



Efecto de los agroquímicos en la actividad enzimática del suelo agrícola: una revisión bibliográfica

Agrochemicals effect on the enzymatic activity of agricultural soil: review

Efeito dos agroquímicos na atividade enzimática dos solos agrícolas: uma revisão bibliográfica

Britney Alejandra Castañeda García¹; Cristian Camilo Ramírez Rangel^{2*};
Diana Marcela Trujillo Suárez³

*Autor de correspondencia: ccamiloramirez@unicolmayor.edu.co

Recibido: 10 de mayo de 2024 Aceptado: 01 de agosto de 2024

Resumen

Este manuscrito aborda la importancia de la actividad enzimática del suelo en el contexto de la agricultura y el impacto de los agroquímicos en esta actividad. La agricultura es fundamental para la economía y la seguridad alimentaria, pero el cultivo intensivo y el cambio de bosques a suelos cultivados han generado un impacto negativo en la degradación de los suelos, emitiendo grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Se analizan los diferentes tipos de agroquímicos utilizados en la agricultura como pesticidas, insecticidas, herbicidas, así como cambios en la actividad enzimática del suelo, que es un indicador clave de su salud y calidad. Se realizó una revisión de diversos estudios en el período comprendido entre 2002 y 2023, los cuales recopilan investigaciones relacionadas con los efectos de los agroquímicos en la actividad enzimática del suelo y los posibles mecanismos subyacentes a estos cambios. Entre los resultados se destaca la importancia de entender estos efectos y cómo pueden alterar la actividad de las enzimas responsables de procesos clave como la des-

- 1 Estudiante Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1465-7033>
- 2 Estudiante Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8575-3463>
- 3 Esp. Gestión Ambiental, Docente Programa de Ciencias Básicas, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9462-0339>

La Revista Sistemas de Producción Agroecológicos es una revista de acceso abierto revisada por pares. © 2012. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY 4.0), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se acredite el autor y la fuente originales.

Consulte <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

OPEN ACCESS



Como citar este artículo / How to cite this article: Castañeda-García, B. A., Ramírez-Rangel, C. C., Trujillo-Suárez, D. M. (2024). Efecto de los agroquímicos en la actividad enzimática del suelo agrícola: una revisión bibliográfica. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 15(2), e-1082. DOI: <https://doi.org/10.22579/22484817.1082>

composición de la materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la regulación de la microbiota del suelo. Asimismo, se recomienda considerar las implicaciones de estos hallazgos en el manejo agrícola y ambiental, así como en la promoción de prácticas sostenibles que minimicen el impacto negativo de los agroquímicos en la actividad enzimática del suelo y en los ecosistemas en general.

Palabras claves: cultivo; materia orgánica; microorganismos; suelo..

Abstract

This research tackled the importance of soil enzymatic activity in agriculture and agrochemicals' impact on this activity. Since agriculture is fundamental for the economy and food security, intensive crop cultivation and subsequent forest changes to cultivated soils have negatively impacted soil, generating degradation and emitting considerable amounts of CO₂ into the atmosphere. The different types of agrochemicals used in agriculture, such as pesticides, insecticides, and herbicides, as well as changes in the enzymatic activity of the soil, which is a crucial indicator of its health and quality, were analyzed. Therefore, the study reviewed reports from 2002 and 2023, compiling research on the agrochemicals' effects on soil enzymatic activity and the possible mechanisms underlying these changes. The results show the importance of understanding these effects and how they can alter the activity of the enzymes responsible for critical processes, such as the decomposition of organic matter, the availability of nutrients, and the regulation of the soil microbiota, stands out—likewise, considering the implications of these findings in agricultural and environmental management, as well as in the promotion of sustainable practices that minimize the negative impact of agrochemicals on the enzymatic activity of the soil and ecosystems in general.

Keywords: crop; enzyme activity; microorganisms; organic matter; soil.

