



Universidad César Vallejo

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Bioremediación de Suelos Contaminados con Compuestos
Orgánicos: Fitorremediación y Vermiremediación. Revisión
sistemática 2022**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental**

AUTORAS:

Quillca Aldazabal, Yurissa Xionali (0000-0002-4590-4615)

Rojas Ariza, Yanet (0000-0001-6977-2285)

ASESORA:

Mg. Cabello Torres, Rita Jaqueline (0000-0002-9965-9678)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y gestión de los Recursos Naturales

LIMA– PERÚ

2022

Dedicatoria

Yanet Rojas Ariza

A mi madre Santusa, porque todo lo que soy se lo debo a ella y por inculcar en mi la importancia de estudiar. A mi hija Jhara Mishelle y hermanos Freddy, Ruth, Evelin y Pamela por el estímulo y el apoyo incondicional en todo momento, y por ser ellos la inspiración para finalizar este proyecto.

Yurissa Xionali Quilca Aldazabal

A mi madre Rosa Evangelina quien, con esfuerzo, amor, paciencia y el carácter que solo a ella la define contribuyo en este logro, a ella que es la motivación de ser mejor cada día.

A mis abuelos Domingo y Zoelinda, quienes siempre confiaron en mis aptitudes, y con mucho amor y apoyo incondicional son participes de cumplir hoy un sueño más, haciendo de mí una mejor persona.

Finalmente, a mi hermano Yhordy, quien con la paciencia que lo caracteriza siempre me hace ver mis errores, gracias a él que es mi apoyo y mi cómplice.

Agradecimiento

Yanet Rojas Ariza

A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a mi tutor de tesis, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino por haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

A la Universidad Cesar Vallejo, por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

Yurissa Xionali Quillca Aldazabal

A mi familia por el apoyo incondicional, mi madre, mis abuelos mi hermano y mi tía Irma, sencillo no ha sido el proceso, pero hoy es una meta más cumplida.

De igual manera a mi asesor de tesis, por todo el conocimiento impartido durante este proceso de elaboración de tesis.

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenido	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	14
3.1. Tipo y diseño de investigación	14
3.2. Categorías, subcategorías y matriz de Operacionalización	14
3.3. Escenario de estudio	17
3.4. Participantes	17
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	17
3.6. Procedimiento	18
3.7. Rigor científico	20
3.8 Métodos de análisis de la información	21
3.9 Aspectos éticos	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	23
VI. CONCLUSIONES	40
VII. RECOMENDACIONES	42
REFERENCIAS	43

Índice de Tablas		Pág
Tabla 1.	Matriz de categorización	15
Tabla 2.	Criterios de búsqueda	19
Tabla 3.	Fitorremediación en suelos contaminados con contaminantes orgánicos	25
Tabla 4.	Bioremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos	32
Tabla 5.	Tratamiento de suelos contaminados con compuestos orgánicos, usando lombrices de tierra	37

Índice de Figuras

		Pág
Figura 1.	Bioventing.	5
Figura 2.	Bioaumentación y bioestimulación	6
Figura 3.	La fitoremediación como una de los aspectos relevantes que forma parte del fitomanejo	9
Figura 4.	Procesos de remediación implicados por la vermiremediación	12
Figura 5.	Estrategia de búsqueda en el desarrollo de la investigación	20

Resumen

La bioremediación forma parte de la biotecnología para recuperar la calidad de los suelos contaminados, en las que los compuestos orgánicos merecen especial importancia. La investigación ha tenido por objetivo evaluar la bioremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos: fitorremediación y vermiremediación mediante una revisión sistemática efectuada con artículos publicados en las bases de datos de revistas indexadas. Las categorías se han clasificado bajo los términos de bioremediación, fitorremediación y vermiremediación. Los resultados han mostrado, la necesidad de plantear estrategias de procesos combinados y enriquecidos con nutrientes, enmiendas etc. que permiten mejorar los procesos y disminuir los efectos negativos sobre los microorganismos, plantas y lombrices. Además, también se deben considerar factores fisicoquímicos como el tipo de suelo, la dinámica de la biodiversidad, etc. y los posibles efectos secundarios que pudieran causar en la cadena alimenticia como producto de los tratamientos.

Palabras clave: bioremediación, fitorremediación, vermiremediación.

Abstract

Bioremediation is part of biotechnology to recover the quality of contaminated soils, in which organic compounds deserve special importance. The research has aimed to evaluate the bioremediation of soils contaminated with organic compounds: phytoremediation and vermiremediation through a systematic review carried out with articles published in the databases of indexed journals. The categories have been classified under the terms of bioremediation, phytoremediation and vermiremediation. The results have shown the need to propose strategies for combined processes and enriched with nutrients, amendments, etc. that allow to improve the processes and reduce the negative effects on microorganisms, plants and worms. In addition, physicochemical factors such as the type of soil, the dynamics of biodiversity, etc. must also be considered and the possible secondary effects that could be caused in the food chain as a result of the treatments.

Keywords: bioremediation, phytomediation, vermiremediation.

I. INTRODUCCIÓN

El rápido desarrollo de la economía durante los últimos 40 años debido a la industrialización acelerada ha mejorado la productividad y también ha causado impactos negativos en el entorno ecológico, especialmente con respecto a la contaminación del suelo cada vez más severa (Li, et al., 2019). Sakshi, et al. (2019) indica que el suelo es una matriz ambiental importante para sustentar la vida de todos los organismos directa o indirectamente, pero se ha convertido en un sumidero de todos los contaminantes. China presenta 1041 sitios agrícolas y 402 sitios industriales contaminados con metales pesados. También se han reportado la presencia de contaminantes orgánicos como pesticidas organoclorados, ésteres de ácido ftalato, hidrocarburos de petróleo entre otros tipos de contaminantes los cuales pueden tener un impacto negativo en las aguas subterráneas y el ambiente, amenazando a la salud humana (Wu, et al., 2018). Lova, et al. (2018) informó sobre suelos de Wonocolo en Indonesia contaminados con hidrocarburos totales de petróleo mostró que existen considerables riesgos para la salud que son potencialmente venenosos para los humanos en el área local y recomendó una remediación usando métodos biológicos para reducir el nivel de contaminación de TPH.

De otro lado, la tecnología de biorremediación se considera eficiente, es de bajo costo, no requiere ninguna habilidad técnica para funcionar y, en su mayoría, no tiene un impacto negativo en el ecosistema. Aunque la eficacia del tratamiento de biorremediación se ve inhibida por las propiedades de los contaminantes, la matriz del suelo y los factores ecológicos, sigue siendo el proceso elegido por la mayoría de los ambientalistas (Okoh, et al., 2020). La mayoría de los métodos de remediación fisicoquímicos son tecnológicamente sofisticados y extraordinariamente costosos y carecen de aceptación pública (Abo-State, et al., 2018). La biorremediación es un enfoque biotecnológico rentable y prometedor, cada vez más estudiado e implementado, que ofrece la posibilidad de destruir o volver inofensivos varios contaminantes, incluidos los hidrocarburos de petróleo e incluso algunos contaminantes de preocupación emergente por la actividad biológica natural. Tiene una ventaja sobre otros métodos para la desintoxicación o degradación de contaminantes ambientales (Okoh, et al., 2020).

La técnica de tratamiento landfarming permite reducir los hidrocarburos de petróleo y restaurar la calidad del suelo, no obstante el tiempo es moderado, y principalmente depende de la dinámica de los microorganismos nativos de la zona; algunos compuestos diésel como los cicloalcanos, los hidroxi-PAH y los heterociclos de azufre pueden tener muy pocos degradadores específicos o ninguno y se biodegradan mediante procesos cometabólicos lentos en un año pero una fracción recalcitrante puede permanecer por años de landfarming activo (Johnsen, et al., 2021). El compostaje aerobio de suelos contaminados con hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos arcillosos, limosos y arenosos resulta exitoso en más del 70% de remoción ya que las bacterias utilizan los TPH como fuentes de carbono y energía, mientras que los hongos producen enzimas que pueden catalizar las reacciones de oxidación de los TPH (Huu-Tuan, et al., 2021). Otra técnica es la atenuación natural y la bioestimulación aunque también mantiene una contaminación residual después de una operación de bioestimulación, así la bioaumentación, de alta densidad celular denominados consorcios microbianos, posee perspectivas de remediación prometedoras, por lo que ofrece una seguridad ambiental más sostenible (Amechi, et al., 2022).

La selección de una tecnología de remediación específica para el sitio y los criterios de desempeño son un desafío en la búsqueda de la limpieza ambiental; la cuestión del enfoque se aborda examinando los procesos físicos, biológicos y químicos que se encuentran en la descontaminación del suelo; sin embargo la bioremediación con aplicación bacteriana, hongos, la fitorremediación con el uso de plantas y la vermiremediación con el uso de lombrices viene generando amplias expectativas en la recuperación de suelos debido a su bajo costo y a su condición amigable con el ambiente, sin embargo es importante considerar ciertos factores tanto físicos, químicos como biológicos que podrían afectar a las especies relacionándolas con la cadena trófica, para conservar el suelo y proteger la salud humana y el medio ambiente (Okoh, et al., 2020).

En esta situación surge la pregunta

PG: ¿Qué factores determinan una eficiente bioremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos: fitorremediación y vermiremediación?

y las preguntas específicas:

PE1: ¿Qué aspectos relevantes se deben considerar en la fitorremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando plantas?

PE2: ¿Qué aspectos relevantes se deben considerar en la bioremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando bacterias y hongos?

PE3: ¿Qué aspectos relevantes se deben considerar en la vermiremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando lombrices de tierra?

Estas interrogantes han permitido formular los siguientes objetivos:

OG: Evaluar la bioremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos: fitorremediación y vermiremediación

y las preguntas específicas:

OE1: Analizar los aspectos relevantes se deben considerar en la fitorremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando plantas

OE2: Analizar los aspectos relevantes se deben considerar en la bioremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando bacterias y hongos

OE3: Analizar los aspectos relevantes se deben considerar en la vermiremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando lombrices de tierra

II. MARCO TEÓRICO

Los contaminantes se clasifican como iones inorgánicos, químicos orgánicos, patógenos, desechos orgánicos acuosos (pesticidas, por ejemplo, tiofanato de metilo) (Sharma, et al., 2018a), líquidos orgánicos y compuestos inorgánicos (metales pesados), algunos de los cuales son tóxico para los microorganismos, un agente primario en la degradación de los contaminantes (Jianlong, et al., 2019). Otros xenobióticos a los que a menudo se hace referencia como contaminantes de preocupaciones emergentes (CCA) están, por naturaleza, diseñados para ser recalcitrantes y para interactuar con la bioquímica humana y animal y han ganado constantemente su entrada en el medio ambiente (Okoh, et al., 2020)

Sin embargo, el petróleo y su producción, consumo y demanda a nivel mundial siguen siendo fuertes, ya que los productos derivados del petróleo y sus múltiples derivados se utilizan en diferentes áreas de la economía; las características del suelo como textura, influyen en el mantenimiento de la contaminación con las mezcla compleja de compuestos alifáticos y aromáticos, incluidos los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y compuestos orgánicos volátiles del grupo BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos) (Umar, et al., 2018)

Biorremediación in situ. La estrategia in situ o in situ se define como aquellas técnicas en las que los contaminantes se tratan en el lugar de la contaminación donde el suelo se desentierra con una mínima perturbación y la aplicación del método in situ depende de la disponibilidad de oxígeno, la naturaleza del suelo y la profundidad de penetración de los contaminantes en el suelo, si los contaminantes son recalcitrantes, la bioaumentación con inoculantes

microbianos adaptados o especialmente diseñados es una alternativa los métodos emergentes en uso para la limpieza de suelos contaminados con petróleo crudo incluyen celdas de combustible microbianas, nanorremediación, ingeniería genética y sistemas fotoheteromicrobianos (Oluyoye, et al., 2019).

