

El compostaje: una alternativa para la recuperación de suelos contaminados por agroquímicos para el pequeño productor

Composting: an alternative for soil recovery by agrochemical contaminants for the small producer

Henry Giovanni Jaimes-Díaz^{1*},  Irina Suárez-Chacón¹, 
José Camilo Torres-Romero² 

Cómo citar este artículo: Jaimes-Díaz HG, Suárez-Chacón I, Torres-Romero JC. (2021). El compostaje: una alternativa para la recuperación de suelos contaminados por agroquímicos para el pequeño productor. Revista Ciencias Agropecuarias. 2021;7(1):51-67. DOI:

¹ Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Unad), Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (Ecapma), Especialización en Biotecnología Agraria, Bogotá (Colombia).

² Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Unad), Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (Ecapma), Especialización en Biotecnología Agraria - Ciab, Dosquebradas, Risaralda (Colombia).

* Autor de correspondencia:
hgjaimesd@ufpso.edu.co

Resumen

Alternativas para mitigar en el suelo efectos tóxicos a causa de la utilización de agroquímicos es una necesidad que se impone en función de la problemática ambiental cada vez más creciente en el planeta. Salidas biotecnológicas desde un enfoque agroambiental son pertinentes en el contexto actual de los pequeños campesinos que ahora pueden utilizar a la biotecnología e información disponible en internet como herramientas para mitigar las consecuencias de la liberación de agroquímicos. El presente trabajo tuvo como objetivo proponer alternativas para la recuperación de suelos contaminados por agroquímicos mediante el uso de compostaje en el contexto colombiano. En el estudio se desarrolló una investigación bibliográfica de enfoque cualitativo, en la que se realizó una revisión en diversas bases de datos entre ellas Scopus, ScienceDirect, SciELO, Google

Palabras clave:

agroquímicos,
 biorremediación,
 compostaje,
 microorganismos, suelo.

Keywords: Agrochemicals,

Bioremediation,
 Composting,
 Microorganisms, Soil.

Scholar (GS) y repositorios institucionales. Se encontraron variadas formas para realizar compostaje que resultan en un proceso de descontaminación del suelo; sin embargo, esta información está segregada sin tener en cuenta particularidades del territorio del pequeño productor. Se presentan como resultado, algunas alternativas que seguro pueden ser útiles para la recuperación de suelos para la producción a pequeña escala considerando sus particularidades.

Abstract

Alternatives to mitigate toxic effects in the soil due to the use of agrochemicals is a necessity that is imposed based on the increasingly growing environmental problems on the planet. Biotechnological exits from an agri-environmental approach are relevant in the current context of small farmers who can now use biotechnology and information available on the internet as tools to mitigate the consequences of the release of agrochemicals. The present work aimed to propose alternatives for the recovery of soil contaminated by agrochemicals using composting in the Colombian context. In the study, a qualitative approach bibliographic research was carried out, in which a review was carried out using various databases including Scopus, Science-Direct, SciELO, Google Scholar (GS) and institutional repositories. Various ways to compost were found that result in a soil decontamination process, however, this information is segregated without considering the particularities of the small producer's territory. As a result, some alternatives are presented that can surely be useful for the recovery of soils in the small-scale production considering certain features.

Introducción

La contaminación ambiental es uno de los principales problemas a los que se enfrenta la sociedad actual, la cual genera daños al ser humano y a los ecosistemas (1,2). Dentro de esta crisis, el aspecto más importante es el uso indiscriminado de agroquímicos para el control de plagas en los cultivos (3,4); se ha comprobado que solo el 0,1 % de estas sustancias químicas cumplen su objetivo y que el 99,9 % restante

se queda disperso en el medio, contaminando agua, suelo, fauna y flora (3,5).

Los agroquímicos son sustancias utilizadas en la actividad agrícola y ganadera, entre los que se pueden identificar como fertilizantes y plaguicidas (6), dentro de estos últimos tenemos los insecticidas, fungicidas, herbicidas y acaricidas empleados como controladores de

plagas y enfermedades en plantas y el ganado. Muchos de los agroquímicos que llegan al suelo, dependiendo de su composición química, no pueden ser biodegradados y persisten por diversos periodos, por ejemplo, los agroquímicos que contienen arsénico no tienen un tiempo definido de persistencia; sin embargo, los organofosforados pueden permanecer en el suelo de una a doce semanas, los carbamatos de una a ocho semanas y la atrazina de uno a dos meses (7). Es así como estas sustancias en su proceso de degradación o acumulación en los suelos hacen que se modifiquen los ciclos biogeoquímicos y que aparezcan determinados componentes que originan cambios importantes en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (8). La disminución de la biodiversidad del suelo, el deterioro en la permeabilidad y la actividad productiva y su erosión son algunos efectos de los agroquímicos en este recurso (9).

No obstante, a pesar de que se conocen los efectos contaminantes de los agroquímicos sobre el suelo, sobre su microbiota y los seres humanos (10,11), y de que se han realizado trabajos de investigación y publicaciones sobre el uso de diferentes alternativas para la recuperación de suelos (12), todo este conocimiento no se ha articulado para generar avances más concretos que permitan identificar verdaderas soluciones a los problemas del medio y, para este caso, el restablecimiento de esta matriz tan importante, haciendo uso del compostaje. A partir de esta situación, se hace necesario cuestionarse ¿qué alternativas de solución existen para la recuperación de suelos contaminados con agroquímicos implementando el compostaje?, lo cual permite unificar conocimientos y presentar diversas opciones que contribuyan al mejoramiento de las condiciones edáficas. En este trabajo se presenta una recopilación del uso del compostaje para la biorremediación del suelo y se proponen alternativas para su recuperación

en zonas contaminadas por agroquímicos en el contexto colombiano y la región de Ocaña, Norte de Santander.