Resumo

O artigo aborda a importância da atividade enzimática do solo no contexto da agricultura e o impacto dos agrotóxicos nessa atividade. Tendo em vista que a agricultura é fundamental para a economia e a segurança alimentar, mas o cultivo intensivo e a mudança das florestas para os solos cultivados tiveram um impacto negativo na degradação do solo, emitindo grandes quantidades de CO₂ para a atmosfera, os diferentes tipos de agrotóxicos utilizados na agricultura são analisados; como pesticidas, inseticidas, herbicidas, bem como alterações na atividade enzimática do solo, que é um indicador-chave de sua saúde e qualida-

de. Por essa razão, é realizada uma revisão de vários estudos, do período entre 2002 e 2023, que compilam pesquisas relacionadas aos efeitos dos agrotóxicos na atividade enzimática do solo e os possíveis mecanismos subjacentes a essas mudanças. Assim, dentre os resultados, destaca-se a importância de compreender esses efeitos e como eles podem alterar a atividade de enzimas responsáveis por processos-chave, como a decomposição da matéria orgânica, a disponibilidade de nutrientes e a regulação da microbiota do solo. Recomenda-se também considerar as implicações desses achados no manejo agrícola e ambiental, bem como na promoção de práticas sustentáveis que minimizem o impacto negativo dos agrotóxicos na atividade enzimática do solo e nos ecossistemas em geral.

Palavras-chave: cultivo; matéria orgânica; microorganismos; solo.

Introducción

A lo largo de los años se ha considerado que la agricultura es una actividad esencial para proporcionar alimentos a la población mundial, así como es una de las actividades económicas principales para muchos países; sin embargo, el uso indiscriminado de agroquímicos como los pesticidas y herbicidas, genera una gran preocupación debido a sus efectos sobre la salud humana y el medio ambiente, dificultando la preservación de los ecosistemas y los recursos naturales. Por esto, el efecto de los agroquímicos y los cambios de la actividad enzimática propia del suelo en los cultivos son temas de gran relevancia, ya que tienen implicaciones tanto en la sostenibilidad del ecosistema agrícola como en la calidad y seguridad de los alimentos que se producen, por lo cual es importante conocer qué características cambian en el suelo cuando se usan estos productos en los cultivos, y lo que producen a su vez en la actividad enzimática (Garay *et al.*, 2022).

Según del Puerto *et al.* (2014), la búsqueda de la productividad a corto plazo por encima de la sustentabilidad ecológica que se ha venido practicando en los últimos años, ha dejado a nivel mundial un grado considerable tanto de contaminación como de envenenamiento. Dicha problemática puede presentar consecuencias mucho tiempo después, ya que, al no contar actualmente con la misma disponibilidad de suelo fértil apto para el cultivo, de alguna manera se obliga a recurrir a prácticas

de biorremediación que son costosas o se decide simplemente dejar estos terrenos en abandono. Por esto, algunos productos fitosanitarios son identificados como un peligro a largo plazo para el medio ambiente y están prohibidos o restringidos por convenios internacionales, como el Convenio de Estocolmo sobre los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP, 2019).

Asimismo, se han documentado algunos casos de graves problemas de salud humana como resultado de prácticas deficientes en el manejo de agroquímicos por parte de los agricultores, estos incluyen cefaleas, mareos, náuseas, vómitos, constricción pupilar, sudoración excesiva, lagrimeo y salivación en el caso de una intoxicación con organofosforados (Molina y Castro, 2018). Estos efectos adversos se atribuyen principalmente a la falta de información relacionada con el manejo seguro de los envases y residuos, asociado al uso de agroquímicos en las comunidades campesinas, lo que aumenta aún más el riesgo de abuso de estos productos en la producción de alimentos y, por ende, en el suelo donde son cultivados. Por lo anterior, Gordon y Marrugo (2018) consideran que es imperativo abordar esta falta de conocimiento y conciencia colectiva, para mitigar los riesgos asociados con el uso indebido de agroquímicos y proteger la salud pública.