La bioremediación, es una estrategia biotecnológica accesible y rentable para degradar el petróleo crudo y otros contaminantes en el suelo a sustancias inofensivas sin efectos ambientales negativos concomitantes (Frag, et al., 2021), esta dirigido a estimular el crecimiento de microorganismos que utiliza el petróleo crudo como fuente de alimento y energía mediante la creación de entornos favorables para que los organismos prosperen (Abo-State, et al., 2018). (ver figura1)

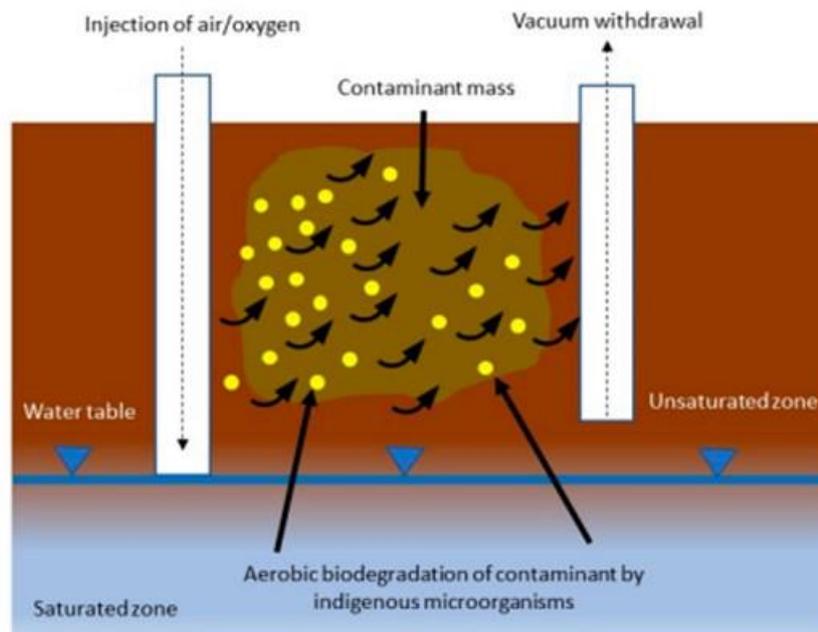
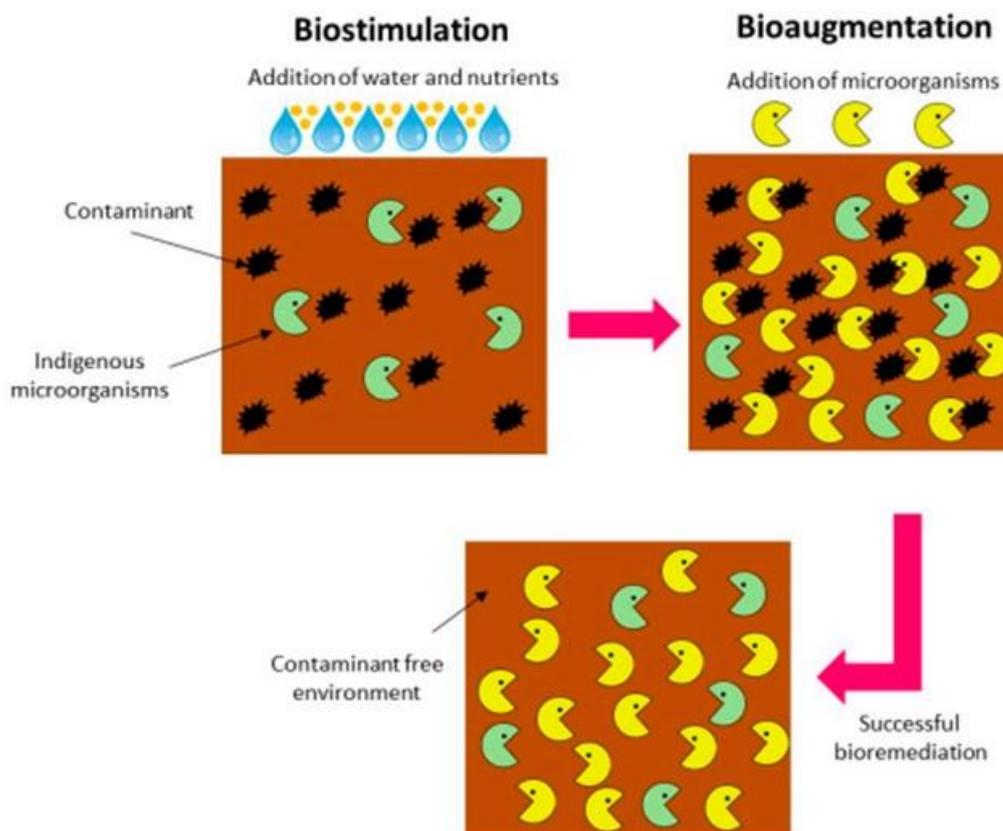


Figura 1. Bioventing. Fuente: Gonçalves et al. (2020)

Biorremediación ex situ. Los medios impactados se excavan físicamente o se bombean desde el sitio contaminado a otro lugar para su tratamiento y, posteriormente, se devuelven al sitio después del tratamiento en un tiempo récord, Sin embargo, el costo de excavación y transporte es alto. Las opciones incluyen la excavación y vertido (vertederos y vertederos de ingeniería), biorreactores de lodos, incineración, oxidación, adsorción, intercambio iónico, lavado de suelos y pirólisis (Okoh, et al., 2020).

Bioventilación. La bioventilación implica la estimulación controlada del flujo de aire, proporcionando oxígeno para aumentar la actividad microbiana y, en consecuencia, mejorar la biorremediación (Gonçalves, et al., 2020). Por lo general, se agregan nutrientes y humedad para lograr la transformación en contaminantes más inocuos para el medio ambiente y para mejorar la remediación. Esta técnica se ha utilizado con éxito en la remediación de suelos contaminados por productos derivados del petróleo (Godheja, et al., 2019).

Bioaspersión. En la bioaspersión, se introduce aire en el suelo para promover la capacidad de degradación de los microorganismos y a diferencia de la bioventilación, se introduce aire dentro del área saturada, lo que provoca el movimiento ascendente de los contaminantes volátiles; la eficacia de la bioaspersión depende de la permeabilidad del suelo que determina la disponibilidad de contaminantes para los microorganismos, así como la biodegradabilidad de los contaminantes (Godheja, et al., 2019), destacan los derivados del petróleo, principalmente queroseno y diesel, que tienen una



buena biodegradación del grupo BTEX y naftalenos (Gonçalves, et al., 2020)

Figura 2. Bioaumentación y bioestimulación. Fuente: Gonçalves, et al., (2020)

Respecto a la **bioremediación** Xie, et al., (2022), usaron *Stenotrophomonas sp.* y raigrás para eliminar DDT y DDE en suelos de China, evaluando el cambio de la comunidad microbiana y la acción enzimática, aplicaron la cepa y lograron tasas de eliminación del 81 % (DDT) y 55 % (DDE), además las bacterias se incrementaron de 7.32×10^6 a 2.56×10^8 células/g en los primeros 10 días y compararon suelo tratados con raigrás y control observando que en los de raigrás a los 210 días ya contenían hongos actividades por las enzimas de polifenol oxidasa, deshidrogenasa y catalasa (Xie, et al., 2022). La bioaumentación es preferida, Nazarova, et al., (2022), evaluaron la bioaumentación de cepas microbianas cultivadas en medios enriquecidos de plaguicidas organoclorados tales como el lindano y DDT (1,1,1-tricloro-2,2-bis(4-clorofenil)etano) para eliminarlos de los suelos contaminados en Rusia, logrando que la influencia de bacterias destructivas introducidas, disminuyeran el lindano en 75% y 56% para el DDT durante 30 días, además cuando se incluyeron plántulas de trébol rojo estas ayudaron a mejorar el incremento de remoción en un 20%. También Wang et al. (2019), eliminaron residuos de pentacloronitrobenzeno en suelo aplicando *Pseudomonas putida* que creció en medio de sal mineral enriquecido con el organoclorado como única fuente de carbono, logró una degradación del 49.84 % en 35 días de una concentración inicial de 100 mg/L; además identificaron los organoclorados formados en el proceso destacando el catecol, 2, 3, 5, 6-tetracloroanilina, 2, 3, 4, 5-TCA, 2, 3, 4, 5, 6-pentacloroanilina y pentaclorotioanisol.

Sin embargo, la biomezcla es el componente mayoritario de un sistema de biopurificación, la bioaumentación es un enfoque interesante para la optimización de estos sistemas, Saez, et al., (2018) uso un cultivo mixto del hongo *Trametes versicolor* y la actinobacteria *Streptomyces sp.* se inocularon como biomezclas, basado en actividades ligninolíticas y degradadoras de pesticidas, el consorcio mejoró la disipación del lindano logrando una

eliminación del 81-87 % a los 66 días y después de la recontaminación, solo la biomezcla bioaumentada de suelo franco limoso mejoró la disipación del lindano (Saez, et al., 2018).

Mientras que Raimondo, et al., (2020), evaluaron la eficiencia del proceso de bioremediación aplicando bioaumentación y biestimulación de cuatro cepas heterótrofo en distintos tipos de suelos, logrando remociones de lindano de suelos franco limosos: 61.4%, arcillosos: 70.8%, arenosos: 86.3% en 14 días de tratamiento, concluyeron que la aplicación simultánea de bioaumentación con el consorcio de actinobacterias y bioestimulación resulta eficiente

Huang, et al., (2018), aislaron *Bacillus subtilis* en condiciones de cultivo de pH 7.0, 30 °C y degradó DBP inicial de 200 mg/L a 12.5 y a 100 mg/l, equivalente del 95 % en 5 días con un tiempo de vida media $t_{1/2}$ inferior a 7.23 h. pasando a ftalato de monobutilo y ácido ftálico y la bioaumentación del lodo vegetal de *Youngia japonica* con la cepa aceleró la disipación hasta el 97.5 % mostrando un gran potencial para la biorremediación mediante asociaciones planta-endofito y para reducir la acumulación en los cultivos.

Baoune, et al., (2019) evaluaron el sistema planta maíz -actinobacteria cepa endofítica *Streptomyces sp* para remediar sitios contaminados con crudo de petróleo crudo además de los hidrocarburos aromáticos puros (fenantreno, pireno y antraceno) y los usaron como única fuente de carbono y energía, removiendo el 63 % de fenantreno, 93 % de pireno y 83 % de antraceno, la inoculación de endófitos incrementó la remoción de contaminantes los hidrocarburos (C8-C30) se degradaron de manera eficiente.

Efecto de la textura del suelo. Es sabido que los suelos se conforman en cuatro clases distintas, como arena, arcilla, limo y materiales gruesos, y también contiene humedad y aire; la matriz del suelo influye en la remoción de hidrocarburos de petróleo del mismo, los factores abióticos para optimizar las condiciones que son esenciales para que los microbios autóctonos eliminen los contaminantes o la estimulación de las capacidades de degradación de los microorganismos mediante la introducción de nutrientes que mejoran la velocidad, y la opción de bioestimulación solo se adopta cuando hay

microorganismos autóctonos con capacidad de degradación, pero el ritmo es lento y hay que potenciarlo (Okoh, et al., 2020).

Fitorremediación. La fitorremediación implica el uso de plantas verdes o vegetales para remediar suelos contaminados y resulta ser una fitotecnología que promete debido a su bajos costo, practicidad son plantas que desarrollaron mecanismos que les permite tolerar elevadas concentraciones de contaminantes aunque de manera práctica se limita a sitios con mediana o baja concentración de contaminantes, con baja toxicidad que permita el crecimiento de las plantas, ya que la profundidad de la remediación, depende de la profundidad de las raíces lo cual facilita el aislamiento o degradación de los contaminantes y luego, las plantas pueden ser recolectadas, tratadas y eliminadas (Rada, et al., 2019).

