

Biorremediación de pesticidas, identificación de microorganismos y estrategias de trabajo.

*Restrepo Cifuentes Valentina, Valencia Jiménez Isabella¹,
Gaviria Arias Duverney²*

RESUMEN

Este artículo de revisión aborda exhaustivamente la problemática del uso de pesticidas en la agricultura colombiana, comenzando con una contextualización su importancia, seguido de una clasificación detallada de los tipos de pesticidas utilizados. Adicionalmente, se examina la situación específica en Colombia, incluyendo tendencias, regulaciones y prácticas agrícolas comunes, con un énfasis los efectos nocivos de la contaminación de aguas y suelos debido a la aplicación de pesticidas, tanto en términos ambientales como en la salud humana y animal. Finalmente, se presenta y explora en detalle las técnicas de biorremediación y fitorremediación como estrategias prometedoras para el tratamiento y degradación de pesticidas, destacando las especies microbianas utilizadas en estos procesos. El documento, proporciona una visión integral de los desafíos y las soluciones relacionados con el uso de pesticidas en la agricultura colombiana, subrayando la necesidad de enfoques sostenibles para mitigar los impactos negativos en el medio ambiente y la salud.

Palabras clave : Biorremediación, Degradación, Metabolismo, Microorganismos, Pesticidas.

1. Estudiantes programa de Microbiología. Facultad de Ciencias de la Salud, Exactas y Naturales. Universidad Libre Pereira. Correo electrónico: valentina-restreoc@unilibre.edu.co
2. Profesor programa de Microbiología. Facultad de Ciencias de la Salud, Exactas y Naturales. Universidad Libre Pereira. Correo electrónico: duverney.gaviria@unilibre.edu.co

Bioremediation of pesticides, identification of microorganisms and work strategies

ABSTRACT

This review article exhaustively addresses the problem of pesticide use in Colombian agriculture, beginning with a contextualization of its importance, followed by a detailed classification of the types of pesticides used. Additionally, the specific situation in Colombia is examined, including trends, regulations and common agricultural practices, with an emphasis on the harmful effects of water and soil contamination due to the application of pesticides, both in environmental terms and on human and animal health. . Finally, bioremediation and phytoremediation techniques are presented and explored in detail as promising strategies for the treatment and degradation of pesticides, highlighting the microbial species used in these processes.

The document provides a comprehensive view of the challenges and solutions related to the use of pesticides in Colombian agriculture, highlighting the need for sustainable approaches to mitigate negative impacts on the environment and health.

Key words: Bioremediation, Degradation, Metabolism, Microorganisms, Pesticides.

INTRODUCCIÓN

Los pesticidas son sustancias químicas tóxicas a ciertas plagas y son introducidos al medio ambiente para hacer su trabajo en la agricultura y otros campos. Sin embargo, su uso desregulado tiene efectos tóxicos (1). La principal problemática de los pesticidas es su impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana, debido a que pueden contaminar el aire, el agua y el suelo, lo que tiene efectos negativos en la biodiversidad y la calidad de vida de las personas. Además, la exposición a los pesticidas puede causar problemas de salud, como cáncer, enfermedades respiratorias, trastornos neurológicos y reproductivos (2).

La biorremediación es una estrategia que utiliza microorganismos para degradar contaminantes orgánicos en el medio ambiente, transformándolos en compuestos no tóxicos o menos tóxicos (3). En el caso de los pesticidas, la biorremediación puede ser una alternativa para combatir su uso desregulado y reducir su impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana, por ende, representa una estrategia complementaria a otras prácticas agrícolas sostenibles, como la rotación de cultivos y el uso de pesticidas naturales (4).

Uso de pesticidas en agricultura

Generalmente, se calcula que cada año se utilizan entre 1 y 2,5 millones de toneladas de ingredientes activos de plaguicidas, principalmente en la agricultura, debido

a que juegan un papel importante en el desarrollo al reducir las pérdidas de productos, al mejorar el rendimiento cosechable y la calidad de los alimentos (5,6).

Los pesticidas son una parte importante de la agricultura colombiana. Se utilizan para controlar las plagas, las enfermedades y las malas hierbas, que pueden causar daños a los cultivos y reducir los rendimientos (7). En Colombia, el uso de pesticidas está regulado por el Gobierno Nacional, a través de una serie de normas y decretos emitidos por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (8). Las principales normas que regulan el uso de pesticidas en Colombia son el Decreto 1843 de 1991 que reglamenta el control y vigilancia epidemiológica en el uso y manejo de plaguicidas, con el objeto de evitar que afecten la salud de la comunidad, la sanidad animal y vegetal o causen deterioro en el ambiente, la Resolución 683 de 2008 que establece los requisitos para el registro de plaguicidas químicos de uso agrícola y la Decisión 436 de 1998 que es un reglamento Andino de plaguicidas químicos que establece los requisitos mínimos para la protección de la salud humana y el medio ambiente en la región.

El uso de pesticidas en Colombia está sujeto a una serie de requisitos, todos los plaguicidas químicos de uso agrícola

deben estar registrados ante el ICA antes de su comercialización y deben tener un etiquetado que incluya información sobre su composición, toxicidad, precauciones de uso y manejo, el incumplimiento de las normas sobre el uso de pesticidas en Colombia puede conllevar sanciones administrativas, civiles o penales (9).