En este artículo se examinan investigaciones científicas y diferentes estudios realizados del tema, con el objetivo de analizar los cambios en las ca-

racterísticas del suelo al emplear los agroquímicos, y las alteraciones que tiene en su actividad enzimática. Adicionalmente se busca entender cómo los agroquímicos, generalmente empleados en los cultivos agrícolas, alteran de manera considerable las poblaciones de microorganismos endémicos del suelo, repercutiendo en un desequilibrio de los procesos biológicos esenciales para la fertilidad y productividad de los cultivos, como lo plantean Ortiz *et al.* (2013). Finalmente, se espera que los hallazgos de esta revisión puedan proporcionar información valiosa para entender y comprender, cómo cambian las interacciones biológicas al interior del suelo, así como los niveles de iones solubles e insolubles al aplicar constantemente estos productos en las prácticas agrícolas.

Metodología

Se realizó una revisión de más de cien fuentes bibliográficas, en el período comprendido entre los años 2002 a 2023; dicha búsqueda incluyó diferentes bases de datos, libros, y artículos provenientes de fuentes tales como Scopus, ScienceDirect, PubMed, Scielo, publicaciones de diferentes universidades e instituciones de educación tanto nacionales como internacionales, así como diversas fuentes de Internet.

Los criterios de búsqueda empleados tanto en español como en inglés, incluyen los términos: "agroquímicos", "agrochemicals", "enzimas del suelo", "soil enzymes", "características del suelo", "soil characteristics", "herbicidas", "herbicides", "fungicidas", "fungicides", "ciclos biogeoquímicos", "biogeochemical cycles", "microorganismos del suelo", "soil microorganisms" "agroquímicos en cultivo" y "agrochemicals in cultivation".

El suelo y sus características

El suelo es un ecosistema vivo y dinámico, y posee una amplia variedad de organismos que realizan múltiples funciones, una de ellas, es la degradación de la materia orgánica (MO). Estos microorganismos permanecen en contacto con el ambiente del suelo y son indicadores ideales de la contami-

nación por sustancias xenobióticas como en este caso, los agroquímicos (Ortiz *et al.*, 2013). Parte de los componentes esenciales del suelo son el carbono orgánico y la materia orgánica, debido a que pueden mantener la fertilidad del suelo, la producción de cultivos y prevenir su degradación, erosión y desertificación, que como lo describen Maphuhla *et al.* (2021) resulta en un papel vital en la descomposición de la materia orgánica desempeñado por las enzimas del suelo. Ahora bien, el suelo tiene una vocación de uso acorde con su capacidad productiva, es decir que antes de tomar cualquier decisión sobre la siembra de un cultivo en una zona determinada, es muy importante conocer algunas de sus características físicas, además de las principales propiedades químicas, las cuales aportan información sobre los componentes básicos que permitan conocer esa llamada vocación de uso y el potencial productivo del suelo.

Como lo presenta Blanco (2003), los componentes fundamentales de un suelo con adecuada aptitud de uso para realizar actividades agrícolas se clasifican en:

1. Fase sólida: esta es equivalente a un 50 % del total del suelo; está subdividida en distintas porciones como la porción mineral que corresponde a un 45 % en donde se encuentran partículas como arcillas, limos, y arenas. También en esta parte encontramos la porción orgánica que corresponde a un 5 % y está conformada por los desechos vegetales y animales, así como los microorganismos
2. Fase líquida: esta es importante ya que es la fuente hídrica de todas las plantas y microorganismos que crecen en el suelo y corresponde a un 25 %.
3. Fase gaseosa: es la que permite que ocurra todo el intercambio gaseoso entre el suelo y el mundo exterior a él; corresponde a un 25 % y es la parte porosa por donde circula el agua, aire y raíces de las plantas que allí habitan.

Para Pertile *et al.* (2020) la importancia de la fase líquida y sólida está muy relacionada con el adecuado equilibrio que debe existir entre estos dos componentes, ya que se debe garantizar el flujo de aire y agua en el suelo, así como permitir el almacenamiento de agua para las plantas.