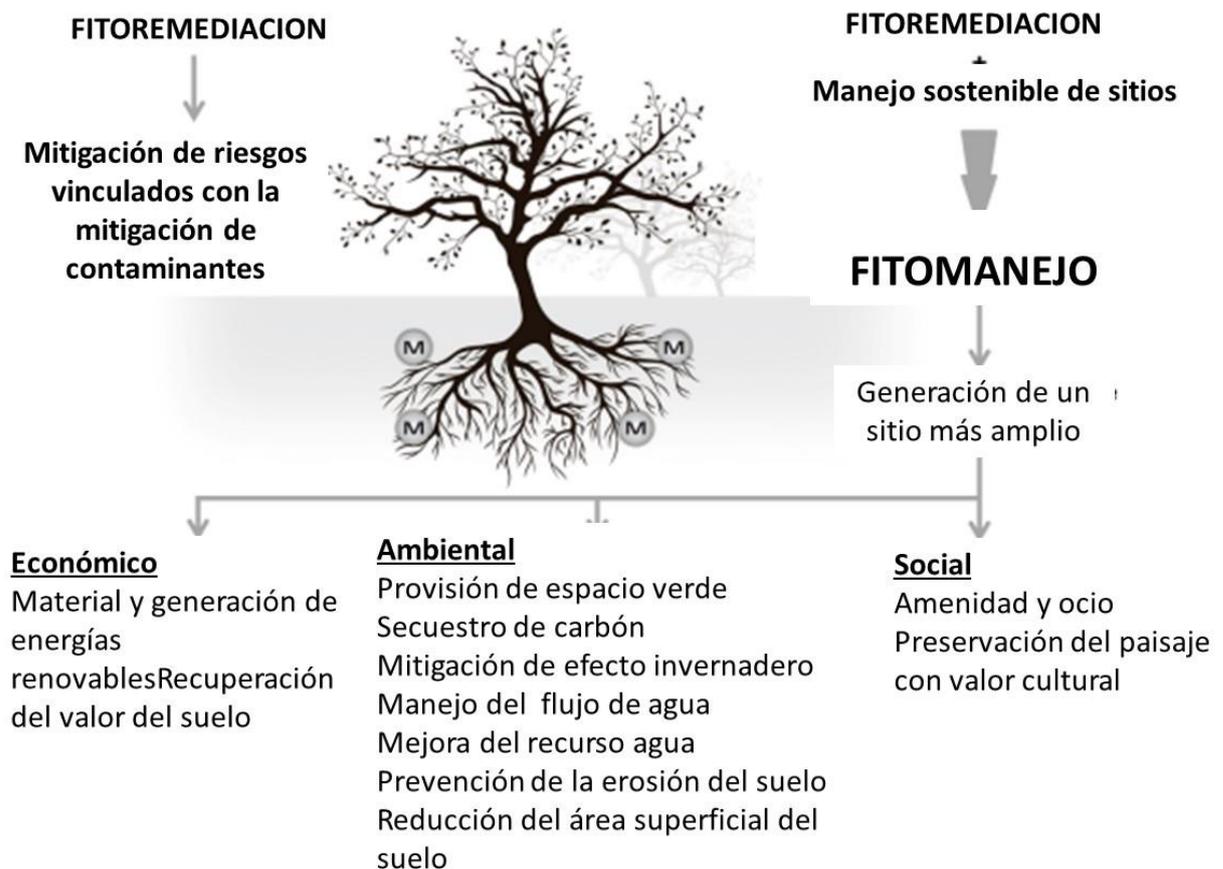


Figura 3. La fitoremediación como una de los aspectos relevantes que forma parte del fitomanejo Fuente: Burges, et al., (2017).

Rada, et al., (2019), usaron 3 métodos para remediar suelos usados como zona industrial de refinación de petróleo, entonces los hidrocarburos totales de petróleo (HTP), usando campos eléctricos, dentro de los cuales uno correspondió a la fitoelectroquímica, para ello usaron 3 plantas en condiciones jóvenes y maduras, tales como geranios-nochebuena-Buxus, de las cuales la planta nochebuena logro el 20% de eficiencia de eliminación de los hidrocarburos de petróleo aplicando la fitoelectrorremediación con nochebuena (Rada, et al., 2019).

Rodriguez-Campos, et al., (2019), evaluaron la remoción de hidrocarburos totales de petróleo (HTP), alcanos e hidrocarburos aromáticos policíclicos, aplicando procesos de fitorremediación usando pastos o gramíneas como la *Panicum maximum*, proceso de vermiremediación usando *Pontoscolex corethrurus* y bioaumentación aplicando consorcio bacteriano encapsulado, se hicieron combinaciones en un periodo de 112 días y demostraron crecimiento de biomasa y de las lombrices de la gramínea de hasta de 2.6 veces, y hasta 8.5 veces combinado con bacterias Las lombrices eliminaron alcanos hasta el 94.5 % y los polinuclearomaticos hasta el 77.2 %, mientras la combinación del pasto elimino hasta el 99 % de alcanos y los polinuclearomaticos hasta el 90% para moléculas de 2 a 6 anillos), la combinación de lombrices y plantas resultaron muy eficientes en el tratamiento

Fortin, et al., (2021), utilizaron el género *Salix* en fitorremediación y otras fitotecnologías por su alta tasa de evapotranspiración cuando se cultivan en cultivos intensivos de rotación corta que pueden provocar aumentos en las concentraciones de contaminantes del suelo cerca de los arbustos, entonces se cortaron secciones de una plantación de sauces maduros de 7 años para eliminar la transpiración y se compararon las concentraciones en el suelo de bifenilos policlorados, hidrocarburos alifáticos C10-C50, aromáticos policíclicos entre otros por 24 meses, los resultados demostraron que la eliminación de los arbustos de sauce limitaron el aumento de contaminantes en la superficie del suelo, para C10-C50 y PAH bajo el tratamiento *Salix* ya que los sauces facilitarían la migración de contaminantes hacia sus raíces, incrementando la

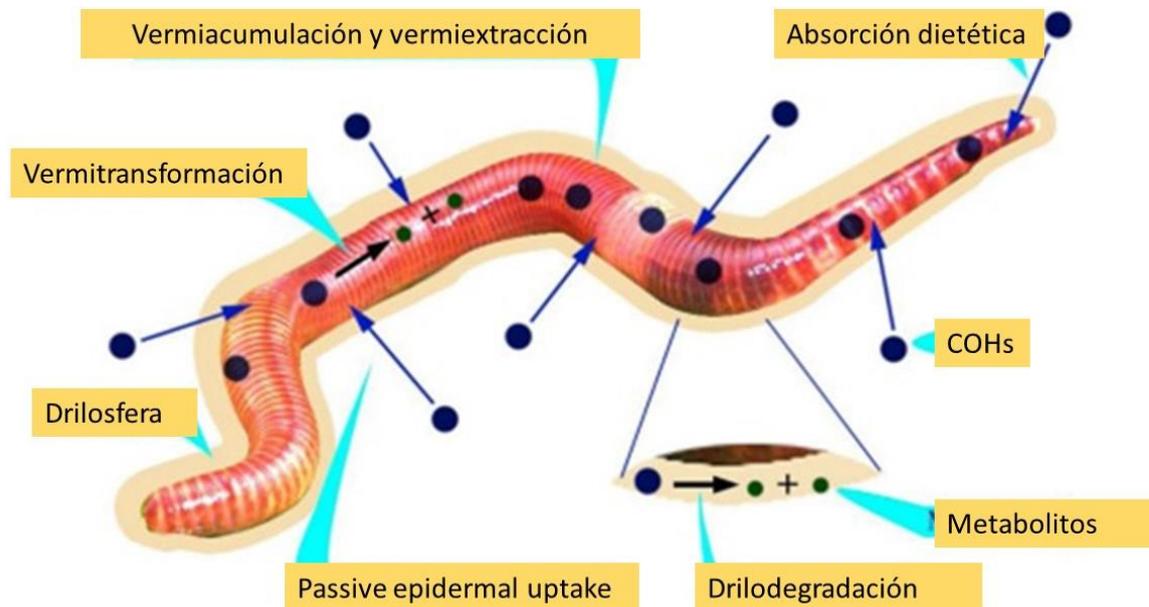
concentración en el suelo , aunque los aumentos aparentes de concentraciones de los compuestos contradicen los beneficios de la fitorremediación, es posible que se produzca la fitoextracción y rizodegradación activas.

Aioub, et al., (2019) aplicaron una fitorremediación mejorada con surfactantes para remover cipermetrina (10 µg/ g) que es un insecticida piretroide usando *Plantago major* y algunos surfactantes, la captación y translocación del contaminante del suelo se usaron via maceta 4 tensioactivos tales como SiO₂ (750 mg/L, 2-hidroxiopropil-beta-ciclodextrina (1%), ácido húmico (HA, 10 mg/L) y Tween 80 (9.2 mg/L) y la aplicación de SiO₂ condujo a un tiempo de vida media del contaminante de 6.41 días, la hidroxipropil-β-ciclodextrina fue el mejor tensioactivo pero la adición de SiO₂ al suelo cultivado con la planta fue más eficaz que el uso de otros tensioactivos que mejoraron la solubilidad que logro eliminare cantidades significativas del contaminante.

Steliga, et al., (2020) aplicaron la fertilización en macetas y uso la especie *F. arundinacea* en suelos contaminados con TPH y n alcanos logrando reducir TPH entre el 49.4 y 60.1 % del contenido en los suelos, favorecido no solo por la planta sino por la bioremediación que ocurrió por la estimulación de la flora microbiana del suelo aunque los valores del factor de translocación fueron: TF < 1, con una fitorremediación acelerada por la biodegradación de los hidrocarburos del petróleo.

Pino, et al., (2019) evaluaron la capacidad de las plantas *Brassica juncea*, *Avena sativa*, *Brachiaria decumbens* y *Medicago sativa* para absorber bifenilos policlorados (PCB) e inducir la degradación de los microorganismos del suelo contaminado; se evaluó la eliminación de los PCB 44, 66, 118, 153, 170 y 180 tanto en suelos rizosféricos como no rizosféricos con remociones de 45% a 63%; los PCB 118, 153, 138 y 170 se detectaron en raíces de *Brachiaria decumbens* en diferentes concentraciones, en suelo sembrado se observó un aumento en la concentración de bacterias; aunque las plantas tuvieron un efecto positivo en la eliminación de PCB, este efecto varió según el tipo de PCB, la planta y el suelo.

Vermiremediación. La bioremediación está referida principalmente a la aplicación de plantas y comunidades microbianas pero también se viene usando la fauna del suelo, como las lombrices de tierra, lo cual ha merecido



especial atención que puede brindar dividendos significativos, ya que las lombrices de tierra actúan como ingenieros naturales por sus efectos contundentes en los procesos químicos, físicos y biológicos de su entorno, estas suelen promover el crecimiento de los cultivos porque mejoran el contenido de nutrientes del suelo y confluyen en reducir la toxicidad de los desechos desintoxicando el suelo contaminado (Singh et al., 2018). Eso ha sugerido el término de "vermiremediación" especialmente de suelos contaminados con compuestos que desarrollan bioacumulación y biotransformación/biodegradación, entre otros procesos, para remover HAP, petróleo e hidrocarburos crudos, agroquímicos y PCB del entre otros (Shi, et al., 2020).

Figura 4: Procesos de remediación implicados por la vermiremediación. Fuente: Shi, et al., (2020)

La vermiremediación es una tecnología de bioremediación que aprovecha el ciclo de vida de las lombrices de tierra mediante su alimentación, excavación, metabolismo, secreción y de su interacción con otros factores abióticos y bióticos para acumular y extraer, transformar o degradar contaminantes en el

suelo, entre los procesos que desarrollan se cuentan la vermiextracción y vermiacumulación, vermitransformación y drilodegradación (figura 4, Shi, et al., 2020).