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló a través de una investigación básica de enfoque cualitativo, en la cual se realizó una revisión documental. La información contenida en el estudio tiene como línea de apoyo la consulta de diferentes bases de datos entre ellas Scopus, Science-Direct, SciELO, Google Scholar (GS) y repositorios institucionales. Las categorías utilizadas para la consecución de la información fueron palabras o combinaciones de palabras entre las que están: agroquímicos, composting, bioremediation, soil, compostaje, agroquímicos contaminación, agroquímicos contaminación del suelo, compostaje biorremediación de suelos, compostaje biorremediación de suelos contaminados y compostaje biorremediación de suelos contaminados con agroquímicos. En los criterios de selección de la información se resalta el uso de bases de datos idóneas, fuentes primarias y confiables, idiomas (español-inglés), tema de estudio, revisión del título y resumen. Finalmente, se efectuó una lectura crítica y un análisis de la información.

Resultados

El compostaje, una alternativa para la agricultura en Colombia

El compostaje es el proceso biológico oxigénico mediante el cual los microorganismos actúan sobre una materia orgánica biodegradable, lo que permite obtener compost, un abono de excelente calidad para la agricultura (13). La

utilización del compost en el suelo es de gran importancia ya que restaura la flora, evita así la desertización, mejora la estructura física del suelo y logra aumentar su permeabilidad, aporta macronutrientes N, P, K para fortalecer la capacidad de intercambio catiónico y recupera la actividad biológica porque ayuda a la nutrición de los microorganismos. Asimismo, el uso del compost contribuye al restablecimiento de las características físicas del suelo como la infiltración y conductividad hidráulica (14). Sin embargo, la utilización del compost tiene desventajas económicas ya que la inversión es un poco costosa por los equipos que se necesitan y las adecuaciones en las instalaciones; también hay que disponer de un terreno para los materiales de partida, la etapa de maduración y la de almacenamiento del producto terminado (15).

Los abonos orgánicos son de gran importancia ya que aportan grandes beneficios en los procesos agrícolas, como sustrato o medio de cultivo, cobertura, mantenimiento de los niveles originales de materia orgánica del suelo y complemento o reemplazo de los fertilizantes de síntesis; siendo este último el de más relevancia debido a su mayor uso en los sistemas de biodegradación y de prácticas amigables con el ambiente (16). Estos abonos orgánicos (compost y biosólidos, entre otros) u órgano-minerales presentan parte del N en formas orgánicas, más o menos estables, que paulatinamente se van mineralizando y pasando a disposición de las plantas (17). Además, mejoran las condiciones bioquímicas y microbiológicas del suelo, y son un potencial biorremediador y restaurador (18).

En los últimos cuarenta años, los productores redujeron la aplicación de abonos orgánicos a causa del inicio de una agricultura intensiva (19), lo que generó una disminución en el uso de fertilizantes orgánicos hasta un punto en el

que la aplicación de los inorgánicos se convirtió en un problema ambiental en muchos lugares del mundo (20). No obstante, el costo de los fertilizantes minerales obliga a la búsqueda y evaluación de alternativas para el manejo de la nutrición vegetal; dentro de los más destacados y de mayor acceso para los agricultores está el reciclado de nutrientes a partir de fuentes como el compostaje, el uso de estiércol de origen animal y otras fuentes propias de los sistemas productivos como la pulpa de café y los residuos de cosecha, que se constituyen en las materias primas del proceso (21). Existen varios tipos de compostaje, dependiendo de cómo se obtiene el compost. Algunos utilizan sistemas biológicos como las lombrices (vermicompostaje) y las aves (avicompostaje), otros son implementados por el hombre a partir de materiales de desechos, como el bocashi y el compost tradicional (22).

El proceso de compostaje se desarrolla en cuatro fases dependientes de la temperatura: fase mesófila, fase termófila, fase de enfriamiento y fase de maduración. La fase mesófila se caracteriza porque la actividad metabólica de los microorganismos produce un aumento de la temperatura entre 40 y 45 °C en un periodo de 8 a 16 días, el pH desciende y se estabiliza entre 4 y 5.5, lo cual permite las reacciones de descomposición de la materia orgánica para la obtención de carbono y nitrógeno, la producción de CO₂ y la generación de calor. Las bacterias mesófilas implicadas en esta primera fase pertenecen a las familias: *Alcaligenaceae*, *Alteromonadaceae*, *Bacillaceae*, *Burkholderiaceae*, *Bradyrhizobiaceae*, *Caryophanaceae*, *Caulobacteraceae*, *Cellulomonadaceae*, *Clostridiaceae*, *Comamonadaceae*, *Corynebacteriaceae*, *Enterobacteriaceae*, *Flavobacteriaceae*, *Flexibacteraceae*, *Hyphomicrobiaceae*, *Intrasporangiaceae*, *Methylobacteriaceae*, *Microbacteriaceae*, *Micrococcaceae*, *Moraxellaceae*, *Neisseriaceae*,

Nitrosomonadaceae, *Nocardiopsaceae*,
Paenibacillaceae, *Phyllobacteriaceae*,
Propionibacteriaceae, *Pseudomonadaceae*,
Pseudonocardiaceae, *Rhodobacteraceae*,
Sphingobacteriaceae, *Staphylococcaceae*, y
Xanthomonadaceae, específicamente géneros
 como *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Thiobacillus*,
Enterobacter, *Streptomyces* y bacterias celulíticas
 como las *Celullomonas*. Entre los hongos
 están los géneros *Levaduras*, *Aspergillus* y
Penicillium, seguidos de *Trichoderma*, *Mucor*,
Rhizopus, *Cladosporium*, *Backusella*, *Ulocladium*,
Acremonium, *Fusarium*, *Scopulariopsis* y
Geotrichum (23).

El calor generado en la fase anterior permite un aumento de la temperatura que puede alcanzar los 45 y 70 °C, lo cual da paso a la fase termofílica, en la que los microorganismos termófilos (hongos y bacterias) (Tabla 1) degradan componentes de la materia orgánica como la celulosa y la lignina; además transforman el nitrógeno en amoníaco (mineralización) por lo que el pH sube hasta tornarse alcalino. Por encima de los 60 °C, los hongos termófilos no sobreviven, aparecen bacterias que producen endosporas y actinobacterias, que descomponen hemicelulosas, proteínas y lípidos. Además, se produce lentamente la pasteurización del medio, eliminando bacterias patógenas como *Escherichia coli* y *Salmonella* sp., huevos de parásitos, esporas de hongos y semillas de malezas.