Agroquímicos y su clasificación química

Si bien la RAE define los agroquímicos como un "compuesto elaborado por procedimientos químicos y destinado a las necesidades de la producción agrícola", este concepto aunque es preciso, no abarca completamente la significativa relevancia que tiene en la agricultura, dado que la aplicación de estos productos engloba una amplia gama de sustancias. Silveira-Gramont *et al.* (2018) evidencian cómo se incluyen desde los fertilizantes que incrementan la disponibilidad de nutrientes como amoníaco, nitrato de amonio, sulfato de amonio y urea en el suelo, lo que permite una mayor absorción por parte de numerosos cultivos, hasta los compuestos fitosanitarios, como herbicidas, insecticidas, fungicidas y fitohormonas, conocidos también como reguladores de crecimiento.

Para Cruz-Cárdenas *et al.* (2021), los agroquímicos son fuente de carbono y nitrógeno y se degradan principalmente por la actividad microbiana, aunque causan problemas de contaminación puesto que han sido usados en agricultura por más de 40 años para el control de plagas, planteando el reto de buscar alternativas de tratamiento como la biorremediación. Asimismo, Ortiz *et al.* (2013) los consideran como un componente importante de la agricultura moderna, en tanto previenen los efectos devastadores de diferentes plagas ya que son diseñados para controlar los patógenos o enfermedades en los cultivos comerciales, pero su empleo continuo puede ocasionar numerosos problemas e influir en los microorganismos benéficos del suelo. La permanencia y dispersión de estos compuestos en el suelo dependen de las propiedades fisicoquímicas del agroquímico, así como de las características del suelo y de las condicio-

nes climáticas (Hernández-Soriano *et al.*, 2007; Sawunyama y Bailey, 2001). La Tabla 1 describe la clasificación de los agroquímicos en función de su propósito.

Tabla 1. Clasificación de los agroquímicos según su propósito

Función	Mecanismo de acción	Impacto ambiental	Referencia
Insecticidas/ Acaricidas	Afectan el sistema nervioso, digestivo y muscular, el crecimiento y desarrollo normal del insecto	Reducen la población de varios insectos incluyendo los que juegan un papel importante en los ecosistemas ajenos a la explotación agrícola.	IRAC, 2024
Fungicidas/ Bactericidas	Eliminan los agentes perjudiciales, afectando la microbiota del entorno y alterando las diversas interacciones biológicas.	Producen efectos adversos en el microbioma, afectando a microorganismos endógenos presentes y a las interacciones biológicas del entorno.	Cardona <i>et al.</i> (2016)
Herbicidas	Controlan la proliferación de arvenses en cultivos.	Modifican las interacciones biológicas del suelo, produciendo la pérdida de biomasa microbiana y afectando la salud y fertilidad del suelo.	Pertile <i>et al.</i> (2020)

Landini *et al.* (2019) refieren que la clasificación de los agroquímicos se torna crucial debido a la amplia diversidad de compuestos presentes en este espectro. Es necesario discernir su composición química, para comprender su impacto y aplicación en la agricultura de manera precisa y efectiva, así como su posible riesgo a la salud humana. Lo anterior, se debe a que una exposición prolongada o intensa puede resultar en intoxicaciones agudas graves, las cuales demandan atención médica inmediata y en ocasiones pueden ser mortales. A continuación, se describe dicha clasificación.

Organoclorados

Los hidrocarburos clorados son compuestos sintéticos de amplio espectro que se destacan por su notable estabilidad química y su capacidad de disolverse en grasas mientras son poco solubles en agua. Adicional a esto, como lo han evidenciado Agbeve *et al.* (2014), tienen una acción residual y persisten en el medio donde se han aplicado durante una prolongada cantidad de tiempo. La preocupación ambiental radica en su resistencia a la degradación por medios químicos, físicos, microbiológicos y biológicos, lo que potencialmente causa daños a los ecosistemas. Además, Fosumensah *et al.* (2016) refieren su capacidad para volatilizarse y desplazarse fuera del sitio a través del aire y la escorrentía superficial puede llevar a la contaminación de áreas remotas, incluidos cuerpos de agua donde no se han utilizado, incluso llegando a bioacumularse en la cadena alimentaria. Estos han adquirido una relevancia considerable desde la introducción del diclorodifeniltricloroetano (DDT). Asimismo, Zaragoza-Bastida *et al.* (2016) refieren cómo estos productos químicos se fabrican mediante un proceso de cloración de diversos hidrocarburos, principalmente derivados de los etanos, siendo el DDT el más prominente entre ellos.