Usos pesticidas en Colombia

Durante la década del 70, en Colombia se intensificó el uso de plaguicidas, principalmente en cultivos de algodón, maíz, arroz y papa, que consumieron más del 90% del total de los insecticidas producidos (6), donde el algodón demandó el mayor consumo, con un 45% del total (10). Como respuesta al incremento de la demanda de plaguicidas en dichos años, la producción de este tipo de sustancias también se incrementó en el país con el fin de satisfacer la creciente demanda, diseñando formulaciones que fuesen técnica y económicamente eficientes para el agricultor. Es así como, con un mismo ingrediente activo, se fabricaron varias formulaciones a diferentes concentraciones e incluso en diferentes presentaciones (líquidos o sólidos), situación que impidió que se pudiera consolidar el volumen total producido a partir de la información de la cantidad de ingrediente activo que ingresó al país (11). Sin embargo, el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), firmado en mayo del 2001 por el Gobierno Nacional, incluye doce sustancias que representan alto

riesgo para la salud y el ambiente, entre las cuales se encuentran nueve plaguicidas organoclorados, dadas sus características de toxicidad, estabilidad y persistencia (12). Actualmente, entre las alternativas a los plaguicidas COP se encuentran los insecticidas organofosforados, carbamatos, piretrinas y piretroides, estas sustancias poseen diferentes grados de toxicidad, sin embargo, su uso indiscriminado puede ocasionar graves daños en la salud (19).

De acuerdo con el ICA, en Colombia se utilizan alrededor de 1.000 productos formulados de plaguicidas químicos, de los cuales alrededor de 700 están registrados para su uso agrícola (13). En Colombia se utilizan más de 800 ingredientes activos de pesticidas (15), y los plaguicidas más utilizados en Colombia son los insecticidas organofosforados, el endosulfán, los organoclorados, los neonicotinoides, herbicidas (2,4-D, paraquat y glifosato) y fungicidas (clorotalonil y mancozeb) y el 80% de estos pesticidas se usan en los cultivos de café, arroz, soja, algodón y palma de aceite (14). En Colombia, el uso de pesticidas está regulado por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). El ICA es responsable de registrar y autorizar los pesticidas para su uso en el país, supervisar el uso de pesticidas y de tomar medidas contra el uso ilegal o inapropiado. El uso de pesticidas en Colombia ha aumentado en los últimos años debido a una serie de factores como el crecimiento de la producción agrícola, la creciente resistencia de las plagas a los pesticidas y

el cambio climático, que puede favorecer la proliferación de plagas y enfermedades (16). En los últimos años, el uso de pesticidas en la agricultura colombiana ha aumentado ligeramente, pasando de 91.277 toneladas en 2018 a 100.000 toneladas en 2022 (17).

TIPOS DE PLAGUICIDAS

Desde el descubrimiento de ciertos compuestos organoclorados sintéticos como insecticidas en la década de 1940, se han desarrollado y comercializado un gran número de clases de plaguicidas químicos con diferentes usos y modos de acción, lo que permitió un mayor aumento en la producción de alimentos. Sin embargo, solo el 1 % del total de pesticidas se usa de manera efectiva para controlar las plagas objetivo. Las grandes cantidades de pesticidas restantes penetran o alcanzan plantas, por lo que la contaminación por pesticidas ha contaminado el medio ambiente y causado impactos negativos en la salud humana (6,18).

Adicionalmente, los plaguicidas se clasifican según sus fuentes de origen químicos o bioplaguicidas. Los plaguicidas biológicos son específicos del huésped, amigables con el medio ambiente, altamente específicos en el sentido de que actúan sobre la plaga objetivo y organismos fuertemente relacionados, mientras que los plaguicidas químicos son inespecíficos con una amplia gama de actividades sobre un gran grupo de organismos no objetivo (19). En este grupo

de sustancias se encuentran principalmente utilizadas como insecticidas, fungicidas, bactericidas, herbicidas, rodenticidas, entre otras. Se reconoce que los plaguicidas desempeñan un papel importante en el desarrollo agrícola porque pueden reducir las pérdidas de productos agrícolas y mejorar el rendimiento y la calidad asequibles de los alimentos (20).

- Los insecticidas son de origen químico o biológico y están destinados a controlar y matar insectos, se utilizan sobre todo en la agricultura, la horticultura y la silvicultura, por lo que los agricultores, los trabajadores agrícolas y sus familias están muy expuestos a estas sustancias químicas. Los insecticidas también se utilizan para controlar vectores como los mosquitos y las garrapatas, que están implicados en la propagación de enfermedades de salud pública como la malaria, la enfermedad del Nilo Occidental, la enfermedad de Lyme y otras. Debido a las diferencias en sus estructuras químicas, los insecticidas interactúan con diferentes sitios diana y no diana, incluyendo receptores, enzimas y muchas otras moléculas conocidas y desconocidas. La mayoría de los insecticidas son neurotóxicos porque se dirigen al sistema nervioso, pero también pueden dirigirse a otros órganos y sistemas del cuerpo (21).
- Por otro lado, los fungicidas se utilizan para suprimir el crecimiento de hongos o esporas fúngicas. Desempeñan un

papel importante en la protección de frutas, verduras y tubérculos durante su almacenamiento, de igual manera, son útiles para proteger cultivos en pie, árboles, plantas ornamentales y césped. Hay diferentes tipos, principalmente, los fungicidas de contacto protegen el tejido de la planta por vía tópica, los fungicidas translaminares se redistribuyen desde la superficie superior de la hoja rociada a la superficie inferior no rociada, y los fungicidas sistémicos penetran en el tejido de la planta y se distribuyen por los vasos del xilema por toda la planta (22).