Xu, et al., (2020), usaron la lombriz de tierra *Eisenia fétida* para someterlas a lindano estabilizados durante un mes en el suelo, para ello probaron distintas concentraciones del contaminante de 0.69 a 1.83 mg/kg húmedo, al final de los tratamientos las lombrices acumularon entre 2.99 y 6.56 mg/Kg húmedo, esto se debió a que el lindano envejecido interrumpió la transmisión de acetilcolina afectando al ácido gamma-aminobutírico por lo que exhibieron una hipoactividad significativa en la locomoción debido a la inhibición del sistema y redujeron los niveles iniciales. También Anderson et al. (2021) trataron suelos contaminados con diclorodifeniltricloroetano (DDT) y sus metabolitos como DDX y dieldrín en un periodo de 18 meses, para esto evaluaron la capacidad de dos tipos de compostaje con la presencia de lombrices de tierra para reducir la biodisponibilidad de los pesticidas organoclorados envejecidos de en el suelo y demostraron que las enmiendas podían reducir la bioacumulación con el paso del tiempo. De otro lado, Lupi, et al., (2019), analizaron muestras de suelo y estudiaron la absorción de organoclorados en organismos terrestres (micro y macroinvertebrados) en concentraciones de plaguicidas aplicadas hasta de 2.8 ng/g, encontraron una mayor bioacumulación en la mesofauna del suelo es decir en ácaros y colémbolos y lombrices con un máximo de 260 µg/g debido a una elevada sensibilidad de la mesofauna ante el impacto externo con las funciones del ecosistema.

III. MÉTODO

3.1. Tipo y diseño de investigación.

La investigación es de enfoque cualitativo porque se recurre a la información basada en datos y longitudinal porque se basa en una revisión histórica en un rango de años del 2018 –al 2022, y un artículo recopilado del 2017, además es aplicada porque se basa en la revisión de experimentos (Pandey and Pandey, 2015).

Esta investigación es aplicada, porque emplea el conocimiento científico basado en el uso de metodologías, protocolos y tecnologías para solucionar una necesidad puntual (Concytec, 2018), por esa razón se desarrolla de manera sistemática, ya que ha sido planificada y organizada para lo cual se han elaborado fichas o base de datos en el que se han registrados los datos de los procesos y resultados investigados (Concytec, 2018) por la naturaleza de la guía se está explicando un diseño cualitativo narrativo de tópicos.

La investigación ha comprendido una extensa revisión de artículos científicos publicados en revistas indexadas de alto impacto a nivel mundial sobre la biotecnología aplicada en la remediación de suelos contaminados, para los cual, se han organizado categorías y subcategorías como sub temas de investigación a partir de lo cual se ha la búsqueda de información aplicándose criterios de inclusión y de exclusión (idioma, años de publicación)

3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización

La tabla muestra la matriz de consistencia planificada en esta investigación:

Tabla 1. Matriz de categorización

PROBLEMA	OBJETIVOS	CATEGÓRIAS	SUBCATEGÓRIAS	Referencias
¿Qué aspectos relevantes se deben considerar en la fitoremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando plantas?	Analizar los aspectos relevantes se deben considerar en la fitoremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando plantas	fitoremediación	Tipo de plantas, árboles, remoción, efectos, combinaciones, asistencias	Xie, et al., (2022) , Rada, et al., (2019), Raimondo, et al., (2020), Fortin, et al., (2021), Aioub, et al., (2019)Chang, Akbari, David, & Ghoshal, 2018 Lee, et al. 2018 Sharma, Dangi, & Shukla, 2018 Saba et al 2018
¿Qué aspectos relevantes se deben considerar en la bioremediación de suelos contaminados con	Analizar los aspectos relevantes se deben considerar en la bioremediación de	bioremediación	Tipo de microorganismos (bacterias, hongos), asistencias, combinaciones, efectos	Saez, et al., (2018), Wang, et al., (2019), Huang, et al., (2018), Rodriguez-Campos, et al.,(2019),

<p>compuestos orgánicos usando bacterias y hongos?</p>	<p>suelos contaminados con compuestos orgánicos usando bacterias y hongos</p>			<p>Raimondo, et al., (2020), Wei et al. 2021 Li et al. 2021</p>
<p>¿Qué aspectos relevantes se deben considerar en la vermiremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando lombrices de tierra?</p>	<p>Analizar los aspectos relevantes se deben considerar en la vermiremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos usando lombrices de tierra</p>	<p>vermiremediación</p>	<p>Lombrices de tierra, tipos de suelo, propiedades de suelo, asociaciones de cadena trofica</p>	<p>Rodriguez-Campos, et al., (2019), Xu, et al., (2020), Anderson, et al., (2021), Lupi, et al., (2019), Radziemska et al., 2018 Kim, Lee, & Chang, 2018</p>

3.3. Escenario de estudio

Esta investigación no cuenta con un sitio físico, ni elementos materiales sino es de tipo virtual, el capital humano corresponde exclusivamente a los autores y asesor y los autores de los artículos científicos revisados correspondientes a revistas indexadas pertenecientes a distintas bases de datos como SCOPUS y Web of Sciences.

3.4. Participantes

Se han revisado las bases de Scopus, Web of Science, para buscar la información correspondiente al desarrollo de la investigación, concerniente a biotecnología usada en la remediación de suelos.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se ha desarrollado un análisis documental una vez recopilada la información por subcategorías como base principal del estudio (Domínguez, 2016, p. 15) y se ha efectuado la narración de acuerdo a los tópicos formulados (tipos de biotecnología, tipos de contaminantes, condiciones de bioremediación). Cada categoría a dado lugar a la extracción de datos cualitativos y numéricos que han sido registrados mediante la técnica de la observación y se han elaborado tablas de resultados que han sido presentadas en los resultados y discusión y ha sido analizado convenientemente con la siguiente información: referencia, problema, objetivo, variables, dimensiones, indicadores, técnicas estadísticas utilizadas, resultados, conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

3.6. Procedimientos

En el procedimiento se han planteado 3 categorías, las cuales han generado la búsqueda de artículos de investigación específicas a la naturaleza de cada una, a partir de ellas se han planteado las subcategorías a partir de las mismas se han elaborado fichas para la investigación narrativa de tópicos, es importante destacar que se han usado exclusivamente artículos experimentales y artículos de revisión donde se ha extraído la parte teórica, y se han usado como antecedentes. Las palabras claves usadas fueron: “**vermi remediation of soils contaminated with organic compounds, petroleum, organochlorines, pesticides, emerging contaminants, bioaugmentation, bioremediation, phytoremediation**”. Se usaron fichas para extraer la información y posteriormente se elaboraron tablas Excel para presentar los datos de manera organizada.

La tabla presenta los criterios de investigación:

Tabla 2. Criterios de búsqueda

Tipo de documento	Documentos referidos a	Palabras clave de búsqueda	Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículo científico	Tipos de biotecnología aplicadas en la remdiacion de suelos	<u>vermi remediation of soils</u> <u>contaminated with organic compounds, petroleum,</u> <u>organochlorines, pesticides, emerging contaminants, bioaugmentation, bioremediation, phytoremediation</u>	2018-2022 Idioma ingles Revistas indexadas En Scopus y WoS	Años anteriores Otros idiomas Revistas no indexadas
Artículo de Revisión	<u>Definicones teoricas y enfoques sobre biotenología para remdiar suelos</u>	<u>Biotechnology soil remediation</u>		

En la figura se muestra el procedimiento usado en esta investigación:

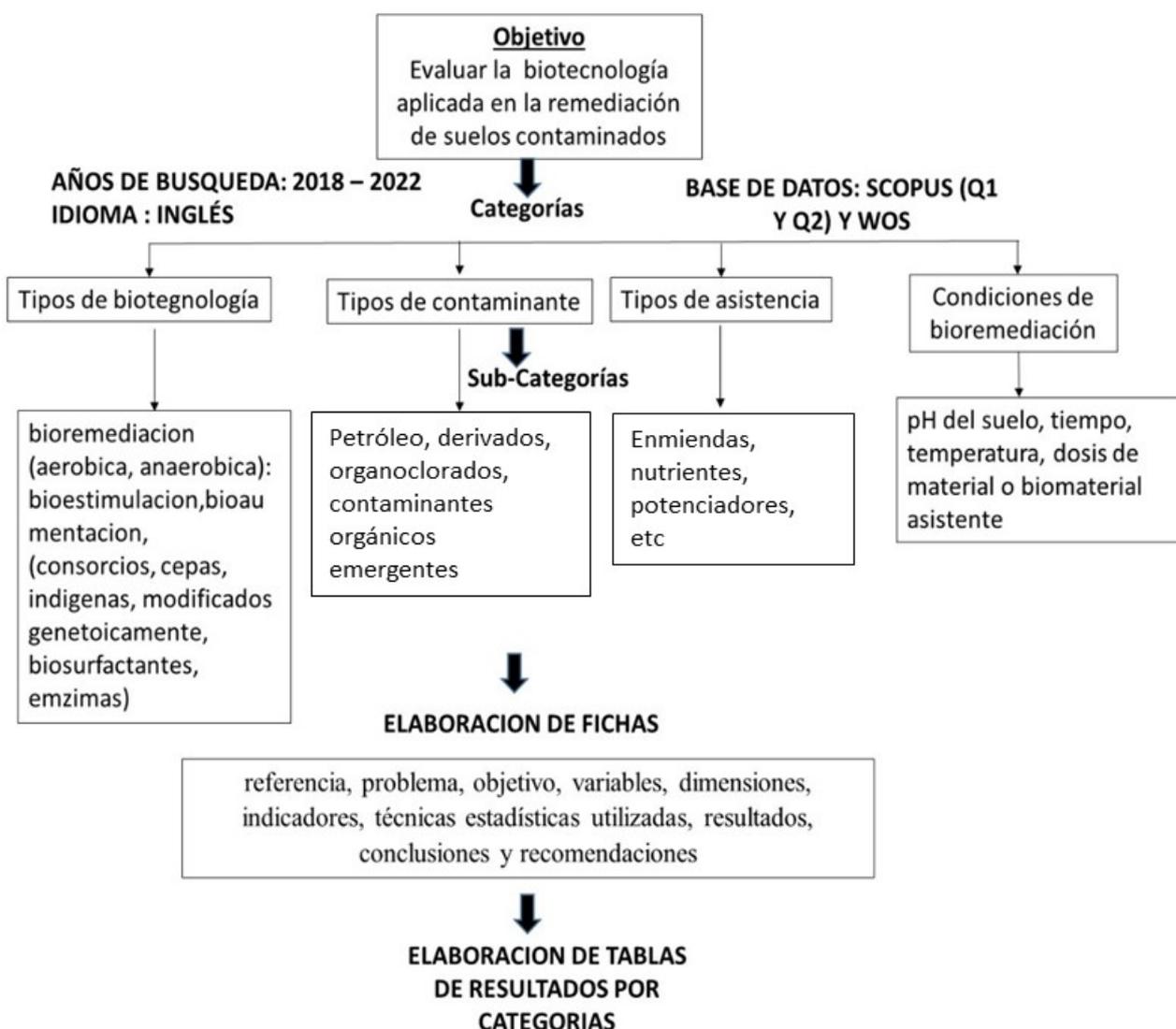


Figura 5. Estrategia de búsqueda en el desarrollo de la investigación

3.7. Rigor científico

De acuerdo a López et al (2019), validez y confiabilidad y en concordancia con la coherencia en las interpretaciones basadas en pruebas irrefutables confiables, de acuerdo a ello, la validez es el grado en que un instrumento mide lo que debe medir y la confiabilidad es el grado de conveniencia en que el instrumento mide la variable. De acuerdo a este principio, se aplicaron aspectos relevantes como la consistencia lógica de los términos buscados en la biotecnología para remediar suelos, la credibilidad, basada en una serie de

artículos experimentales que han sido revisados por pares científicos y han sido aceptados para su publicación en revistas de alto impacto, transferencia de los conocimientos por el nivel de reproducibilidad o aplicabilidad de resultados experimentales, la confirmación y la fundamentación basada en la discusión de los enfoques y principios teóricos expuestos en cada investigación particular (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p. 453-459)

3.8. Método de análisis de información

En función de los datos obtenidos en la revisión de artículos sujetos a cada categoría y subcategoría se elaboraron tablas Excel a partir del cual se aplicó una evaluación estadística descriptiva cuando fue posible, en el caso de condiciones de aplicación de la biotecnología como por ejemplo, dosis de nano partículas, dosis microbianas, condiciones de tratamiento biogenético, etc. Asimismo, basado en los artículos e revisión, se generalizaron las tendencias futuras y estas fueron analizadas mediante la búsqueda de información puntual que permitiera saber el número de investigaciones al 2022 referidos a los avances en la biotecnología de remediación de suelos.