Triazinas

Las triazinas son compuestos comúnmente empleados en herbicidas, caracterizados por su capacidad hidrofóbica que les permite penetrar las membranas de las células biológicas ya sea en su forma protonada o neutra. Entre ellas se destacan la ametrina, atrazina y prometrina (Sánchez *et al.*, 2018). Estos herbicidas son absorbidos por las raíces de las plantas y se transportan a través de los tejidos del xilema, distribuyéndose por todo el sistema vegetal. Las triazinas ejercen su acción al inhibir la fotosíntesis en las hojas, específicamente interfiriendo con el fotosistema de la planta. (Schulz *et al.*, 2021). Se ha evidenciado que los residuos peligrosos derivados de estos compuestos, se han asociado con diversas enfermedades

crónicas en organismos vivos, como la alteración hormonal, genotoxicidad, citotoxicidad, disminución de la tasa de reproducción y trastornos reproductivos en varios vertebrados, incluyendo mamíferos y seres humanos (Ahmad *et al.*, 2023). Además, el uso indiscriminado de triazinas afecta negativamente a la flora y fauna beneficiosas, alterando los ciclos de floración y reproducción, y perturbando la estructura de las comunidades de polinizadores y depredadores (Xie *et al.*, 2019).

Carbamatos

Los plaguicidas carbamatos son ampliamente utilizados como insecticidas debido a su capacidad para inhibir la acetilcolinesterasa y la neuropatía esterasa. A diferencia de otros agentes, no inducen el envejecimiento de la enzima inhibida. Se han descrito las vías principales de desintoxicación que incluyen la hidrólisis y la oxidación, siendo la hidrólisis por esterases la más efectiva. Sin embargo, la comprensión detallada de las interacciones entre estas enzimas y los carbamatos en mamíferos aún necesita ser investigada más a fondo (Bini *et al.*, 2016).

Los carbamatos son un tipo de insecticidas que comparten similitudes con los pesticidas organofosforados. Estos compuestos son derivados del ácido amino fórmico y se caracterizan por contener grupos carbamato de N-metilo. Una distinción fundamental entre los carbamatos y los organofosforados radica en su interacción con la acetilcolinesterasa: mientras que los carbamatos se unen a esta enzima de manera reversible, la fosforilación causada por los organofosforados resulta en una inhibición irreversible de la acetilcolinesterasa (Silberman y Taylor, 2023).

Sulfonilureas

Los herbicidas de sulfonilurea como el nicosulfurón, son ampliamente utilizados en la protección de cultivos de cereales, pero plantean un riesgo ambiental al contaminar aguas subterráneas y superficiales debido a la lixiviación. Estos herbicidas

también pueden perturbar la microbiota del suelo (Azcarate *et al.*, 2015). El nicosulfurón específicamente interfiere con la acetolactato sintasa en las plantas, esencial para la síntesis de aminoácidos ramificados, lo que puede llevar a una disminución en la división celular y el crecimiento de las plantas (Li *et al.*, 2022).

Neonicotinoides

Estos pesticidas se utilizan generalmente para la protección de cultivos en agricultura, en conservación de madera y acuicultura, así como en el control de plagas. Estos tienen una acción neurotóxica en los insectos, la cual imita la acción de los transmisores neuronales que afectan directamente el sistema nervioso central, lo que resulta en la muerte del insecto (Hussain *et al.*, 2016). Uno de los neonicotinoides de uso comercial más usado es el imidacloprid, del cual se ha demostrado que afecta de manera conducente varias partes de la comunidad microbiana, lo que conlleva a las reducciones de biomasa, riqueza y diversidad al usar a concentraciones desde los 1 mg/kg de suelo (Yu *et al.*, 2020).

Actividad enzimática y mecanismos

La actividad enzimática es un indicador directo de la salud del suelo ya que es causada directamente por los microorganismos presentes en él, los cuales se encargan de metabolizar los compuestos orgánicos e inorgánicos disponibles, teniendo gran sensibilidad hacia las prácticas de manejo del suelo y del cultivo, como el tipo de labranza, la fertilización, la rotación y el riego, que pueden afectar la diversidad y el equilibrio de los microorganismos del suelo y la disponibilidad de sustratos y cofactores para las enzimas (Mohammadi, 2011).