En la fase de enfriamiento, se da un descenso en la temperatura (40-45 °C) originado por la disminución de la actividad metabólica y compuestos asimilables por microorganismos termófilos. De esta manera, el material descompuesto en gran parte es invadido de nuevo por microorganismos mesófilos que terminan de degradar compuestos lignocelulósicos restantes. La mayoría de los microorganismos presentes en esta fase tienen

actividad proteolítica, amonificante, amilolítica, celulolítica, fijación de nitrógeno, desnitrificante y sulfato reductora.

Tabla 1. Bacterias y hongos presentes en la fase termofílica del proceso de compostaje.

Bacterias	Hongos
<i>Thermomonospora</i> sp.	<i>Mucor pusillus</i>
<i>Thermoactinomyces</i> sp.	<i>Torula thermophila</i>
<i>Clostridium thermocellum</i>	<i>Thermoascus aurantiacus</i>
<i>Bacillus</i> sp. <i>Estearthermophilus</i> sp.	<i>Geotrichum candidum</i>
	<i>Chaetomium thermophilus</i>
	<i>Aspergillus fumigatus</i>
	<i>Penicillium</i> sp.

Fuente: (24).

Por último, la fase de maduración se da a temperatura ambiente, el pH se neutraliza y ocurren reacciones de síntesis de compuestos de carbono como los ácidos húmicos y fúlvicos. Esta fase dura entre 3 y 9 meses.

El compostaje en la recuperación de suelos contaminados

El uso del compostaje es considerado como una técnica *ex situ* de descontaminación biológica de los suelos, que tiene la finalidad de estimular a los microorganismos autóctonos para biodegradar sustancias tóxicas aprovechando las temperaturas generadas durante el proceso (Figura 1) y que ayudan a transformarlas en sustancias inocuas. Se ha comprobado que esta técnica es eficiente para la degradación de hidrocarburos, explosivos y pesticidas (12).

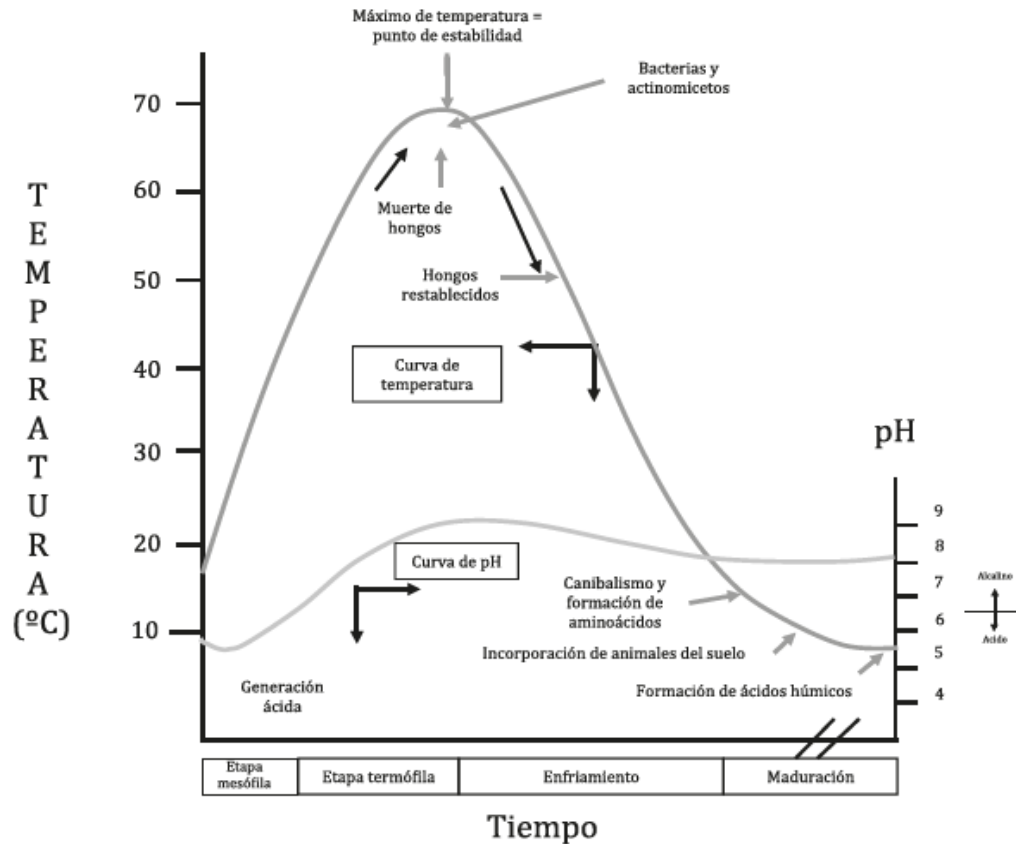


Figura 1. Variaciones en la temperatura y el pH en cada una de las etapas del proceso de compostaje.

Fuente: Campitelli et al. (citados por 25).

El sistema de compostaje más utilizado para suelos contaminados es el que se da en condiciones aeróbicas formando pilas (biopilas) *in situ*, y adicionando material de volumen, agua, nutrientes y permitiendo la oxigenación para mantener el ambiente propicio para los microorganismos.

Las biopilas son influenciadas por factores ambientales como el clima y la composición del suelo por lo que se diseñan en sistemas cerrados para mantener las condiciones de temperatura, humedad y composición del suelo. Las biopilas se pueden establecer de forma alargada y estática. En las primeras el material se

coloca en pilas formando hileras longitudinales y la aireación del sistema se realiza a través de un mezclado manual. En el segundo tipo de biopilas, la aireación se hace por medio de un sistema de inyección con tubos, lo cual permite el control de flujo aire y por lo tanto de la actividad microbiana (26).

En el tratamiento con compost de suelos contaminados se dan las siguientes fases: una *fase inicial*, en la que es necesario proporcionar buena cantidad de aire para favorecer la actividad microbiana, por lo que se generan temperaturas entre los 50 y 60 °C. Sin embargo, baja rápidamente y se establece en los 45 °C, por

lo que no se da la fase termofílica prolongada. Una *fase intermedia* en la cual los materiales son consumidos fácilmente por los microorganismos mesófilos y la temperatura baja junto con la actividad metabólica. Por último, una *fase de enfriamiento*, en la que la temperatura alcanza la ambiental y el proceso termina con el cambio de textura y olor del material.