- De igual manera, las enfermedades bacterianas pueden ser especialmente difíciles de controlar porque las bacterias se reproducen con rapidez, pueden propagarse por el viento, la lluvia, los insectos, otros animales o incluso los seres humanos, y a menudo residen en el interior de tejidos vegetales como las hojas o el sistema vascular. La gestión de las enfermedades causadas por bacterias es más eficaz mediante un enfoque integrado, incluyendo la resistencia del huésped, la disponibilidad, y aplicaciones de bactericidas, agentes de control biológico o inductores de resistencia sistémica adquirida (SAR). Entre los bactericidas, los antibióticos se utilizan a menudo en el tratamiento de las plantas para controlar las

enfermedades bacterianas. Aunque originalmente los antibióticos eran compuestos producidos por microorganismos para inhibir a otros microorganismos, en la actualidad existen muchos antibióticos sintéticos. Estos pueden ser bactericidas, es decir, que matan a las bacterias o pueden ser bacteriostáticos, lo que significa que inhiben el crecimiento de las bacterias, pero no las matan como la estreptomicina y la oxitetraciclina, dos antibióticos muy utilizados en la agricultura, tanto en plantas como en animales (23).

- Consiguientemente, los herbicidas son productos químicos utilizados para suprimir o matar plantas, o para interrumpir gravemente sus procesos normales de crecimiento. Se utilizan en ecosistemas agrícolas, acuáticos, forestales y silvestres para reducir la densidad de vegetación no deseada (malas hierbas) y permitir el crecimiento de especies deseables. Con el tiempo, el uso de herbicidas en los ecosistemas agrícolas reduce la densidad de las malas hierbas y también puede seleccionar especies adaptadas a los productos químicos concretos, reduciendo así la diversidad de especies de malas hierbas. En los ecosistemas silvestres, los herbicidas se utilizan a veces para reducir la densidad de especies de malas hierbas exóticas o invasoras y aumentar así indirectamente la diversidad de especies autóctonas o deseables (24).

- Por último, los rodenticidas son plaguicidas que matan roedores. Los roedores no son sólo ratas y ratones, sino también ardillas, marmotas, ardillas listadas y otros animales. Aunque los roedores desempeñan un papel importante en la naturaleza, a veces es necesario controlarlos debido a que pueden dañar los cultivos, infringir las normas de vivienda, transmitir enfermedades y, en algunos casos, causar daños ecológicos. Los rodenticidas suelen estar formulados como cebos, diseñados para atraer a los animales, entre ellos están los aromatizantes que pueden incluir aceite de pescado, melaza o mantequilla de cacahuete. Los cebos utilizados en la agricultura y las zonas naturales pueden contener carne picada, verduras, cereales o frutas (25).

Los plaguicidas usados para contrarrestar estas plagas pueden clasificarse en diversos tipos según su estructura química. Los organoclorados son compuestos orgánicos con múltiples átomos de cloro. Fueron los primeros pesticidas sintéticos que se utilizaron en la agricultura y se reconocen por ser resistentes a la mayoría de las degradaciones microbianas y químicas, además estimulan el sistema nervioso central y provocan convulsiones, temblores, náuseas y confusión mental. Algunos ejemplos son el diclorodifeniltricloroetano (DDT), el clordano, el lindano, el endosulfán y la dieldrina (26).

- Los organofosfatos son plaguicidas

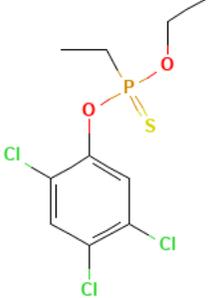
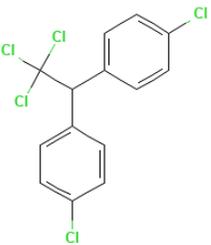
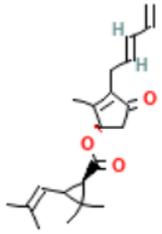
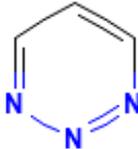
que contienen fosfatos en su estructura y se forman por esterificación del ácido fosfórico. Son solubles en agua y, por lo tanto, tienen menos posibilidades de acumularse en el tejido biológico, sin embargo, intervienen en la inactivación de la acetilcolinesterasa. Algunos ejemplos son el malatión, los glifosatos, el paratión, el diazinón, el tetraclorovinfos y el fosmet. Los carbamatos son derivados del ácido carbámico. El mecanismo de acción de los carbamatos es el mismo que el de los organofosforados, ya que inhiben la actividad de la acetilcolinesterasa y tienen una baja tasa de persistencia, ya que pueden hidrolizarse fácilmente (26).

- De igual manera, las flores de los piretros producen piretrinas, que poseen una gran actividad plaguicida. Estos compuestos naturales se degradan fotoquímicamente y son menos estables en el medio ambiente. Los análogos sintéticos (piretroides) de la piretrina se desarrollaron introduciendo una fracción bifenoxi y sustituyendo los átomos de hidrógeno por átomos de halógeno. El primer piretroide sintético desarrollado fue la aletrina y el primer piretroide fotoquímicamente estable fue la permetrina y algunos ejemplos son la cipermetrina y la deltametrina (26).
-
- Los carbamatos también se utilizan ampliamente como pesticidas. Su mecanismo de acción, al igual que el

de los OP, es la inhibición del acetil colinesterasa (AChE). La toxicidad de los compuestos carbamatos varía en función de la estructura molecular, pero en general la inhibición de la AChE es de menor duración que la de los OP. En consecuencia, la gravedad y la duración de la toxicidad son menores. Algunos carbamatos, como el disulfiram (Antabuse) y la piridostigmina, son incluso lo suficientemente leves como para utilizarse con fines médicos (27).

