el cual es un fungicida utilizado para el control de enfermedades en el banano y el plátano, se determinó los microorganismos presentes en estos suelos bajo condiciones de atenuación natural y bioaumentación con los microorganismos nativos.	Ficha para el conteo de microorganismos	Se analizó la presencia de ocho microorganismos con presencia de Clorotalonil en suelos y su potencial de tolerar y degradar el compuesto, por el que la tasa de bioaumentación en el uso de bacterias nativas en suelos con plantas de banano aumentó, reduciendo la vida media de 6.2 a 2.5 días. Las bacterias aisladas fueron <i>Klebsiella sp.</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Enterobacter</i> , <i>Citrobacter</i> .