Antecedentes sobre el uso del compostaje en biorremediación de suelos contaminados

El uso del compostaje para remediación de suelos contaminados es una tecnología de biodegradación en fase sólida que ha tomado auge a finales de la década de los 90, cuando los trabajos de investigación han demostrado que es una alternativa eficaz para suelos contaminados con hidrocarburos y sus derivados, monoaromáticos, clorofenoles, PAHs (hidrocarburos aromáticos policíclicos), explosivos y pesticidas (27) (Figura 2), los cuales son agentes contaminantes o residuos generados o comercializados por las industrias más grandes del mundo.

En los trabajos más antiguos desarrollados, se aprovecha la acción de los microorganismos termofílicos presentes en el compostaje para la biotransformación de contaminantes como el TNT y el hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine, conocido comúnmente como RDX, producidos por la industria armamentista (28,29). En estos estudios se marcó el TNT y el RDX con el isótopo radioactivo ^{14}C para hacer el seguimiento de la transformación de dichas sustancias, observando en primera instancia que el TNT no fue mineralizado, y en cambio se redujo a compuestos como los aminonitrotoluenos;

por otro lado, el RDX fue degradado a CO_2 y lixiviados del compost. En otro ensayo se observó disminución de la concentración de ambos contaminantes a las seis semanas de incubación del compostaje (29).

En estudios realizados sobre hidrocarburos aromáticos, se observó que algunos organismos termófilos presentes en el compostaje hecho a base de hojas y alfalfa eran eficientes en la degradación de tolueno y benceno (30). De la misma manera, se evidenció la degradación del benzopireno en compostaje y en presencia del hongo *Phanerochaete chrysosporium*, sin que hubiera mineralización o volatilización, pero sí reducción a otros intermediarios químicos (31). Así mismo, se demostró que el compostaje de residuos urbanos y fertilizantes es capaz de reducir los PAHs de alto peso molecular en 15 días (32). En otro trabajo, se utilizó compost producido a base de aserrín y estiércol para descontaminar suelos con hidrocarburos (33). En su ensayo se comprobó la disminución de un 22,5 % del contenido de hidrocarburo en el suelo, pero además al utilizar solo estiércol se notó una reducción del 16,5 %, y con solo aserrín hubo una disminución del 9,6 %. A partir de los datos obtenidos, el estiércol de vaca más el aserrín es la fórmula recomendada para que se dé una reducción máxima del 25 % de este agente contaminante.

También se ha comprobado la capacidad del compostaje para biorremediar suelos contaminados con metales pesados provenientes de la industria petrolera (34). El autor fomentó la bioestimulación a través del aporte de nutrientes para apoyar a los microorganismos autóctonos, y logró una eficiencia del 98 % en 49 días; el ensayo terminó con la estabilización de las concentraciones de metales pesados hasta 0 ppm. Asimismo, en el estudio del compost de Stevia para la recuperación de suelos

contaminados con metales pesados como el Pb y el Cd, se logró concluir que este compost permite la solubilización de los metales pesados para una mejor absorción de las plantas, lo cual favorece la articulación del compostaje con los procesos de fitorremediación (35). Mediante

esta articulación, se logró una bioacumulación alta en órganos como las raíces, las hojas, el tallo y las flores, tanto en plantas de maíz como en plantas de girasol, las cuales cumplen una función excluyente o estabilizadora.