Las enzimas son proteínas funcionales producidas por microorganismos cuyo papel en la microbiota del suelo es el de catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos, actuando a base de sustratos específicos y transformándolos en productos necesarios para los ciclos biológicos como

el carbono, nitrógeno, fósforo y azufre (Ochoa *et al.*, 2007). Dichas enzimas que son sintetizadas al interior de los microorganismos pueden ser liberadas en diferentes momentos al medio, en este caso al suelo para que realicen su función.

Descomposición de materia orgánica

La materia orgánica en descomposición sirve como sustrato fundamental para una variedad de microorganismos que descomponen compuestos orgánicos complejos en formas más simples. Este proceso catabólico no solo libera nutrientes, también contribuye a la formación de materia orgánica más estable en el suelo, conocida como humus, que termina por mejorar su capacidad de retención de agua y su resistencia a la erosión, beneficiando así la salud general del ecosistema. La descomposición de desechos orgánicos es crucial para el ciclo de la vida, ya que proporciona nutrientes esenciales para las plantas, las cuales son la base de las cadenas tróficas y mantienen la productividad del ecosistema. Este proceso promueve la sostenibilidad al renovar constantemente recursos vitales y mantener el equilibrio en los sistemas naturales (Álvarez, 2005).

Disponibilidad de nutrientes

Los nutrientes esenciales absorbidos por las plantas a través de la atmósfera son el carbono (C), el hidrógeno (H) y el oxígeno (O). El carbono se utiliza en forma de dióxido de carbono (CO_2) durante la fotosíntesis, el oxígeno como gas (O_2) durante la respiración, y el hidrógeno durante la absorción de agua (H_2O) por las raíces. Aunque las plantas suelen tener abundantes reservas de carbono y oxígeno en el aire, el hidrógeno puede ser limitado en condiciones de sequía extrema (Blanco, 2003).

Los nutrimentos suministrados por el suelo se clasifican en tres categorías:

1. Nutrimentos mayores, primarios o macronutrimentos: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K).

2. Nutrientes secundarios: calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S).
3. Nutrientes menores o micronutrientes: hierro (H), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y boro (B).

Regulación microbiota

La respiración es esencial para el ciclo global del carbono y la distribución de energía en el suelo. Durante este proceso se consume oxígeno y se libera dióxido de carbono, lo que resulta en la pérdida de carbono de los ecosistemas hacia la atmósfera. En el suelo la materia orgánica se descompone principalmente debido a la actividad respiratoria de la microbiota (Dilly, 2003).

En un estudio realizado en Colombia por Cuervo en 2007, se examinó la interacción del herbicida glifosato con la microbiota del suelo en áreas agrícolas del departamento del Tolima. Se utilizaron métodos de microbiología convencional en macetas y en condiciones de invernadero similares a las del cultivo de arroz. Se observó que las bacterias fueron las más afectadas por el glifosato en comparación con hongos y actinomicetos. Aunque algunos tipos de bacterias demostraron tolerancia al herbicida, concentraciones más altas redujeron significativamente las poblaciones microbianas, llegando en muchos casos a su desaparición.

Microorganismos

Las comunidades microbianas en el suelo dirigen la mayoría de los procesos biológicos, representando entre el 80 y 90 % de estos (Bajsa *et al.*, 2013). La presencia de contaminantes puede reducir la diversidad microbiana y fomentar la selectividad, convirtiendo el suelo contaminado en una fuente potencial de microorganismos especializados en la degradación de contaminantes. Estos microorganismos desarrollan respuestas enzimáticas y fisiológicas adaptativas para degradar los contaminantes presentes. La capacidad de utilizar pesticidas como fuente de carbono y/o fósforo

se ha empleado para aislar microorganismos con habilidades de degradación de agroquímicos. El extracto de levadura, a menudo utilizado como fuente de nitrógeno en diferentes concentraciones, reduce la toxicidad del agroquímico y mejora su asimilación por parte de los microorganismos. Aunque el extracto de levadura tiene beneficios nutricionales, su complejidad y aporte de carbono pueden influir en los resultados cuando se considera el pesticida como única fuente de carbono (Botero *et al.*, 2011).