3.9. Aspectos éticos

En esta investigación se han respetado todos los derechos de autor haciendo las citas y registro correspondiente en el mismo documento (referencias), además se ha demostrado la originalidad del documento por uso de programas informáticos (turnitin) de la UCV, asimos los autores declaran haber cumplido con los principios de ética del investigador establecido por el CONCYTEC y la UCV, haber desarrollado la investigación sujeta a las líneas de investigación de la escuela de Ingeniería Ambiental, según los documentos nombrado a continuación:

- Guía de Elaboración del Trabajo de Investigación y Tesis para la obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobada mediante RVI N°011-2020.

- Reglamento de propiedad intelectual de la universidad César Vallejo (UCV) aprobada mediante Anexo 01 - RCUN° 0168-2020-UCV
- Código Nacional de la Integridad Científica (Concitec s/f)
- RCUN°200-2018-UCV LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

OE1: Los hidrocarburos totales de petróleo representan un conjunto de componentes orgánicos que en el suelo comprometen su calidad, existen ocasiones en que las raíces de la planta tendrían poco acceso al agua y a las sales minerales, sumadas a una transpiración de los hidrocarburos volátiles desde las raíces lo cual no ayuda al desarrollo de estos órganos, es por eso que se usan mejoradores, potenciadores y nutrientes, la fertilización resulta adecuada, ya que Steliga, et al., (2020), demostró que la aplicación de la *Festuca arundinacea* asistida por procesos de fertilización con nutrientes como los minerales NPK en una mezcla de N:P₂O₅:K₂O = 1:0,34:0.9 lograba mejorar la respuesta en la degradación en el suelo de hasta 8217 a 3278 mg/kg de masa seca de suelo (60.1%). Baoune, et al., (2019) señala que el petróleo crudo influye en el desarrollo vegetal, porque observó en su experimento que las raíces cultivadas en petróleo crudo eran más cortas que las cultivadas en hidrocarburos polinucleoaromáticos puros, por ello las plantas fueron inoculadas con *Streptomyces* sp. Hlh1 entonces recién aumentaron sus longitudes en raíces y brotes, mejoraron en su contenido de clorofila y carotenoides aunque para el contaminante particular de pireno no observaron cambios, de tal forma que se produjo una mayor remoción en los compuestos de cadena más corta (C₁₀-C₂₀). En cambio Liu, et al., (2020) para eliminar el pireno uso como estrategia los pastos de Sudan más la adición de potenciadores para promover el crecimiento del pasto y la acumulación de pireno generando un incremento significativo de la materia orgánica disuelta y la actividad microbiana del suelo asociados a la remoción del pireno acumulado principalmente en el brote (Liu, et al., 2020). En otros casos, no solo se tratan suelos con un mismo tipo de contaminantes, se presentan mezclas por ejemplo de hidrocarburos clorinados conocidos como PBC y los de petróleo, Fortin et al. (2021), experimento en una plantación de sauces de 5475 m² (*Salix miyabeana*) un corte de árboles o poda entre los años 2010 y 2013, para evaluar como afectaba la poda en la remoción de los compuestos orgánicos, PCB, C₁₀-C₅₀, antraceno, haciendo un primer corte en diciembre de 2010 y el segundo en diciembre de 2013 y en años posteriores, y prosiguió a

biorremediar con sustratos de hongos de *Pleurotus ostreatus* y madera astillada ramial de *Salix spp.*, observaron entonces que en la primera fase con el reciente corte de árboles se incrementaban las concentraciones iniciales de los contaminantes, pero en su rebrote al 2014 y posteriores cortes al 2019, las tendencias comenzaron a disminuir en el suelo.

Como se observa en la tabla, se han usado una serie de plantas para los tratamientos, pero el raigrás (pasto) y la alfalfa, son muy comunes en su aplicación, según Xie, et al., (2022) se puede lograr una buena correlación en la tasa de remoción del DDT y DDE en hidrocarburos y alcanos totales, cuando está asociado a la actividad microbiana en solo 30 días; explican que los exudados de las raíces generan algunos cambios en las comunidades de los microorganismos presentes en la rizósfera, en su misma composición y sobre todo en la actividad enzimática que actúa en el suelo liberando en conjunto más polifenol oxidasa para degradación los hidrocarburos polinucleoaromáticos. Asimismo se han aplicado especies como *Brassica juncea*, *Avena sativa*, *Brachiaria decumbens*, *Medicago sativa* para remover PCBs, Pino, et al., (2019), experimento por 6 meses en la fitoremediación de suelos contaminados con PCBs y la remoción lograda fue relacionada con el sistema radicular de las plantas, ya que mejoró a su vez la degradación mediante microbiota, ocasionando la difusión de oxígeno en el suelo, provisión de carbono orgánico, y una importante inducción del catabolismo de los PCB liberando biosurfactantes especialmente lograda por la rizósfera y muy restringido a los microorganismos rizosféricos (Pino, et al., 2019).

Otro compuesto orgánico son los rezagos medicinales considerados como contaminantes emergentes, entre ellos destacan la eliminación de la cipermetrina del suelo, Aioub, et al., (2019) usaron la especie *Plantago major* y lograron una tasa de remoción del 30.8 a 84.2 % en un plazo de 14 días de exposición, además observaron que las plantas se desarrollaban con incremento en la biomasa (hojas y raíces) esto asociado a su capacidad de adsorción iónica de ácido silícico presente en el suelo, que mostro una competencia con otros iones mejorando la actividad microbiana y la respuesta de la planta.

También se han probado otras combinaciones técnicas además de la bioremediación, con la fitoremediación destaca la electroquímica como la electro-fitoremediación para eliminar hidrocarburos del petróleo, Rada, et al., (2019) experimento durante 110 días, insertaron los electrodos placas con plantas juveniles (1 – 2 años) y maduras (3 a 5 años) de geranio, nochebuena y Buxus con 10 Kg de suelo húmedo y removieron la mayor parte de hidrocarburos polinucleoaromaticos usando *Brassica rapa* de tal forma que la electricidad de corriente alterna permitió el crecimiento de las plantas y generación de biomasa, produciéndose una distribución del campo eléctrico en el suelo que permitió la remoción de TPH por el potencial de oxidación reducción que disminuyó el flujo de evaporación (Rada, et al., 2019).

Tabla 3. Fitorremediación en suelos contaminados con contaminantes orgánicos

País	Contaminante	Plantas	Tiempo de tratamiento	Remoción	Tipo de suelos y observaciones	Referencia
China	DDE= 50 a 100 mg/L	raigrás y la alfalfa		DDT: 55%; DDE: 39.4 %	Suelo es brunisolólico Materia orgánica= 17.6 mg/kg Arena= 31.9 % arena, Limo= 57.7 % , Arcilla = 10.4 % Norganico= 132.3 mg/Kg, Fósforo disponible, = 18.4mg/Kg, pH =) 7.6, CIC = 43.39 cmol/kg Stenotrophomonas sp DXZ9 Cepas se cultivadas con 50 mg•L-1 de DDE	Xie, et al., (2022)

Italia	TPH = 57889.48 mg/kg (húmedo)	<i>geranios-nochebuena-Buxus</i> distribuidos en 22.07 kg de suelo contaminado con hidrocarburos		HTP = 42,5%	Densidad = 1.5 g/cm ³ Humedad = 20% Diámetro de partícula = 0.08 mm (50% del suelo) enfermedades como <i>Botrytis cinerea</i> (moho gris), <i>Xanthomonas geranium</i> (ennegrecimiento de los esquejes) y <i>Agrobacterium tumefaciens</i> (cáncer bacteriano).	Rada, et al., (2019)
Mexico	hidrocarburos totales de petróleo (HTP), alcanos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).	pastos del género <i>Panicum</i> . Trasplante individual a macetas de 2 kg de suelo contaminado. 10 cm de altura	112 días	<i>Panicum máximum</i> : Alcanos = 74 - 99 % (C10 - C38); HAP = 43 - 50 % (2 a 3 anillos); 46 - 90 % (4 anillos); 73 % (5 anillos); 59 % (6 anillos)		Raimondo, et al., (2020)
Canada	PCB, C10-C50, antraceno	<i>Salix miyabeana</i>	2010-2019	PCBs 2017 = 103.5 mg/Kg PCBs 2019 = 89.84 mg/Kg C10-50 2017 = 4000 mg*Kg C10-C50 (2019) = 6231 mg/Kg antraceno 2017 = 26.34mg/Kg antraceno (2019) = 33.45 mg/Kg	Textura: arcilla = 46 % lomo = 33.96 arena = 20.1 % textura arcillosa pH = 7.7 Materia orgánica = 9.6%.	Fortin, et al., (2021)
China	cipermetrina	<i>Plantago major</i>	14 d	Acumulación total de cipermetrina en toda la planta: Tiempo = 7 d Enmienda con SiO ₂ = 66.72	suelo franco-arcilloso materia orgánica = 18.2 g/kg pH = 7.3	Aioub, et al., (2019)

				mg/kg Enmienda HA = 61.57 mg/kg Enmienda HPβCD = 58.52 mg/kg Enmienda Tw 80 = 53.03 mg/kg Tiempo = 14 d: Enmienda con SiO2 = 125.71 mg/kg Enmienda HA = 120.53 mg/kg Enmienda HPβCD = 116.37 mg/kg Enmienda Tw 80 = 109.19 mg/kg	Conductividad eléctrica = 2.28 S/m	
	fenantreno, pireno y antraceno	maiz	14 d	63 %fenantreno, 93 %pireno y 83 %antraceno	suelo franco petróleo crudo = 20 g/kg antraceno y fenantreno = 36 mg/kg pireno = 46 mg/kg	Baoune, et al., (2019)