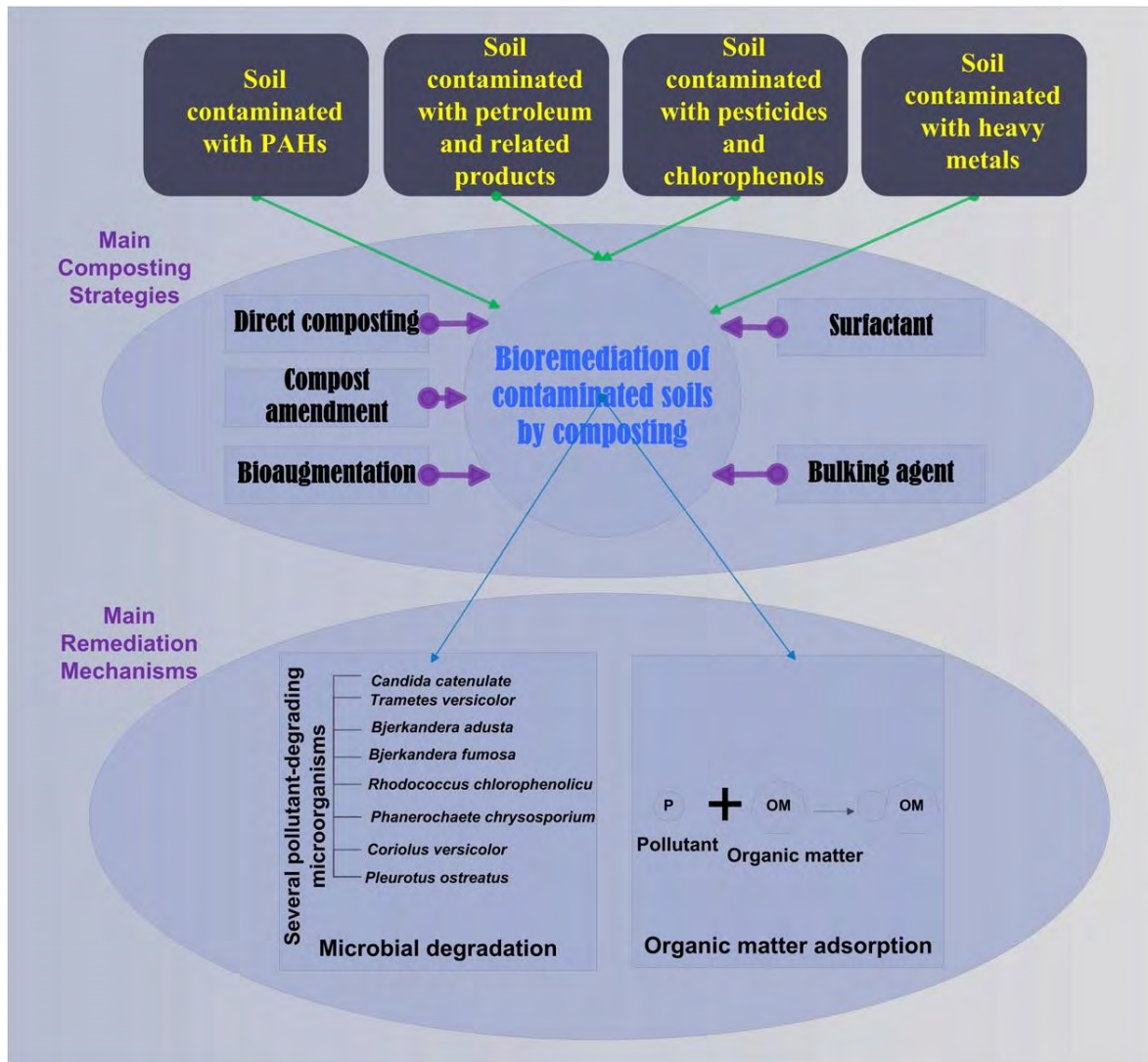


Figura 2. Estrategias para la utilización de compostaje en la biorremediación de suelos contaminados con PAHs, derivados de petróleo, pesticidas y metales pesados

Fuente: (36).

Uso del compostaje en biorremediación de suelos contaminados con agroquímicos

El uso del compostaje se basa en la bioestimulación de los microorganismos autóctonos del suelo contaminado con agroquímicos, a través de la adición de compost, debido a que las poblaciones de estos especímenes son bajas por factores como la dificultad en la oxigenación y

disponibilidad de nutrientes; el compost actúa como un amplificador, mejora estas condiciones ambientales y acelera la degradación de los agentes contaminantes y la recuperación de esta matriz.

Entre los microorganismos capaces de degradar pesticidas están los géneros: *Serratia* sp., *Bacillus* sp. y *Pseudomonas* sp. Sin embargo, se han descubierto en el suelo especies que degradan pesticidas tan variados como los organofosforados (Tabla 2).

Tabla 2. Microorganismos capaces de degradar organofosforados.

Organofosforado	Microorganismo
Clorpirifos	<i>Bacillus pumilus</i> , <i>Streptomyces chattanoogensis</i> , <i>Streptomyces olivochromogenes</i> , <i>Verticillium</i> sp., <i>Serratia marcescens</i> , <i>Alcaligenes</i> sp., <i>Enterobacter</i> sp., <i>Cupriavidus</i> sp., <i>Klebsiella</i> sp., consorcio microbiano (<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp., <i>Rhizobium</i> sp., <i>Comamonas aquatica</i> , <i>Staphylococcus hominis</i> , <i>Klebsiella</i> sp., <i>Aspergillus niger</i> , <i>Trichophyton</i> sp. y <i>Streptomyces radiopugnans</i>), <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Aspergillus</i> sp., <i>Penicillium</i> sp., <i>Eurotium</i> sp., <i>Emericella</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Brevundimonas</i> sp., <i>Diaphorobacter</i> sp. y <i>Pseudomonas putida</i> .
Fenamifos	<i>Pseudomonas putida</i> , <i>Acinetobacter rhizosphaerae</i> , consorcio microbiano, <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Acinetobacter rhizosphaerae</i> .
Tributil fosfato	<i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i> , <i>Alcaligenes</i> sp., <i>Providencia</i> sp., <i>Ralstonia</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Delftia</i> sp.
Malatión	<i>Pseudomonas putida</i> , <i>Brevibacillus</i> sp., <i>Bacillus cereus</i> .
Paratión	<i>Serratia marcescens</i> .
Metil paratión	<i>Acinetobacter radioresistens</i> .
Forato	Consortio microbiano (<i>Ralstonia eutropha</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Enterobacter cloacae</i>).
Dimetoato	<i>Paracoccus</i> sp.
Fenitrotión	<i>Serratia marcescens</i> , <i>Burkholderia</i> sp.
Diclorvos	<i>Ochrobactrum</i> sp.
Profenofos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> .
Triazofos	<i>Diaphorobacter</i> sp.
Cadusafos	<i>Pseudomonas putida</i> .
Etoprofos	<i>Pseudomonas putida</i> .
Isofenfos	<i>Pseudomonas putida</i> .
Isazofos	<i>Pseudomonas putida</i> .
Fention	<i>Pseudomonas putida</i> .

Fuente: (37).

En un ensayo realizado con pesticidas, se identificó una reducción del 2,4-D en suelo contaminado al exponerlo a compost de hierbas y hojas, el 47 % del 2,4-D fue mineralizado y un 23 % fue complejado en la matriz del compost (38). En otro estudio se documenta información sobre la degradación de diazaron, clorpirifos, isofenfos y pendimetalina en compostaje realizado con desechos de jardín, donde hubo una reducción de estos agentes contaminantes a partir de la tercera semana; sin embargo, los residuos de pendimetalina eran detectables aun después de 28 días (39).

En cuanto a compuestos clorados, como los clorofenoles, se realizaron mezclas de suelo contaminado y compostaje, y se observó una reducción de la concentración de clorofenoles en un 14 % durante los primeros cuatro meses; no obstante, sustancias como las dioxinas fueron resistentes a la acción de la microbiota autóctona (40). Más aún, se desarrollaron ensayos de laboratorio en los cuales utilizaron compostaje con diferentes elementos, algunos con hongos, otros con abono de paja y suelo remediado, y encontraron una reducción del 60 % de los PCP en un mes, de lo que concluyeron que al mejorar el compostaje con diferentes elementos, incluidos los nutrientes y al mantener un control de las variables ambientales, aumenta la rapidez de degradación de clorofenoles debido a la mejora en las condiciones para el desarrollo de la microbiota autóctona (41).