- Finalmente, los herbicidas de triazina constituyen una clase de productos químicos para la protección de cultivos de gran importancia agronómica en todo el mundo. Esta clase de herbicidas incluye las triazinas asimétricas metribuzin y metamitron, los herbicidas triazínicos simétricos y la hexazinona. Los herbicidas triazínicos inhiben la fotosíntesis en ciertas malezas de hoja ancha y gramíneas, y generalmente tienen una baja toxicidad para los animales. La evaluación de los perfiles de riesgo de los herbicidas triazínicos revela que estos productos no suelen ser tóxicos agudos, son bien tolerados cuando se administran a animales durante un largo periodo de tiempo y no causan defectos de nacimiento ni afectan a la reproducción, de igual manera no producen cáncer en ratones ni en ratas macho (10).

Tabla 1: Estructuras químicas de los principales tipos de pesticidas (28).

Tipos de plaguicida	Nombre del ejemplo	Estructura química
Organofosforados	Tricloronato	
Organoclorados	Clufenotano	
Piretroides	Piretrinas	
Carbamatos	N-(3,4-diclorofenil) carbamato de metilo	
Triazinas	Triazina	

Realizado con PubChem: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>

SUELOS

Al entrar en los ecosistemas, los pesticidas pueden estar expuestos a trasladados desde el sitio objetivo a otros medios ambientales o plantas no objetivo mediante procesos de transferencia que incluyen adsorción, lixiviación, volatilización, deriva del rociado y escorrentía. Además, se pueden generar procesos de degradación, donde los plaguicidas en el medio ambiente producen nuevos productos químicos (29). Los diferentes tipos de productos químicos indican sus diferencias en el comportamiento ambiental, por ejemplo, los compuestos organoclorados como el DDT tienen una toxicidad aguda baja, pero muestran una capacidad significativa para acumularse en los tejidos y persisten en causar daños a largo plazo (30).

La contaminación del suelo y agua por pesticidas es un problema que puede tener graves consecuencias en el medio ambiente y la salud humana (31). Los pesticidas aplicados a los suelos arenosos o de grano grueso son más propensos a filtrarse a través del suelo y contaminar el agua (32). Las sustancias químicas presentes en los pesticidas pueden afectar negativamente a todo el medio ambiente, incluyendo la biodiversidad, la calidad del agua y la salud humana estos pesticidas pueden permanecer en el suelo durante años, lo que puede afectar la calidad del suelo y la salud de las plantas que crecen en él. Además, los pesticidas pueden ser arrastrados por la lluvia y el viento, lo que puede afectar a las

áreas circundantes (33)

Problemas a la salud humana, animal

Los pesticidas pueden causar una serie de problemas de salud, incluyendo daño al sistema nervioso, reproductivo e inmunitario. También pueden aumentar el riesgo de cáncer, enfermedades respiratorias, problemas de desarrollo y defectos de nacimiento (34). Los pesticidas pueden entrar en el cuerpo humano a través de la piel, la inhalación o la ingestión y las personas que trabajan en la agricultura tienen un mayor riesgo de exposición a los pesticidas (35). Los pesticidas pueden afectar la salud humana a través de una variedad de mecanismos, como el daño celular de forma directa o indirecta. Pueden interferir con los procesos celulares normales, como la división celular, la síntesis de proteínas o la respiración celular así como pueden interferir con el funcionamiento de las hormonas, lo que puede causar una serie de problemas de salud, incluyendo problemas reproductivos, cáncer y enfermedades del sistema nervioso, también pueden causar inflamación, que puede dañar los órganos y tejidos y provocar reacciones alérgicas, que pueden causar síntomas como urticaria, dificultad para respirar y anafilaxia (36). Los pesticidas organoclorados, como el DDT, pueden causar daño al sistema nervioso, lo que puede provocar problemas de aprendizaje, memoria y coordinación, los pesticidas organofosforados, como el paratión, pueden interferir con la función de las enzimas, lo que puede provocar

problemas respiratorios, convulsiones y parálisis, los pesticidas piretroides, como la permetrina, pueden causar irritación de la piel, los ojos y las vías respiratorias y los pesticidas herbicidas, como el glifosato, pueden causar daño al sistema reproductivo, lo que puede provocar problemas de fertilidad (37).

Los niños y las mujeres embarazadas son especialmente vulnerables a los efectos de los pesticidas. Los niños están en desarrollo y sus sistemas corporales aún no están completamente maduros, por lo que son más sensibles a los efectos tóxicos de los pesticidas. Las mujeres embarazadas pueden transmitir los pesticidas a sus bebés a través de la placenta, lo que puede causar problemas de salud en el bebé (38).

Igualmente, los pesticidas pueden tener efectos negativos en los animales, tanto domésticos como silvestres. Pueden causar daño al sistema nervioso, reproductivo e inmunitario, así como problemas de comportamiento y muerte (39). Los animales domésticos pueden verse expuestos a los pesticidas a través de la dieta, el contacto con la piel o la inhalación, viendo que los animales silvestres pueden verse expuestos a los pesticidas a través de la dieta, el contacto con el agua o el aire. Los pesticidas pueden dañar a los animales a través de una variedad de mecanismos, incluyendo el daño a las células, la interferencia con las hormonas, la inflamación y las alergias (40).

BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación es una técnica que utiliza microorganismos para degradar contaminantes orgánicos presentes en el ambiente, transformándolos en compuestos menos tóxicos (41). En el caso de la contaminación del suelo y agua por pesticidas, la biorremediación puede ser una alternativa para combatir su uso desregulado y reducir su impacto negativo (42).