Polonia	TPH n-alcanos (n- C6 - n-C40)	<i>F.</i> <i>arundinacea</i>	6 meses	<p>La fitorremediación al cabo de los 6 meses tratados con <i>F. arundinacea</i> y biorremediación bioestimulada redujo:</p> <p>Suelo a: TPH de 589 a 295 mg/kg de masa seca = 35.7 % de remoción</p> <p>Suelo b: TPH de 8217 a 3278 mg/kg de masa seca = 60.1 %</p> <p>Suelo C: TPH de 4687 a 1978 mg/kg de masa seca = 56.7 %</p> <p>Remoción de C12-C18 = 41.4 a 70.6 %</p> <p>Remoción de C6-C12 = 31.2 a 40.5 %</p> <p>Remoción de C18-C25 = 34.2 a 49.2 %</p> <p>Remoción de C25-C36 = 14. A 39,4%</p>	<p>N/P = 10: 1</p> <p>pH= 5.8 y 6.1</p> <p>CE=102–152 μS/cm</p> <p>DQO = 75–112 mg O₂/dm³</p> <p>HTP = 589.1 a 8217 mg/kg de masa seca.</p> <p>Predominio de C12-C18 = 55.0%) y C18 a C25 = 39.4%</p> <p>almacenar descartes de perforación contaminados con hidrocarburos de petróleo</p>	Steliga, et al., (2020)
---------	-------------------------------------	---------------------------------	---------	--	---	-------------------------

	bifenilos policlorados (PCB) PCB 44, 66, 118, 153, 170 y 180	<i>Brassica juncea</i> <i>Avena sativa</i> <i>Brachiaria decumbens</i> <i>Medicago sativa</i>	6 meses	Remoción= 45% y 63%. PCB menos clorados (Johnson y Bock 2014). Aunque algunos informes sugieren que la rizosfera es el área donde ocurre la mayor tasa de degradación, para algunos congéneres (PCB 66, 118 y 138), los mejores resultados de remoción se obtuvieron en suelo no rizosférico. Para el PCB 66: para <i>B. decumbens</i> en suelo rizosférico (62 %) Para alfalfa en el suelo no rizosférico (60 %). PCB 118: <i>B. decumbens</i> suelo no rizosférico de (45,6%). PCB 138: mostaza. Suelo no rizosférico (48%)	Concentración inicial: en el suelo de PCBs: PCB 44: 0.5 mg/kg PCB 66 1.1 mg/kg PCB 118 = 21.8 mg/kg PCB 138 = 38.7 mg/kg PCB = 153 = 6.2 mg/kg PCB 170 = 17 mg/kg PCB 180 = 2.4 mg/kg	Pino, et al., (2019)
China	pireno	pasto Sudán	42 d	Acumulación de pireno en pasto Sudán El efecto de TS y NTA sobre la concentración de pireno en pasto Sudán se muestra en la Fig. 4. Las concentraciones de pireno en Brotes: 279.92 y 369.42 mg/kg que incremento con potenciadores y grass en 20.14 % Raíces: 23.93 a 59.80 mg/kg	pH= 8.3 Materia orgánica = 19.6 g/kg Nitrógeno total= 0.5 g/kg Limo = 60.4 % Arcilla = 7.4 % Arena = 32.2 % Ni = 24.4 mg/kg Pireno = 50 mg/kg suelo contaminado con pireno y enriquecido con potenciadores y en algunos casos con pasto	Liu, et al., (2020)

OE2: La bioremediación es una técnica eco-amigable que dispone del universo microorganismos con distintos potenciales para utilizar los contaminantes orgánicos como fuente de carbono. Nazarova, et al., (2022) evaluaron cepas destructoras de lindano c-HCH y DDT que fueron aisladas de suelos contaminados con HCH inoculando a un medio enriquecido con estos contaminantes como única fuente de carbono en forma de asociaciones microbianas, estas suspensiones celulares bacterianas asociadas a las plantas del medio lograron importantes remociones incluso en el re-cultivo de los suelos contaminados. Este concepto es reforzado por Rodriguez-Campos, et al., (2020), quienes demostraron que las combinaciones de distintos agentes biológicos mejoran la eficiencia de remoción de compuesto petrolígeno, en este caso la mezcla de la lombriz *P. corethrurus* y la aplicación de bacterias, logro altas remociones mayores al 77%, seguido de la combinación de las 3 fuentes biológicas, del consorcio bacteriano y finalmente de los macroorganismos endógenos. Para Saez, et al., (2018), la biomezcla del suelo arcilloso, el uso de los microorganismos heterótrofos resulta eficiente, ellos mostraron una remoción del lindano superior el 60% a los 10 días de incubación; y un contenido constante de lindano en los 60 días de incubación con una remoción del 81%, mientras que la re-contaminación eliminó el 35 % del lindano. También establecieron diferencias en los tratamientos dependiendo del tipo de suelo que juega un rol preponderante en la bioremediación, para el suelo arenoso entre los 30 y 60 días de incubación, los microorganismos heterótrofos totales fueron constantes y a los 10 días se disipó el 63% del lindano, a los 60 días de incubación, se removió el 87%, mientras que en el suelo franco limoso se observó una mayor capacidad de disipación de lindano del 50%, esto se debe a que las comunidades microbianas poseen mayores capacidades metabólicas que permiten a los miembros de las comunidades la división del trabajo y la supervivencia ante perturbaciones con mayor predominio de cepas de *Streptomyces* para degradar el lindano, una alta actividad de la dechlorinasa específica, capaz de biotransformar residuos lignocelulósicos especialmente causada por hongos de la pudrición blanca, y a sus enzimas igninolíticas extracelulares (lacasas, ligninoperoxidasas y manganesoperoxidasas) son

capaces de atacar y transformar no sólo la lignina sino también complejos orgánicos contaminantes.

La aplicación de microorganismos heterótrofos y su potencial ha sido también confirmado por Raimondo, et al., (2020), en la remoción de lindano y supervivencia de cepas de *Streptomyces*, señalaron que la disipación del plaguicida fue gradual para el tratamiento por bioaumentación y bioestimulación en un suelo arcilloso con remociones entre 64.4% y 70.8 %, como en suelos arenosos con bioaumentación y bioestimulación a los 14 días de incubación, logrando una eliminación del 86.3 %. Este estudio confirmó la importancia del tipo de suelo, que incluye la materia orgánica, contenido de arcilla, pH, clase textural, nutrientes, contenido de agua, microbiota autóctona, entre otros, los cuales son factores que determinan la adsorción de los plaguicidas y su biodisponibilidad para la degradación microbiana es decir existe una interacción positiva entre el consorcio inoculado y la microbiota autóctona de cada suelo, lo que potenció el proceso de biorremediación.

Huang, et al., (2018) después de 24 h de incubación bacteriana con ftalato de dibutilo (DBP), este componente derivó a contaminantes intermedios de degradación de MBP y PA, primero se hidrolizó primero a mono butil fatalato y luego se hidrolizó más para producir ácido ftálico a través de la ruta de desesterificación, la cepa *Bacillus subtilis* N-1 la cual podría usar los compuestos derivados como fuentes de carbono y degradarlos en purines de *Youngia japonica* dentro de los cinco días de incubación (97.5 % de degradación), proceso relacionado con las enzimas y otros endófitos que habitan en la planta *Y. japonica*. Especialmente en condiciones neutras o alcalinas (pH 7.0 - 9.0).

Tabla 4. Bioremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos

micro/macro organismo	Pais	Contaminante	Cultivo de microorganismo enriquecido con contaminantes	Tiempo	Remocion	Tipo de suelos	
Biomezclas. Desataca Streptomyces Bioaumentación	Argentina	Linadano	Sales nutritivas enriquecidas con extracto	30 y 60 días	suelo arcilloso; Tiempo = 10 días; Remoción 60% 60 días; remoción = 81% el suelo arenoso Tiempo = 10 días; Remoción 63% 60 días; remoción =87% suelo franco limoso remocion 50%,	Suelo limoso (arcilla 2.5%, limo 13.8 % y arena 23.7%) arenoso (arcilla 14.3 %, limo 59.8 % y arena 25.9%) suelo arcilloso (arcilla 2.5%, limo 13.8 % y arena 23.7%)	Saez, et al., (2018)
Bioaumentación suspensión celular de bacterias: Pseudomonas spp. Rhizobium pusense, Ochrobactrum spp. Mesorhizobium wenxiniae xanthomarina, Paracoccus acridae, etc	Rusia	c-HCH –de 0.4 a 53.4 mg/kg y DDT de 0.9 mg/kg	c-HCH –de 0.4 a 53.4 mg/kg y DDT de 0.9 mg/kg		Remoción de lindano en el suelo = 75% Remoción de DDT = 56% Tiempo = 30 días Trébol rojo incrementaron la degradación de organoclorados en el suelo en un 20%.	Suelo sod-podzólico (Retisol) carbono orgánico = 1,66% Nitrógeno = 0,12% pH = 6.3	Wang, et al., (2019)
Bacillus subtilis bioaumentación del lodo vegetal de Youngia japonica	China	ftalato de dibutilo	pH 7,0, 30 °C El DBP fue degradado por Bacillus subtilis N-1 en ftalato de monobutilo y ácido ftálico,	120 h	12,5–100 mg/l 200 mg/L de contaminación Oryza sativa, Ipomoea aquatica Forssk, Zea mays, Ageratum conyzoides LRemocion = 95 % (hasta	-	Huang, et al., (2018)

					100 mg/L de contaminación inicial) tiempo = 5 d t1/2 < 7.23 h Remoción 89% (para concentración de 200 mg/l) t1/2 = 56.8 h Eliminación de Ageratum conyzoides es de n del 97,5		
Bioaumentación	Mexico	hidrocarburos totales de petróleo (HTP), alcanos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).	4 cepas cultivadas en medio de sal nutritivo enriquecido con HTP. Inóculo = 10 % (v/v), en cámara de fermentación Cultivo = 16 h Fase de crecimiento estacionario = 1×10^{13} UFC/mL Consortio mixto encapsulado en matriz de alginato de sodio + arcilla + nanoliposoma (2:1:1 = p/p/v) + CaCl ₂ (2%) Diámetro de cápsulas = 2 mm (diámetro) Células = 6×10^9 CFU/mL Tamaño de poro externo = 6.8 nm.	112 días	menores remociones. 2 kg de mezcla tierra/estiércol/perlita se enmendaron con 300 cápsulas de consorcio bacteriano en 15 mL de agua.		Rodriguez-Campos, et al.,(2019)
consorcio de actinobacterias bioaumentación y bioestimulación		lindano mg/kg	cultivó previamente en TSB, se incubó a 30 °C durante 72 h con agitación	14 d	Suelos franco limosos: 61.4%, arcillosos : 70.8%, arenosos: 86.3% bioestimulación con cachaza de filtración de caña de azúcar. 30 °C durante 14 días	suelo franco limoso: 1 arcilla 4.3%; limo 59.8 %; arena 25.9 % suelo arcillosos: arcilla 62.5 %; limo 13.8 %; arena	Raimondo, et al., (2020)

						23.7% suelo arenosos : arcilla 2.5%, limo 4, arena 93.5% pH = 6.2 - 7.6 carbon organico = 0.58 -0.8 Materia orgabica oxidable = 1 - 1.3 % Fosforo total = 0.002 - 0.004 % Nitrogeno total = 0.04 - 0.1 %
--	--	--	--	--	--	--

OE3: La tabla, muestra aplicaciones de lombrices de tierra en el tratamiento de suelos contaminados con componentes orgánicos. Rodríguez-Campos, et al., (2019), efectuó el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos totales de petróleo (HTP), alcanos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y para ello, combinó el uso de la planta *P. maximum* y lombrices de tierra *P. corethrurus*, los que generaron una macroagregación que incrementó la disponibilidad de nutrientes N/P/K y la densidad aparente del suelo, esto mostro una ventaja porque la lombriz vive en diferentes medios perturbados y generando fuertes interacciones con la microbiota que mineraliza la materia orgánica, las bacterias ayudan a las lombrices a crecer y forman parte de su dieta, pero la presencia de las plantas mejoran las condiciones mediante sus exudados de las raíces que alimentan a la microbiota con proteínas y carbohidratos complejos, estas 3 tecnologías unidas eliminaron significativamente más TPH que la atenuación natural (Rodríguez-Campos, et al., 2019). Sin embargo la lombriz más común es la *Eisenia fétida*, Xu, et al., (2020), expuso esta fauna al pesticida organoclorado lindano contenido en el suelo, el pesticida presentaba diferentes tiempos de envejecimiento, este factor afecto a las lombrices, ya que la exposición al lindano envejecido interrumpió la transmisión de acetilcolina hacia el ácido gamma-aminobutírico y con ello a la expresión génica y la actividad enzimática de la lombriz, implicando que los riesgos a largo plazo de los pesticidas no pueden reducirse simplemente sin causar un efecto secundario. En otros casos el tiempo puede ser muy largo, por ejemplo Anderson et al. (2021) trataron suelos contaminados con diclorodifeniltricloroetano – DDT y sus metabolitos DDx, además del dieldrín en 18 meses incluyendo la aplicación de compostaje para reducir la biodisponibilidad de los pesticidas organoclorados envejecidos en el suelo y demostraron que las enmiendas podían reducir la bioacumulación con el paso del tiempo. Anderson, et al., (2021) explico que el mecanismo de disminución podría estar relacionado con el aumento del metabolismo o la tasa de excreción cuando la toxicidad aumenta a mayor concentración en el suelo, de tal forma que a mayor contenido de plaguicida en el suelo la toxicidad se incrementa conduciendo a la fauna a una mayor mortalidad. Además, Lupi, et al., (2019), evaluó la presencia de endosulfanos en el suelo relacionados con recientes aplicaciones y al transporte ambiental desde otras áreas agrícolas

cercanas, y reportó la presencia de γ -clordano, endosulfanos (isómeros α y β y sulfato de endosulfán) y p,p'-DDT, en conjunto presentaron valores de 1.57 a 4.22 ng/g húmedo, entonces trataron los suelos con la lombriz de tierra además de otra macrofauna, encontrando mucha sensibilidad de la fauna del suelo a los pesticidas, observaron que las raíces de las plantas exudan compuestos orgánicos que podrían mejorar la biodisponibilidad de los contaminantes, y a su vez que el uso de lombrices que degradaban estos compuestos servían como materiales tóxicos para otras especies superiores como las musarañas comunes por ingestión. Es importante tener en cuenta los efectos y la aplicación de técnicas combinadas o asistencias con sustratos o enmiendas, fertilizantes que ayuden a mejorar las condiciones de sobrevivencia de las lombrices.