Se ha utilizado compost a base de diferentes elementos orgánicos derivados de la fermentación de maíz, tallos de maíz, estiércol, turba y polvo de aserrín para mejorar la eliminación de herbicidas como atrazina, trifluralina y metolacoloro en suelos contaminados (42). La mezcla de 0,5 % de estiércol, 5 % de maicena y 5 % de turba mejoró la eliminación de atrazina; y la mezcla de aserrín, subproducto de fermentación de

maíz, estiércol y maicena a una tasa del 5 % aumentó la degradación de metolacoloro. Sin embargo, ninguna de las mezclas incidió sobre la rapidez de degradación de la trifluralina. De la misma manera, se implementó compost a base de hongos, lechada de biogás, estiércol de granja y citrato de sodio en la eliminación de suelos contaminados con atrazina (43). En la suspensión de biogás se observó la mayor eliminación de atrazina, seguida de una combinación de citrato de sodio y estiércol de granja, setas agotadas y estiércol de granja. Por el contrario, en otro experimento descubrieron que la adición de compost, vermicompost y las plantillas de pastel de aceituna no incidía sobre la degradación de herbicidas como la simazina, cianazina, terbutilazina y prometrina (44).

El cultivo sólido en el sitio es un compost desarrollado a base de granos de café en condiciones de baja humedad y aireación, para la eliminación en el suelo del pesticida DDT y sus metabolitos (45). Esta metodología fue probada inicialmente para la eliminación de hidrocarburos, recuperando suelos adecuados para uso recreativo. En otro estudio, se utilizó compost inmaduro mezclado con suelo compactado de un relleno, en diferentes proporciones para el tratamiento de organofosforados como el clorpirifos, malatión y metilparation (46). En general se notó un aumento en la degradación de los plaguicidas a medida que se aumentó la cantidad de suelo del relleno, lo que sugiere que los microorganismos de este suelo son más eficientes para dicha degradación.

En la región de Ocaña (Norte de Santander) la aplicación de agroquímicos es una actividad muy común debido a las condiciones del suelo, en la cual se han identificado dos clases de suelos (III y VII) con moderadas y fuertes limitaciones para los cultivos (47). Además, la existencia de plagas es otro factor que influye en este fenómeno. Al

respecto, se ha determinado que los compuestos más utilizados en la región son el Lorsban 4EC (Clorpirifos) de la familia de los organofosforados y el Aval PS (Acetamiprid) pertenecientes al grupo de los neonicotinoides, que son utilizados como plaguicidas y tienen un gran impacto en el ecosistema y la población (48).

El aumento de los agroquímicos en la región ha llevado a la búsqueda de medidas que permitan su degradación de manera amigable con el ambiente (biodegradación). Desde este panorama, se ha encontrado una variedad de microorganismos capaces de hidrolizar los Clorpirifos a un compuesto primario 3,5, 6-tricloro-2-piridinol (TCP) pertenecientes a los géneros *Bacillus* sp., *Streptomyces* sp., *Serratia* sp., *Alcaligenes* sp., *Penicillium* sp. y *Pseudomonas* sp., que son parte de la microbiota presente en el compostaje (34). Esta degradación microbiana se origina gracias a la enzima fosfatasa alcalina, la cual es una fosfomono-esterasa que rompe el enlace O-P y libera el fósforo para su absorción por las plantas y etanol como fuente de carbono (49).

En relación con el agroquímico acetamiprid, se encontraron estudios que reconocen ciertos microorganismos presentes en el compostaje que degradan este pesticida. Algunos géneros bacterianos como *Bacillus* sp. y *Stenotrophomonas* sp., se han identificado como degradadores de los neonicotinoides (50). Del mismo modo, Zhao *et al.* (2009) citados por (47) manifiestan que la bacteria *Stenotrophomonas maltophilia* tiene la capacidad de transformar el insecticida a través de una hidroxilación mediada por el citocromo P-450. Por otro lado, se encontró que los géneros *Stenotrophomonas* sp. THZ-XP, *Pigmentiphaga* sp. AAP-1, *Rhodococcus* sp. BCH2, *Pseudoxanthomonas* sp., *Ochrobactrum* sp., *Pigmentiphaga* sp. D-2, *Sinorhizobium meliloti* CGMCC 7333 y *Stenotrophomonas maltophilia*

transforman el acetamiprid en el metabolito N-metil- (6-cloro-3-piridil) metilamina seguido de su mineralización a través del género bacteriano *Bradyrhizobium* sp. SG-6C. En el caso de la *Sinorhizobium meliloti* CGMCC 7333, la enzima nitrilo hidratasa es la responsable de la biotransformación (51).

Es así como el compostaje desarrollado a partir de desechos de jardín y suelo de un relleno se pueden considerar como unas alternativas esenciales para la degradación de organofosforados. Asimismo, el compost generado a partir de diferentes materiales orgánicos como el estiércol, el aserrín, la turba, el maíz y la pulpa de café, se pueden utilizar para la transformación de los agroquímicos derivados del nitrógeno y los organoclorados.

Conclusiones

Los impactos causados por la contaminación a los ecosistemas y específicamente al recurso suelo han ocasionado un aumento en la literatura almacenada en las bases de datos mundiales, en las cuales se puede encontrar información sobre la recuperación de suelos contaminados con diferentes técnicas que van desde la remediación física y química hasta la biorremediación. Esta última con gran auge desde la década de los ochenta cuando se dieron a distintos trabajos (29,30) en la utilización de compost para recuperar suelos contaminados con explosivos.

Por otro lado, la literatura sobre el uso del compost para la recuperación de suelos contaminados con agroquímicos se encuentra en menor porcentaje en las bases de datos, son pocos los trabajos reportados y muchas veces la información se relega a pequeños párrafos en libros y artículos de investigación. La información encontrada se enfoca en pesticidas

como el 2,4-D, diazaron, clorpirifos, isofenfos y pendimetalina, clorados como clorofenoles y PCP, herbicidas como la atrazina, trifluralina, metolaclo, simazina, cianazina, terbutilazina y prometrina, el DDT y sus metabolitos; también, organofosforados como el clorpirifos, malatión y metilparation.