FITORREMEDIACION

La degradación de los plaguicidas implica procesos de transformación bióticos y abióticos, como reacciones químicas y fotoquímicas. Los procesos de transformación a los que se somete un plaguicida vienen determinados por su afinidad estructural a determinados tipos de transformación y por las condiciones ambientales a las que se ve expuesto como consecuencia de su distribución y transporte (43). Por ejemplo, los gradientes redox en suelos, sedimentos o acuíferos suelen determinar qué transformaciones bióticas y/o abióticas pueden tener lugar. De forma similar, las transformaciones fotoquímicas están restringidas a los compartimentos expuestos a la luz solar, por ejemplo, los metros superiores de los lagos o ríos, las superficies de las plantas o las capas submilimétricas del suelo, entre esas alternativas se encuentra la fitorremediación, un conjunto de tecnologías que reducen in situ o ex situ la concentración de diversos compuestos a partir de procesos

bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas (44). Más específicamente, la biodegradación está generalmente reconocida como la vía más importante de degradación de los plaguicidas desde el punto de vista del balance de masas. Mientras que las plantas, los animales y los hongos suelen transformar los plaguicidas para desintoxicarlos o mediante metabolismo fortuito por enzimas de amplio espectro, las bacterias los metabolizan más comúnmente para asimilarlos como nutrientes esenciales y energía (18).

La biorremediación, que utiliza organismos vivos y sus procesos para degradar o detoxificar contaminantes ambientales, es un método rentable y seguro para el medio ambiente para descontaminar suelos y aguas contaminados, y se perfila como una alternativa a las costosas tecnologías de remediación fisicoquímica. Ciertos microorganismos, especialmente bacterias, microalgas y cianobacterias, tienen la capacidad de utilizar contaminantes orgánicos peligrosos como fuentes de carbono, energía u otros nutrientes (45).

ESTRATEGIAS BIORREMEDIACIÓN

Varias técnicas están disponibles para la biodegradación de plaguicidas, que podrían desarrollarse en condiciones aeróbicas o anaeróbicas según los tipos de microorganismos (45). Por otro lado, las técnicas de biorremediación se pueden dividir en tres categorías dependiendo

de dónde se realice el tratamiento de remediación, a saber, *in situ*, *ex situ* o *in situ*. En el enfoque *in situ*, el tratamiento se realiza en la zona contaminada y, por lo general, el proceso es aeróbico. Las principales técnicas *in situ* son la atenuación natural, la bioaumentación, la bioestimulación, la bioventilación y la bioaspersión (45,46).

La atenuación natural es una técnica que se basa en la capacidad natural del suelo y los microorganismos presentes en él para degradar los contaminantes, la atenuación natural es un proceso lento y puede llevar años para que los contaminantes se degraden por completo (44). Por otro lado la bioaumentación consiste en la adición de microorganismos específicos que son capaces de degradar los contaminantes presentes en el suelo o agua, los microorganismos se agregan al suelo o agua contaminada para acelerar el proceso de degradación, mientras que la bioestimulación consta de la adición de nutrientes limitantes para apoyar o estimular los microorganismos nativos existentes en el medio ambiente que pueden llevar a cabo la biorremediación, los nutrientes adicionales pueden ser nitrógeno, fósforo o carbono (47).

La bioventilación es otra técnica que se utiliza para tratar la contaminación del suelo por compuestos orgánicos volátiles, la bioventilación implica la inyección de aire en el suelo contaminado para estimular el crecimiento de microorganismos que

pueden degradar los contaminantes, mientras que la bioaspersión se usa para tratar la contaminación del agua por compuestos orgánicos volátiles, la bioaspersión implica la pulverización de una solución de microorganismos en el agua contaminada para degradar los contaminantes (48).

En los métodos *ex situ*, el suelo contaminado se retira de los sitios contaminados y se transporta a otros lugares para su tratamiento. Los biorreactores, el compostaje, el *landfarming* y las biopilas son tratamientos *ex situ* (49). El enfoque en el sitio consiste en el tratamiento del suelo contaminado en el sitio circundante, es decir, el suelo se retira de su posición original, pero se limpia en el vecindario sin ningún impacto debido a su transporte (43).

Los biorreactores son sistemas cerrados que se utilizan para tratar grandes volúmenes de suelo o agua contaminada, los microorganismos se agregan al biorreactor junto con nutrientes y oxígeno para acelerar el proceso de degradación de los contaminantes por otro lado el compostaje es una técnica que utiliza microorganismos para descomponer la materia orgánica presente en el suelo contaminado y transformarla en compost, el compostaje es una técnica sencilla y económica que se puede utilizar para tratar pequeñas cantidades de suelo contaminado, además existe el *landfarming*, otra técnica que implica la aplicación de suelo limpio sobre el suelo contaminado y la adición

de nutrientes y microorganismos para acelerar el proceso de degradación de los contaminantes, el suelo contaminado se mezcla con el suelo limpio y se deja reposar durante un período de tiempo para que los microorganismos puedan degradar los contaminantes. Adicionalmente, las biopilas son montones de suelo contaminado que se mezclan con nutrientes y microorganismos para acelerar el proceso de degradación de los contaminantes, por ende, tienen un sistema de aireación, de recolección de lixiviados y de control de gases (50).

Especies microorganismos usados

En consecuencia, se llegan a reconocer los microorganismos desde un énfasis de bioprospección, que se basa en el estudio y clasificación de microorganismos con valor industrial (51). Diferentes investigaciones a nivel mundial se están enfocando en el estudio de moléculas naturales que pueden ser utilizadas para la medicina, la agricultura y el medio ambiente, entre otros (52). La bioprospección como herramienta para buscar nuevas alternativas de fertilización o control biológico de patógenos podría minimizar el uso de sustancias químicas y a largo plazo podría contribuir con la preservación del medio ambiente (53).