Tabla 5. Tratamiento de suelos contaminados con compuestos orgánicos, usando lombrices de tierra

micro/macro organismo	País	Contaminante	Cultivo de microorganismo enriquecido con contaminantes	Tiempo	Remoción	Observaciones	Tipo de suelos	Referencias
Lombrices de tierra de la especie <i>P. corethrus</i>	México	Hidrocarburos totales de petróleo (HTP), alcanos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).	-	112 días	<i>P. corethrus</i> + la bacteria: HAP = 54–62 % (2 y 3 anillos); de 56 a 92 % (4 anillos); 80 % (5 anillos); 70 % (6 anillos).	Tierra vegetal; 10 adultos de <i>P. corethrus</i> ; Peso medio = 5.1 g	suelo vertisol pH = 7.8 Conductividad eléctrica = 0.1 mS/cm Fósforo disponible (media) = 9.3 mg/kg Capacidad de intercambio catiónico = 13.6 cmol/kg Materia orgánica = 5.4 % Carbón orgánico = 3.1 % Nitrogeno total = 0.2 % Textura arcillosa = 43.0 % arcilla; 30.3 % limo; 26.7 % arena)	Rodriguez-Campos, et al., (2019)

							Peso suelo contaminado/maceta = 2 Kg Mezclada + 100 g de perlitas + 100 g de estiércol de vaca seco + nutrientes	
<i>E. fetida</i>	China	Lindano	Aclimatamiento: Laboratorio T= 25 24 h de luz Mantenimiento = Suelo + estiércol de vaca. Tiempo = 2 semanas Lombrices adultas sanas Peso fresco medio = 0.5 a 0.8 g Clitelo bien desarrollado Diámetro de partículas de suelo = 2 mm	Días de envejecimiento del suelo (DES): DES = 0 d DES = 0 d + 7 d de exposición DES = 30 d + 7 d de exposición DES = 0 d + 28 d de exposición	Concentración inicial de lindano en suelo = 2,4 µg/g Contenido de lindano en lombrices = 2.99 - 6.56 mg/Kg húmedo	DES = 30 d + 28 d de exposición Uso de Ensayo de actividad de acetilcolinesterasa (AChE) Se usó un ensayo ELISA Lindano inicial en suelo = 0.69 - 1.83 mg/kg húmedo	Textura= franco arcilloso, pH = 7.2, Carbón Orgánico total = 7.94 % CIC = 12.574 cmol/kg	Xu, et al., (2020)
		Diclorodifeniltricloroetano (DDT) Metabolitos de DDT Dieldrín	Acumulación de contaminantes en lombrices dieldrin = hasta	18 meses	<u>Concentraciones finales en el suelo:</u> o,p-DDE :	compost envejecido de 2 y 4 años 224 t secas/ha	pH= 5.87 -6.73 carbono total = 2.24 - 4.91 Humedad (%) =	Anderson, et al., (2021)

			14.58 µg/g húmedo dieldrin en el suelo = hasta 1.75 µg/g húmedo		maximo 0.58 µg/g húmedo p,p- DDE = 13.14 µg/g húmedo p,p-DDD 1.22 µg/g húmedo o,p-DDT = 1.81 µg/g húmedo) p,p-DDT = 14.95 µg/g húmedo		14.7 -20.85	
Mesofauna: Oribatida and Collembola		γ-clordano, α-endosulfán, β-endosulfán	no reporta	no se reporto	Mesofauna: Oribatida and Collembola γ-clordano = 482.9 ng/g α-endosulfán = 220051.4 ng/g β-endosulfán = 40380.0 ng/g Lombriz Oligochaeta: Lumbricus sp. Tiempo = 2 d γ-clordano = 0.13 ng/g α-endosulfán = 24.5 ng/g β-Endosulfan = 16.2 ng/g Sulfato de endosulfán = 3.2	monitoreo	2,8 ng g-1 pH = 5.87 - 6.73 carbon total= 2.24 - 4.91 % humedad = 14.7 - 20.85%	Lupi, et al., (2019)

					ng/g				
--	--	--	--	--	------	--	--	--	--

V. CONCLUSIONES

OE1: La aplicación de plantas para los procesos de fitorremediación de suelos contaminados suele aplicarse para degradar los hidrocarburos de petróleo, sus derivados, hidrocarburos polinucleoaromáticos, además de los hidrocarburos clorinados como son los plaguicidas organoclorados y PCBs, también se cuentan los contaminantes emergentes entre otros como la cipermetropina etc, estos componentes atacan a las raíces de las plantas y pueden causarles daño debido a los efectos de transpiración desde las raíces de la planta, la volatilización, etc, por esta razón generalmente, las plantas son asistidas por el uso de enmiendas, potenciadores, nutrientes, etc. de tal forma que vitalizan las plantas y pueden lograr un mayor crecimiento, tamaño de raíces y mayor biomasa, contenido de clorofila esto incluye a los distintos contaminantes, también ocurren estrategias como las podas de árboles que se usan en la fitorremediación cuya corte de primera vez genera un incremento en el contenido de los contaminantes pero que a través de los años, la tendencia disminuye, se ha sabido que la combinación de la fitorremediación con la bioremediación brinda un mejor soporte para activar la dinámica de microbiana que ejerce una sinergia con los exudados de la planta alimentándose de sus residuos exudados y disolviendo materiales para nutrimentos para el desarrollo de la planta. Los tiempos de fitorremediación son muy variados, desde meses hasta años, en el caso de la aplicación de árboles y las hojas y raíces son capaces de alojar los componentes en sus hojas. También se combina la técnica de fitorremediación con técnicas fisicoquímicas, destacando la electrofitorremediación, que puede causar cierto daño a las partes próximas de la planta y en otros mejorar el crecimiento de las plantas y mejorar la remoción de los compuestos orgánicos debido a la distribución del campo eléctrico en el suelo.

OE2: La bioremediación es una técnica eco-amigable que dispone del universo de microorganismos con distintos potenciales para utilizar los contaminantes orgánicos como fuente de carbono, las cepas aisladas desde las fuentes de suelo contaminado resultan muy apropiadas como organismos destructores de las moléculas orgánicas, desde los compuestos hidrocarbonados hasta

estructuras aromáticas, clorinadas, especialmente cuando se aplican en la forma de consorcios, han destacado no solo en forma de consorcios sino también asociadas a lombrices, plantas y hasta macrofauna, debido a su amplia dinámica, producción de enzimas que degradan los complejos más persistentes o recalcitrantes el lindano es ampliamente estudiado seguido del DDT, PCBs entre las estructuras tratadas, el tipo de suelo también es una variable crucial en las remediaciones. Un suelo más arcilloso puede proveer mejores fuentes de pata la adaptación de los microorganismos heterótrofos, comparado con suelos arenosos debido a un mayor contenido de sales y de materia orgánica, microorganismos como *Streptomyces* *Bacillus subtilis*, entre otros son ampliamente estudiados. La bioaugmentación y bioestimulación suele combinarse comúnmente para aumentar la eficiencia de los procesos de degradación.

OE3: La vermiremediación forma parte de la bioremediación, y comprende el uso de lombrices de tierra que debido a su comportamiento de construcción de agujeros que mantiene la oxigenación en el suelo favoreciendo la provisión de nutrientes y dinámica microbiana necesaria para mejorar la calidad del suelo, esta macrofauna es usada en la degradación de contaminantes orgánicos, petrolígenos y organoclorados entre otros, sin embargo está íntimamente interaccionado con la comunidad microbiana, la degradación de los químicos contaminantes depende de las condiciones fisicoquímicas del suelo, las lombrices pueden ser afectadas con grandes concentraciones de los componentes orgánicos por eso las investigaciones consideran el enriquecimiento de los suelos con sales nutrientes, enmiendas, para mejorar el efecto de los compuestos en la interrupción de la transmisión de acetilcolina hacia el ácido gamma-aminobutírico que inhibe la expresión génica y la actividad enzimática propia generando efectos secundarios en la lombriz, además estas en un campo real bajo estas condiciones resultarían tóxicas como alimento de otras especies de macrofauna superior.

VI. RECOMENDACIONES

Debido a que las técnicas de bioremediación por si solas presenta menor eficiencia, se sugiere probar diversas combinaciones para potenciar los procesos de remediación de suelos dependiendo de factores intrínsecos como el tipo de suelos, el tipo de contaminantes, la comunidad microbiana nativa, el tipo de lombrices y otros organismos que puedan generar sinergia en la degradación de los compuestos químicos contaminantes, sin embargo, es apropiado también evaluar los efectos secundarios que podrían causar estos tratamientos sobre la biodiversidad del entorno.

Referencias

ABO-STATE, M. A. M., RIAD, B. Y., BAKR, A. A., & Abdel Aziz, M. F. (2018). Biodegradation of naphthalene by *Bordetella avium* isolated from petroleum refinery wastewater in Egypt and its pathway. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 11(1), 1–9. doi:10.1016/j.jrras.2017.10.001

AIOUB, A.A.A., LI, Y., QIE, X. et al. Reduction of soil contamination by cypermethrin residues using phytoremediation with *Plantago major* and some surfactants. *Environ Sci Eur* 31, 26 (2019). <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0210-4>

AMECHI S. NWANKWEGU, Lei ZHANG, Deti Xie, Chukwudi O. Onwosi, Wada I. Muhammad, Chuks K. Odoh, Kabari Sam, John N. Idenyi. Bioaugmentation as a green technology for hydrocarbon pollution remediation. *Problems and prospects. Journal of Environmental Management*. Volume 304, 2022, 114313. ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114313>.

ANDERSON Marya O., ZIJANG Yang, CATHLEEN J. Hapeman, Laura L. McConnell, Carrie Green, Dana Jackson, Michael N. Evans, Alba Torrents. On-site evaluation of the effects of carbonaceous amendments on the bioavailability of aged organochlorine pesticide residues in soil. *Environmental Advances*. Volume 6. 2021. 100126. ISSN 2666-7657. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100126>.

BAOUNE, H., APARICIO, J. D., ACUÑA, A., El Hadj-khelil, A. O., Sanchez, L., Polti, M. A., & Alvarez, A. (2019). Effectiveness of the *Zea mays*-*Streptomyces* association for the phytoremediation of petroleum hydrocarbons impacted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184, 109591. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.109591

BURGES, A., ALKORTA, I., EPELDE, L., & Garbisu, C. (2017). From phytoremediation of soil contaminants to phytomanagement of ecosystem

services in metal contaminated sites. *International Journal of Phytoremediation*, 20(4), 384–397. doi:10.1080/15226514.2017.1365340

CHANG, W., AKBARI, A., DAVID, C. A., & Ghoshal, S. (2018). Selective biostimulation of cold and salt-tolerant hydrocarbon-degrading *Dietzia maris* in petroleum-contaminated subArctic soils with high salinity. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(1), 294–304. doi:10.1002/jctb.5385

FARAG Aida M., ASMAA Fawzy, MOUSTAFA Y. El-Naggar, Khaled M. Ghanem. Biodegradation and enhancement of 2,4-dichlorophenol by marine halophilic *Bacillus subtilis* AAK. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*. 47(2), 2021, 117-123. ISSN 1687-4285. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2021.04.005>.