Finalmente, el uso del compostaje se puede considerar como una herramienta esencial para la biodegradación de los agroquímicos más utilizados en la región, reduciendo el efecto tóxico de estas sustancias en la flora y fauna debido a que los microorganismos

presentes se encargan de su descomposición a partir de diversas reacciones metabólicas como la hidrólisis e hidroxilación, usando algunas enzimas como la fosfatasa alcalina, citocromo p-450 y nitrilo hidratasa, y así, transformándolos en elementos simples necesarios para las plantas, lo cual contribuye a la fertilización de los suelos y la productividad de los cultivos. Asimismo, se pueden reducir los efectos nocivos de estos pesticidas (irritación de los ojos, piel y vías respiratorias, y depresión del sistema nervioso central) en la salud humana, lo que aporta al mejoramiento de la calidad vida de la población (52).

Referencias

1. Estrada Paneque A, Gallo González M, Núñez Arroyo E. Contaminación ambiental, su influencia en el ser humano, en especial: el sistema reproductor femenino. *Revista Universidad y Sociedad* [Internet]. Mayo 2016. 2020;8(3): 80-86. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2218-36202016000300010&script=sci_arttext&tlng=en
2. Organización Mundial de la Salud (OMS). Salud Ambiental [Internet]. 2017. Disponible en: http://www.who.int/topics/environmental_health/es/
3. Torres D, Capote T. Agroquímicos un problema ambiental global: uso del análisis químico como herramienta para el monitoreo ambiental. *Ecosistemas* [Internet]. Septiembre 2004;13(3):2-6. Disponible en: <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/201>
4. Arroyave S, Restrepo F. Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre económico* [Internet]. Enero 2009;12(23):13-34. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n23/v12n23a2.pdf?fbclid=IwAR30->
5. Moreno N. Agrohomeopatía como alternativa a los agroquímicos. *Revista Médica de Homeopatía* [Internet]. Enero 2017;10(1):9-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.homeo.2017.04.004>

6. Aguirre R. Agroquímicos en la provincia del Chaco. En IV Congreso Nacional de Derecho Agrario Provincial, 1 y 2 de junio de 2017. Salta. Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales, Universidad Nacional de La Plata. Ciudad de La Plata, Argentina.
7. Perdomo Y, Barrientos Y. Fuentes de enriquecimiento químico vinculado a los desarrollos agrícolas en Hoyo de la Cumbre, Parque Nacional Waraira Repano, Venezuela. *Revista de Investigación* [Internet]. Septiembre 2013;37(80):69-90. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1010-29142013000300005&script=sci_arttext&tIng=pt
8. Alfonso F, Suárez I. Riesgo ambiental por el uso de agroquímicos. *Inventum* [Internet]. Julio. 2010;5(9):32-34. DOI: <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.5.9.2010.32-41>
9. Vivas G. Efectos de la contaminación por agroquímicos en agua y suelo [Dissertation]. Universidad Científica del Sur, Lima (Perú). 2020.
10. Betancur C. Biorremediación de suelo contaminado con el pesticida 1, 1, 1-tricloro-2, 2'bis (p-clorofenil) etano (DDT) mediante protocolos de bioestimulación y adición de surfactante [Doctoral dissertation]. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 2013.
11. Duman CH. Predominantes presentes en la microbiota procedente de un suelo contaminado con agroquímicos para la recuperación del mismo mediante la aplicación de bioestimulación [Dissertation]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2018.
12. Ortiz I, Sanz J, Dorado M, Villar S. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de Vigilancia Tecnológica. Universidad de Alcalá, España. Dirección General de Universidades e Investigación. 2007. Informe de vigilancia tecnológica, n.º 6.
13. Bohórquez W. El proceso de compostaje. Primera edición [Internet]. Universidad de la Salle, Unisalle. 2019. Disponible en: <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1071&context=libros>
14. Kranz C, McLaughlin R, Johnson A, Miller, G, Heitman J. The effects of compost incorporation on soil physical properties in urban soils - A concise review. *Journal of Environmental Management* [Internet]. Mayo 2020;261:1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110209>
15. Mayorga D, García O, Guzmán J. Un acercamiento empírico a la función de producción de compost para 33 países. *Atlantic Review of Economics* [Internet]. 2018;1(1):15. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6525208>

16. Medina L, Monsalve O, Forero A. Aspectos prácticos para utilizar materia orgánica en cultivos hortícolas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* [Internet]. Junio 2010;4(1):109-125. DOI: <https://doi.org/10.17584/rcch.2010v4i1.1230>
17. Lasa B, Tejo P, Arrien C, Irigoyen I. Implicaciones ecofisiológicas y agronómicas de la nutrición nitrogenada. En *La ecofisiología vegetal*. Thomson-Paraninfo. 2003.
18. Bashir S, Gulshan A, Iqbal J, Husain A, Alwahibi M, Alkahtani J *et al.* Comparative role of animal manure and vegetable waste induced compost for polluted soil restoration and maize growth. *Saudi Journal of Biological Sciences* [Internet]. 2021;28(4):2534-2539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.01.057>
19. López J, Díaz E, Martínez R, Valdés C. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra Latinoamericana* [Internet]. Octubre 2001;19(4):293-299. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319401.pdf>
20. Butler S, Vickery J, Norris K. Farmland biodiversity and the footprint of agriculture. *Science* [Internet]. Enero (2007);315(5810):381-384. Disponible en: <https://science.sciencemag.org/content/315/5810/381.full>
21. Ramírez-Builes V, Duque N. Respuesta del lulo La Selva (*Solanum quitoense* x *Solanum hirtum*) a la aplicación de fermentados aeróbicos tipo bocashi y fertilizante químico. *Acta Agronómica* [Internet]. Abril, 2010;59(2):155-161. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1699/169916224004.pdf>
22. Román P, Martínez M, Pantoja A. Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Santiago de Chile. 2013:1-112.
23. Laich F. El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. Santa Cruz de Tenerife, Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. 2011. Informe n.º 1.
24. Universidad de Granada. Microorganismos implicados en el proceso de elaboración del compost. Class notes for Microbiología. Departamento de Microbiología. 2017.
25. González M, Medina M. Diseño y evaluación del compostaje como alternativa para el tratamiento de residuos de aditivos en la construcción. *Producción + Limpia* [Internet]. Enero 2014;9(1):44-62. Disponible en: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/651/418>