En Colombia, la bioprospección microbiana es muy importante en los sectores ambiental, industrial y de medicina veterinaria, con investigaciones enfocadas en el potencial de los microorganismos (51). Las ventajas

ambientales del uso de microorganismos son evidentes en las actividades agrícolas, ya que sus actividades metabólicas descontaminan suelos y degradan residuos contaminantes mejorando la estructura de los suelos y favoreciendo la fijación de nitrógeno o solubilizando fosfatos (54).

Los microorganismos son capaces de degradar los pesticidas y reducir su impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana. Algunas especies de microorganismos que se han identificado como capaces de degradar pesticidas incluyen bacterias, hongos y actinomicetos (55). Los mecanismos de degradación de los pesticidas por los microorganismos pueden incluir la hidrólisis, la oxidación, la reducción y la sustitución de grupos funcionales. Los microorganismos pueden utilizar los pesticidas como fuente de carbono y energía, lo que les permite crecer y reproducirse en el medio ambiente contaminado (56). Se ha identificado que la capacidad de los microorganismos para degradar los pesticidas puede verse afectada por factores ambientales como la temperatura, la humedad y el pH (57).

Algunos grupos químicos de pesticidas que pueden ser degradados por microorganismos incluyen organofosforados, organoclorados, carbamatos, Piretroides y Triazinas, la capacidad de los microorganismos para degradar estos compuestos tiene una alta variedad lo que se puede traducir como una lista muy extensa de especies degradadoras no obstante se tiene información más detallada y estudios de algunos grupos en

específicos aquellos que han sido usados en una mayor cantidad de ensayos de biorremediación. En la tabla 2 se encuentra información de estos microorganismos cuál es su grupo químico blanco, su mecanismo de degradación, con respecto a la información sobre el porcentaje de eficiencia de degradación este puede variar según el tipo de pesticida, el microorganismo y las condiciones ambientales (53).

Por lo tanto, no se puede establecer un dato preciso para cada combinación de pesticida y microorganismo. En general, la eficiencia de degradación puede variar desde menos del 10% hasta más del 90%, dependiendo de las condiciones por esto es importante realizar estudios previos para determinar la eficacia de la biorremediación en cada caso específico(3).

CONCLUSIONES

En este artículo de revisión, se exploró la biorremediación como una estrategia prometedora para abordar la contaminación causada por pesticidas en el medio ambiente. En el desarrollo del texto se identificó una serie de microorganismos altamente especializados que desempeñan un papel fundamental en la degradación de pesticidas, destacando su versatilidad y capacidad para adaptarse a diversos contaminantes. En consecuencia, se postularon estrategias de trabajo efectivas, como la bioaumentación y la bioestimulación, que optimizan la eficiencia de la biorremediación.

La biorremediación representa una solución

sostenible y respetuosa con el medio ambiente para combatir la contaminación por pesticidas. A medida que se presentan desafíos de la agricultura moderna y la preservación del ecosistema, es esencial explorar y aplicar activamente estas técnicas. Sin embargo, se debe reconocer la existencia de obstáculos y complejidades, como la adaptación de microorganismos a pesticidas específicos y la necesidad de regulaciones adecuadas.

En última instancia, la investigación en biorremediación de pesticidas sigue siendo un campo en constante evolución que

requiere colaboración interdisciplinaria y un compromiso continuo para desarrollar enfoques innovadores y sostenibles. Este artículo ha proporcionado una base sólida para comprender los aspectos clave de la biorremediación de pesticidas y esperamos que inspire futuras investigaciones y acciones encaminadas a mitigar los impactos negativos de los pesticidas en nuestro entorno.

Referencias bibliográficas

1. Salazar-Flores J, Lomelí-Martínez SM, Ceja-Gálvez HR, Torres-Jasso JH, Torres-Reyes LA, Torres-Sánchez ED. Impacts of Pesticides on Oral Cavity Health and Ecosystems: A Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Sep 1;19(18).
2. Voltz M, Guibaud G, Dagès C, Douzals JP, Guibal R, Grimbuhler S, et al. Pesticide and agro-ecological transition: assessing the environmental and human impacts of pesticides and limiting their use. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022 Jan 1;29(1).
3. Islas-García A, Vega-Loyo L, Aguilar-López R, Xoconostle-Cázares B, Rodríguez-Vázquez R. Evaluation of hydrocarbons and organochlorine pesticides and their tolerant microorganisms from an agricultural soil to define its bioremediation feasibility. *J Environ Sci Health B*. 2015 Feb 1;50(2):99–108.
4. Thomas G, Withall D, Birkett M. Harnessing microbial volatiles to replace pesticides and fertilizers. *Microb Biotechnol*. 2020 Sep 1;13(5):1366–76.
5. Parween T, Jan S. Pesticides and environmental ecology. *Ecophysiology of Pesticides*.