FORTIN Faubert, MAXIME, Dominic Desjardins, Mohamed Hijri, and Michel Labrecque. 2021. "Willows Used for Phytoremediation Increased Organic Contaminant Concentrations in Soil Surface" *Applied Sciences* 11, no. 7: 2979. <https://doi.org/10.3390/app11072979>

GODHEJA, J. et al. (2019). Environmental Remediation: Microbial and Nonmicrobial Prospects. In: Singh, D., Gupta, V., Prabha, R. (eds) *Microbial Interventions in Agriculture and Environment*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8383-0_13

GONÇALVES, C., Wisecaver, J. H., Kominek, J., Oom, M. S., Leandro, M. J., Shen, X.-X., ... Gonçalves, P. (2018). Evidence for loss and reacquisition of alcoholic fermentation in a fructophilic yeast lineage. *eLife*, 7, e33034. <https://doi.org/10.7554/eLife.33034>

HUANG Yu-Hong, XUE-JING Huang, XIAO-HONG Chen, Quan-Ying Cai, Shaohua Chen, Ce-Hui Mo, Huixiong Lü, Ming-Hung Wong, Biodegradation of di-butyl phthalate (DBP) by a novel endophytic bacterium *Bacillus subtilis* and its bioaugmentation for removing DBP from vegetation slurry, *Journal of Environmental Management* (2018), doi: 10.1016/j.jenvman. 2018.07.023

HUU-TUAN Tran, CHITSAN Lin, XUAN Thanh Bui, Tomoaki Itayama, Bao Trong Dang, Nicholas Kiprotich Cheruiyot, Hong Giang Hoang, Chi Thanh Vu. Bacterial community progression during food waste composting containing high dioctyl terephthalate (DOTP) concentration. *Chemosphere*. Volume 265, 2021, 129064, ISSN 0045-6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129064>.

JIANLONG G, YIFAN Z, YOUNG-JUNG H, Soo-Jin P (2019) Advanced design and synthesis of composite photocatalysts for the remediation of wastewater: a review. *Catalysts* 9:122 Kalliola S et al (2016)

JOHNSEN, ANDERs R. UFFE S. Boe, Peter Henriksen, Linus M.V. Malmquist, Jan H. Christensen. Full-scale bioremediation of diesel-polluted soil in an Arctic landfarm. *Environmental Pollution*. Volume 280. 2021, 116946, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116946>.

KIM, J., LEE, A. H., & CHANG, W. (2018). Enhanced bioremediation of nutrient-amended, petroleum hydrocarbon-contaminated soils over a cold-climate winter: the rate and extent of hydrocarbon biodegradation and microbial response in a pilot-scale biopile subjected to natural seasonal freeze-thaw temperatures. *Science of the Total Environment*, 612, 903–913. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.08.227

LEE, G. L. Y., AHMAD, S. A., YASID, N. A., Zulkharnain, A., Convey, P., Wan Johari, W. L., ... Shukor, M. Y. (2018). Biodegradation of phenol by cold-adapted bacteria from Antarctic soils. *Polar Biology*, 41(3), 553–562. doi:10.1007/s00300-017-2216-y

LI Changfeng, KEHAI Zhou, WENQIANG Qin, Changjiu Tian, Miao Qi, Xiaoming Yan & Wenbing Han (2019): A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, DOI: 10.1080/15320383.2019.1592108

LI Lin, XIUFANG Shang, XIAOJIE Sun, Xinfeng Xiao, Jianliang Xue, Yu Gao, Hongge Gao. Bioremediation potential of hexavalent chromium by a novel bacterium *Stenotrophomonas acidaminiphila* 4-1. *Environmental Technology & Innovation*. 22, 2021, 101409. ISSN 2352-1864. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101409>.

LIU, X., SHEN, S., ZHANG, X., Chen, X., Jin, R., & Li, X. (2020). Effect of enhancers on the phytoremediation of soils polluted by pyrene and Ni using Sudan grass (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.). *Environmental Science and Pollution Research*. doi:10.1007/s11356-020-09934-3

LUPI, L., BEDMAR, F., WUNDERLIN, D. A., & Miglioranza, K. S. B. (2019). Levels of organochlorine pesticides in soils, mesofauna and streamwater from an agricultural watershed in Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 78(18). doi:10.1007/s12665-019-8579-3

MAGOCHA, T.A., ZABED, H., YANG, M., Yun, J., Zhang, H. and Qi, X., (2018). Improvement of industrially important microbial strains by genome shuffling: Current status and future prospects. *Bioresource technology*, 257, 281-289; doi.org/ 10.1016/j.biortech.2018.02.118

NAZAROVA, E.A., NAZAROV, A.V., EGOROVA, D.O. et al. Influence of destructive bacteria and red clover (*trifolium pratense* L.) on the pesticides degradation in the soil. *Environ Geochem Health* 44, 399–408 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00821-5>

OKOH, E., YELEBE, Z. R., ORUABENA, B., Nelson, E. S., & Indiamawe, O. P. (2019). Clean-up of crude oil-contaminated soils: bioremediation option. *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi:10.1007/s13762-019-02605-y

OLUYOYE et al (2019) Beyond the obvious: environmental health implications of polar polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ Int* 123:543–557

PANDEY Prabhat and MISHRA Pandey Meenu. 2015. Research Methodology: Tools And Techniques. Bridge Center 2015. <http://dspace.vnbrims.org:13000/jspui/bitstream/123456789/4666/1/RESEARCH%20METHODOLOGY%20TOOLS%20AND%20TECHNIQUES.pdf>

PINO, N. J., MÚNERA, L. M., & PEÑUELA, G. A. (2019). Phytoremediation of soil contaminated with PCBs using different plants and their associated microbial communities. *International Journal of Phytoremediation*, 1–9. doi:10.1080/15226514.2018.1524832

RADA, Elena C., GIANNI Andreottola, Irina A. ISTRATE, Paolo Viotti, Fabio Conti, and Elena R. Magaril. 2019. "Remediation of Soil Polluted by Organic Compounds Through Chemical Oxidation and Phytoremediation Combined with DCT" *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16, no. 17: 3179. <https://doi.org/10.3390/ijerph16173179>

RADZIEMSKA, M., KODA, E., BILGIN, A., and Vaverková, M. D. 2018. Concept of aided phytostabilization of contaminated soils in postindustrial areas. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 24, 1–15. doi:10.3390/ijerph15010024

RAIMONDO Enzo E., JUAN D. Aparicio, Ana L. BIGLIARDO, María S. Fuentes, Claudia S. Benimeli. Enhanced bioremediation of lindane-contaminated soils through microbial bioaugmentation assisted by biostimulation with sugarcane filter cake. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Volume 190. 2020. 110143. ISSN 0147-6513. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110143>

RODRIGUEZ-CAMPOS, J., PERALES-GARCIA, A., HERNANDEZ-CARBALLO, J. et al. Bioremediation of soil contaminated by hydrocarbons with the combination of three technologies: bioaugmentation, phytoremediation, and vermiremediation. *J Soils Sediments* 19, 1981–1994 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2213-y>

SABA Miri, MITRA Naghdi, TAREK Rouissi, Satinder Kaur Brar & Richard Martel (2018): Recent biotechnological advances in petroleum hydrocarbons

degradation under cold climate conditions: A review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, DOI: 10.1080/10643389.2018.1552070

SAEZ, J. M., BIGLIARDO, A. L., RAIMONDO, E. E., Briceño, G. E., Polti, M. A., & Benimeli, C. S. (2018). Lindane dissipation in a biomixture: Effect of soil properties and bioaugmentation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 156, 97–105. doi:10.1016/j.ecoenv.2018.03.011

SAKSHI, Singh, S. K., & HARITASH, A. K. (2021). Catabolic enzyme activities during biodegradation of three-ring PAHs by novel DTU-1Y and DTU-7P strains isolated from petroleum-contaminated soil. *Archives of Microbiology*, 203(6), 3101–3110. doi:10.1007/s00203-021-02297-4

SHARMA, B., DANGI, A. K., & SHUKLA, P. (2018). Contemporary enzyme based technologies for bioremediation: A review. *Journal of Environmental Management*, 210, 10–22. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.12.075

SHI, Z., LIU, J., TANG, Z., Zhao, Y., & Wang, C. (2020). Vermiremediation of organically contaminated soils: Concepts, current status, and future perspectives. *Applied Soil Ecology*, 147, 103377. doi:10.1016/j.apsoil.2019.10337

STELIGA, T., & KLUK, D. (2020). Application of *Festuca arundinacea* in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194, 110409. doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110409

UMAR Zubairu Darma, ABD Aziz Nor Azwady, SYAIZWAN Zahmir Zulkifli, Mustafa Muskhazli. Effective phenanthrene and pyrene biodegradation using *Enterobacter* sp. MM087 (KT933254) isolated from used engine oil contaminated soil. *Egyptian Journal of Petroleum*. Volume 27, Issue 3, 2018, Pages 349-359. ISSN 1110-0621. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.06.001>.

VERMA Samakshi, ARINDAM Kuila. Bioremediation of heavy metals by microbial process. *Environmental Technology & Innovation*. 14, 2019, 100369. ISSN 2352-1864. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100369>.

WANG, Y., ZHANG, X., WANG, L., Wang, C., Fan, W., Wang, M., & Wang, J. (2019). Effective biodegradation of pentachloronitrobenzene by a novel strain *Pseudomonas putida* QTH3 isolated from contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182, 109463. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.109463

WEI Yanchen, JIXIANG Chen, YONGGANG Wang, Tongtong Meng & Mei Li (2021) Bioremediation of the Petroleum Contaminated Desert Steppe Soil with *Rhodococcus erythropolis* KB1 and Its Effect on the Bacterial Communities of the Soils, *Geomicrobiology Journal*, 38:10, 842-849, DOI: 10.1080/01490451.2021.1964111

WU Mengxi, QIAO Luo, SHILIANG Liu, Yin Zhao, Yue Long, Yuanzhi Pan. Screening ornamental plants to identify potential Cd hyperaccumulators for bioremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Volume 162. 2018, 35-41. ISSN 0147-6513. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.049>.

XAVIER J.C., P.E.S. COSTA, D.C. Hissa, V.M.M. MELO, R.M. Falcão, V.Q. Balbino, L.A.R. Mendonça, M.G.S. Lima, H.D.M. Coutinho, L.C.L. Verde. Evaluation of the microbial diversity and heavy metal resistance genes of a microbial community on contaminated environment. *Applied Geochemistry*. 105, 2019, 1-6. ISSN 0883-2927. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.012>.

XIE, Hui, RUIYUAN Liu, YUXIN Xu, Xin Liu, Fengxia Sun, Yuhan Ma, and Yuying Wang. 2022. "Effect of In Situ Bioremediation of Soil Contaminated with DDT and DDE by *Stenotrophomonas* sp. Strain DXZ9 and Ryegrass on Soil Microorganism" *Microbiology Research* 13, no. 1: 64-86. <https://doi.org/10.3390/microbiolres13010005>

XU Jinlan, JUAN Du, LU Li, Qiuju Zhang, Ziwei Chen. Fast-stimulating bioremediation of macro crude oil in soils using matching Fenton pre-oxidation.

Chemosphere. 252, 2020, 126622. ISSN 0045-6535.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126622>.

XU Ting, Juanjuan Miao, YAWEN Chen, Daqiang Yin, SHUANGQING Hu, G. Daniel Sheng, The long-term environmental risks from the aging of organochlorine pesticide lindane. Environment International. Volume 141. 2020. 105778. ISSN 0160-4120. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105778>.