26. Velasco J, Sepúlveda T. El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. *Gaceta Ecológica* [Internet]. Enero 2003;(66):41-53. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906604.pdf>
27. Semple K, Reid B, Fermor T. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. *Environmental Pollution* [Internet]. Abril 2001;112(2):269-283. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00099-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00099-3)
28. Kaplan D, Kaplan A. Thermophilic biotransformations of 2, 4, 6-trinitrotoluene under simulated composting conditions. *Appl Environ Microbiol* [Internet]. Septiembre 1982;44(3):757-760. Disponible en: <https://journals.asm.org/doi/abs/10.1128/aem.44.3.757-760.1982>
29. Isbister J, Anspach G, Kitchens J, Doyle R. Composting for decontamination of soils containing explosives. *Microbiológica (Bologna)* [Internet]. 1984;7(1):47-73. Disponible en: <http://md1.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=ENV&recid=757084>
30. Matteau Y, Ramsay B. Active compost biofiltration of toluene. *Biodegradation* [Internet]. Mayo 1997;8(3):135-141. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008221805947>
31. MacFarland M, Qiu X. Removal of benzo (a) pyrene in soil composting systems amended with the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Journal of Hazardous Materials* [Internet]. Junio 1995;42(1):61-70. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(95\)00005-F](https://doi.org/10.1016/0304-3894(95)00005-F)
32. Civilini M. Fate of creosote compounds during composting. *Microbiol Eur* [Internet]. 1994;2(6):16-24.
33. Buendía H. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante compost de aserrín y estiércoles. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima (Perú). 2012.
34. Jara S. Biorremediación de suelos contaminados por petróleo en el Campo Libertador mediante la técnica de compostaje. [Dissertation]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba (Ecuador). 2018.
35. Munive R. Recuperación de suelos degradados por contaminación con metales pesados en el valle del Mantaro mediante compost de Stevia y fitorremediación. [Tesis doctoral]. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima (Perú). 2018.

36. Chen W, Wu J, Lin S, Chang J. Bioremediation of polychlorinated-p-dioxins/ dibenzofurans contaminated soil using simulated compost-amended landfill reactors under hypoxic conditions. *Journal of Hazardous Materials* [Internet]. Julio 2015;312:159-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.060>
37. Hernández-Ruiz G, Álvarez-Orozco N, Ríos-Osorio L. Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* [Internet]. Enero 2017;18(1):138-159. DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:564.
38. Michel F, Reddy C, Forney L. Microbial degradation and humification of the lawn care pesticide 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid during the composting of yard trimmings. *Appl Environ Microbiol* [Internet]. 1995;61(7):2566-2571. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.61.7.2566-2571.1995>
39. Lemmon C, Pylypiw H. Degradation of diazinon, chlorpyrifos, isofenphos, and pendimethalin in grass and compost. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* [Internet]. Marzo 1992;48(3):409-415. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00195640>
40. Valo R, Salkinoja-Salonen M. Bioreclamation of chlorophenol-contaminated soil by composting. *Applied Microbiology and Biotechnology* [Internet]. Octubre 1986;25(1):68-75. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00252515>
41. Laine M, Jørgensen K. Effective and safe composting of chlorophenol-contaminated soil in pilot scale. *Environmental Science & Technology* [Internet]. Enero 1997;31(2):371-378. DOI: <https://doi.org/10.1021/es960176u>
42. Moorman T, Cowan J, Arthur E, Coats J. Organic amendments to enhance herbicide biodegradation in contaminated soils. *Biol Fertil Soils* [Internet]. Junio 2001;33:541-545. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003740100367>
43. Kadian N, Gupta A, Satya S, Mehta R, Malik A. Biodegradation of herbicide (atrazine) in contaminated soil using various bioprocessed materials. *Bioresour Technol* [Internet]. Julio 2008;99(11):4642-4647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.064>
44. Delgado-Moreno L, Peña A. Compost and vermicompost of olive cake to bioremediate triazines-contaminated soil. *Sci Total Environ* [Internet]. Febrero 2009;407(5):1489-1495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.047>

45. Rodríguez-Vázquez R, Acosta-Ramírez D. Regeneration of DDT contaminated soils by co-composting. En II International Symposium on Organic Matter Management and Compost Use in Horticulture. 2013. Santiago de Chile.
46. Upegui S. Evaluación de mezclas compost inmaduro/suelo de Moravia, y fuentes de nutrientes para la degradación de los pesticidas clorpirifos, malatión y metil paratión. [Tesis de maestría] Universidad de Medellín, Colombia. 2014.
47. Granadillo J, Hernández J, Jácome L. Mariposas de la provincia de Ocaña. Ocaña, Colombia. Ecoe Ediciones. 2019.
48. Anteliz H. Caracterización de los agroquímicos utilizados en los cultivos en el distrito de Riego Asudra, municipio de Ábrego [Dissertation]. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña (Norte de Santander). 2014.
49. Briceño G, Fuentes M, Palma G, Jorquera M, Amoroso M, Diez M. Chlorpyrifos biodegradation and 3, 5, 6-trichloro-2-pyridinol production by actinobacteria isolated from soil. *International Biodeterioration & Biodegradation* [Internet]. Septiembre 2012;73:1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.06.002>
50. Mejía E. Aislamiento, evaluación y caracterización de una comunidad microbiana capaz de contribuir en la biodegradación del insecticida tiacloprid [Dissertation]. Instituto Politécnico Nacional, México. 2019.
51. Hussain S, Hartley C, Shettigar M, Pandey G. Bacterial biodegradation of neonicotinoid pesticides in soil and water systems. *FEMS Microbiology Letters* [Internet]. Octubre 2016;363(23):1-13. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsle/fnw252>
52. Dow AgroSciences. Hoja de seguridad Lorsban® 4E. Asociación Nacional de Fabricantes e Importadores de Productos Fitosanitarios Agrícolas (Afiipa), Santiago de Chile. 2013.