2019 Jan 1;1–38.

6. Tudi M, Ruan HD, Wang L, Lyu J, Sadler R, Connell D, et al. Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2021 Feb 1 [cited 2023 Sep 7];18(3):1–24. Available from: [/pmc/articles/PMC7908628/](#)
7. Fu H, Tan P, Wang R, Li S, Liu H, Yang Y, et al. Advances in organophosphorus pesticides pollution: Current status and challenges in ecotoxicological, sustainable agriculture, and degradation strategies. *J Hazard Mater*. 2022 Feb 15;424.
8. Hoyos LS, Carvajal S, Solano L, Rodriguez J, Orozco L, Lopez Y, et al. Monitoreo Citogenético de Agricultores expuestos a plaguicidas en Colombia . *Ambiental* [Internet]. 1996 [cited 2023 Sep 6];1(3):535–8. Available from: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/abs/10.1289/ehp.96104s3535>
9. López D, Ahumada D, Díaz A, Guerrero J. Evaluación de residuos de plaguicidas en miel de diferentes regiones geográficas de Colombia. *Control alimentario* [Internet]. 2014 [cited 2023 Sep 6]; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095671351300457X>
10. De Colombia R. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
11. Hoyos LS, Carvajal S, Solano L, Rodriguez J, Orozco L, López Y, et al. Cytogenetic monitoring of farmers exposed to pesticides in Colombia. *Environ Health Perspect*. 1996;104(SUPPL. 3):535–8.
12. Arias L, Bojacá C, Ahumada D, Schrevens E. Monitoreo de residuos de plaguicidas en tomate comercializado en Bogotá, Colombia. *Control de Alimentos* [Internet]. 2014 [cited 2023 Sep 6]; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713513003290>
13. Varela-Martínez D, González-Curbelo M. Análisis de alto rendimiento de pesticidas en frutas tropicales menores de Colombia. *Química de los alimentos* [Internet]. 2019 [cited 2023 Sep 6]; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814618321496>
14. Valbuena D, Cely-Santos M, Environmental DOJ of, 2021 undefined. Agrochemical pesticide production, trade, and hazard: Narrowing the information gap in Colombia. Elsevier [Internet]. [cited 2023 Sep 6]; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721002036>

15. Feola G, protection CBC, 2010 undefined. Identifying and investigating pesticide application types to promote a more sustainable pesticide use. The case of smallholders in Boyacá, Colombia. Elsevier [Internet]. [cited 2023 Sep 6]; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219410000207>
16. Bellotti A, Cardona C, Agricultural SLJ of, 1990 undefined. Trends in pesticide use in Colombia and Brazil. researchgate.net [Internet]. [cited 2023 Sep 6]; Available from: https://www.researchgate.net/profile/Stephen-Lapointe/publication/268425227_TRENDS_IN_PESTICIDE_USE_IN_COLOMBIA_AND_BRAZIL%27/links/54c64d670cf219bbe4f7fd8d/TRENDS-IN-PESTICIDE-USE-IN-COLOMBIA-AND-BRAZIL.pdf
17. Bojacá C, Arias L, Ahumada D, control HCF, 2013 undefined. Evaluation of pesticide residues in open field and greenhouse tomatoes from Colombia. Elsevier [Internet]. [cited 2023 Sep 6]; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095671351200463X>
18. Fenner K, Canonica S, Wackett LP, Elsner M. Evaluating pesticide degradation in the environment: blind spots and emerging opportunities. Science [Internet]. 2013 [cited 2023 Sep 7];341(6147):752–8. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23950532/>
19. Abubakar Y, Tijjani H, Egbuna C, Adetunji CO, Kala S, Kryeziu TL, et al. Pesticides, History, and Classification. Natural Remedies for Pest, Disease and Weed Control. 2020 Jan 1;29–42.
20. Gupta RC, Milatovic D. Insecticides. Biomarkers in Toxicology. 2014 Jan 1;389–407.
21. Singh PK, Singh RP, Singh P, Singh RL. Food Hazards: Physical, Chemical, and Biological. Food Safety and Human Health. 2019 Jan 1;15–65.
22. Albrecht U, Archer L, Roberts P. HS1366/HS1366: Antibiotics in Crop Production [Internet]. [cited 2023 Sep 7]. Available from: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS1366>
23. Holt JS. Herbicides. Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition. 2013 Jan 1;87–95.
24. RODENTICIDES TOPIC FACT SHEET What are rodenticides? [cited 2023 Sep 7]; Available from: <http://www.epa.gov/oppfead1/labeling/lrm/chap-07.pdf>
25. Horsak RD, Bedient PB, Hamilton MC, Thomas F Ben. Pesticides. Environmental Forensics: Contaminant Specific Guide. 1964 Jan 1;143–65.

26. Eicher TJ. Toxic Encephalopathies I: Cortical and Mixed Encephalopathies. *Clinical Neurotoxicology: Syndromes, Substances, Environments, Expert Consult - Online and Print*. 2009 Jan 1;69–87.
27. Breckenridge CB, Werner C, Stevens JT, Sumner DD. Hazard Assessment for Selected Symmetrical and Asymmetrical Triazine Herbicides. *The Triazine Herbicides*. 2008 Jan 1;387–98.
28. PubChem [Internet]. [cited 2023 Sep 7]. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
29. Curl CL, Spivak M, Phinney R, Montrose L. Synthetic Pesticides and Health in Vulnerable Populations: Agricultural Workers. *Curr Environ Health Rep*. 2020 Mar 1;7(1):13–29.
30. Merhi A, Kordahi R, Hassan HF. A review on the pesticides in coffee: Usage, health effects, detection, and mitigation. *Front Public Health*. 2022 Nov 8;10.
31. Issa ST, Takshe AA, Alwan NH, ElBarazi I. Editorial: Pesticides exposure and public health. *Front Public Health* [Internet]. 2023 [cited 2023 Sep 6];11:1211115. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/37469699>
32. Tudi M, Ruan HD, Wang L, Lyu J, Sadler R, Connell D, et al. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Feb 1;18(3):1–24.
33. Fucic A, Duca R, Galea KS, Maric T, Garcia K, Bloom M, et al. Reproductive health risks associated with occupational and environmental exposure to pesticides. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 Jun 2;18(12).
34. Blair A, Ritz B, Wesseling C, Freeman LB. Pesticides and human health. *Occup Environ Med*. 2015 Feb 1;72(2):81–2.
35. Souza GDS, da Costa LCA, Maciel AC, Reis FDV, Pamplona YDAP. Presença de agrotóxicos na atmosfera e risco à saúde humana: Uma discussão para a vigilância em saúde ambiental. *Ciencia e Saude Coletiva*. 2017 Oct 1;22(10):3269–80.
36. Ritter L, Goushoeff NCI, Arbuckle T, Cole D, Raizenne M. Addressing the linkage between exposure to pesticides and human health effects - Research trends and priorities for research. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*. 2006 Jun 1;9(6):441–56.
37. Waichman AV, Römcke J, Ribeiro MOA, Nina NCS. Use and fate of pesticides in the Amazon State, Brazil: Risk to human health and the environment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2002;9(6):423–8.

38. Mamane A, Baldi I, Tessier JF, Raheison C, Bouvier G. Occupational exposure to pesticides and respiratory health. *European Respiratory Review*. 2015 Jun 1;24(136):306–19.
39. Hoque MS, Tamanna F, Hasan MM, Al Banna MH, Mondal P, Prodhan MDH, et al. Probabilistic public health risks associated with pesticides and heavy metal exposure through consumption of common dried fish in coastal regions of Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022 Mar 1;29(14):20112–27.
40. Suratman S, Edwards JW, Babina K. Organophosphate pesticides exposure among farmworkers: Pathways and risk of adverse health effects. *Rev Environ Health*. 2015 Mar 1;30(1):65–79.
41. Chaudhari YS, Kumar P, Soni S, Gacem A, Kumar V, Singh S, et al. An inclusive outlook on the fate and persistence of pesticides in the environment and integrated eco-technologies for their degradation. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2023 May 1;466.
42. Dar MA, Kaushik G, Villarreal-Chiu JF. Pollution status and bioremediation of chlorpyrifos in environmental matrices by the application of bacterial communities: A review. *J Environ Manage*. 2019 Jun 1;239:124–36.
43. Iyer R, Iken B, Damania A. A comparison of organophosphate degradation genes and bioremediation applications. *Environ Microbiol Rep*. 2013 Dec;5(6):787–98.
44. Mali H, Shah C, Raghunandan BH, Prajapati AS, Patel DH, Trivedi U, et al. Organophosphate pesticides an emerging environmental contaminant: Pollution, toxicity, bioremediation progress, and remaining challenges. *J Environ Sci (China)*. 2023 May 1;127:234–50.
45. Megharaj M, Venkateswarlu K, Naidu R. Bioremediation. *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*. 2014 Jan 1;485–9.
46. Azubuike CC, Chikere CB, Okpokwasili GC. Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol*. 2016 Nov 1;32(11).
47. Patel AK, Singhanian RR, Pal A, Chen CW, Pandey A, Dong C Di. Advances on tailored biochar for bioremediation of antibiotics, pesticides and polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants from aqueous and solid phases. *Science of the Total Environment*. 2022 Apr 15;817.
48. Lin C, Cheruiyot NK, Bui XT, Ngo HH. Composting and its application in bioremediation of organic contaminants. *Bioengineered*. 2022;13(1):1073–89.

49. Dash DM, Osborne WJ. A systematic review on the implementation of advanced and evolutionary biotechnological tools for efficient bioremediation of organophosphorus pesticides. *Chemosphere*. 2023 Feb 1;313.
50. Nie J, Sun Y, Zhou Y, Kumar M, Usman M, Li J, et al. Bioremediation of water containing pesticides by microalgae: Mechanisms, methods, and prospects for future research. *Science of the Total Environment*. 2020 Mar 10;707.
51. Cubides C, Gutiérrez-Cortés C, Suarez H, Cubides C, Gutiérrez-Cortés C, Suarez H. Bioprospecting in food production: an approximation of the current state in Colombia. *Rev Fac Nac Agron Medellin* [Internet]. 2023 [cited 2023 Sep 7];76(1):10227–46. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472023000110227&lng=en&nrm=iso&tlng=en
52. Hage-Ahmed K, Rosner K, Steinkellner S. Arbuscular mycorrhizal fungi and their response to pesticides. *Pest Manag Sci*. 2019 Mar 1;75(3):583–90.
53. Sheng Y, Benmati M, Guendouzi S, Benmati H, Yuan Y, Song J, et al. Latest eco-friendly approaches for pesticides decontamination using microorganisms and consortia microalgae: A comprehensive insights, challenges, and perspectives. *Chemosphere*. 2022 Dec 1;308.
54. Tudi M, Ruan HD, Wang L, Lyu J, Sadler R, Connell D, et al. Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2021 Feb 1 [cited 2023 Sep 7];18(3):1–24. Available from: [/pmc/articles/PMC7908628/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/347908628/)
55. Bahrulolum H, Nooraei S, Javanshir N, Tarrahimofrad H, Mirbagheri VS, Easton AJ, et al. Green synthesis of metal nanoparticles using microorganisms and their application in the agrifood sector. *J Nanobiotechnology*. 2021 Dec 1;19(1).
56. Sun M, Xu W, Zhang W, Guang C, Mu W. Microbial elimination of carbamate pesticides: specific strains and promising enzymes. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2022 Sep 1;106(18):5973–86.
57. Manikandan SK, Pallavi P, Shetty K, Bhattacharjee D, Giannakoudakis DA, Katsoyiannis IA, et al. Effective Usage of Biochar and Microorganisms for the Removal of Heavy Metal Ions and Pesticides. *Molecules*. 2023 Jan 1;28(2).