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal ofrecen beneficios significativos al reducir la necesidad de fertilizantes y pesticidas en la agricultura. Sin embargo, la actividad microbiana del suelo y sus beneficios se ven afectados por prácticas agrícolas intensivas no sostenibles y factores ambientales como las condiciones climáticas. Estos factores pueden alterar las características físicas, químicas y biológicas del suelo, incluyendo temperatura, humedad, salinidad, aireación, pH y biodisponibilidad de nutrientes (Ibarra-Villarreal *et al.*, 2021). El desequilibrio en las comunidades microbianas del suelo conduce a procesos de degradación biológica, lo que resulta en una disminución del rendimiento y la calidad de los cultivos, aumentando su vulnerabilidad ante diversos tipos de estrés y limitando su capacidad para cumplir funciones ecosistémicas clave, como la producción de biomasa vegetal, el almacenamiento y reciclaje de nutrientes, la regulación del agua y el clima, la mitigación del cambio climático y la provisión de hábitats para la actividad biológica (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2021).

Microorganismos benéficos del suelo

En esta microbiota se puede encontrar un grupo particular conocido como microorganismos promotores de crecimiento vegetal (MPCV); estos favorecen ya sea de forma directa o indirecta el crecimiento vegetativo, generando tolerancia al estrés abiótico y biótico en la planta, lo que facilita la nutrición de la planta a través de uno o más mecanismos (Dohrmann *et al.*, 2012). Los meca-

nismos directos ocurren cuando las bacterias sintetizan metabolitos que facilitan a las plantas, o cuando éstas incrementan la disponibilidad de diferentes elementos nutritivos requeridos para su metabolismo y para mejorar su proceso de nutrición (Gómez-Luna *et al.*, 2012). Por su parte, los mecanismos indirectos se caracterizan porque los MPCV ocasionan la disminución o eliminación de microorganismos fitopatógenos, ya sea a través de la producción de sustancias antimicrobianas o de antibióticos de enzimas líticas o una combinación de éstas (Esquivel-Cote *et al.*, 2013) Entre los géneros microbianos más estudiados de este grupo destacan: *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Variovorax*, *Klebsiella*, *Burkholderia*, *Azospirillum*, *Serratia*, *Erwinia*, *Azotobacter* y *Trichoderma* (Dohrmann *et al.*, 2012). Así, los MPCV tiene la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico y solubilizar el fósforo. Los microorganismos benéficos del suelo usados en la agricultura se pueden clasificar, según Joshi *et al.* (2019) en: fitoestimulantes (potencian la germinación de las semillas, el enraizamiento y el crecimiento vegetal mediante la producción de reguladores de crecimiento, vitaminas y otras sustancias), mejoradores (favorecen la estructura del suelo y sus propiedades físicoquímicas, lo cual aumenta su fertilidad), biorremediadores (están asociados a la eliminación de agroinsumos sintéticos recalcitrantes y altamente dañinos para el ambiente y salud humana), y biofertilizantes (tienen la capacidad de proporcionar nutrientes biodisponibles y moléculas bioactivas para el crecimiento y desarrollo incrementado de las plantas, incluyendo el control de fitopatógenos).

Consideraciones sobre el uso de agroquímicos y calidad del suelo

La calidad del suelo se ve afectada por los agroquímicos, ya que todos los beneficios que se le acreditan a estos compuestos vienen acompañados de daños muy graves para ciertos ecosistemas, puesto que deterioran de manera significativa los suelos cultivables, siendo una de las causas principales de su degradación (Bustamante-Osuna,

2019). Los efectos de los agroquímicos en el suelo pueden variar dependiendo del tipo en función de su propósito y su aplicación, sin embargo, algunos efectos comunes incluyen la pérdida de materia orgánica, la degradación de la estructura del suelo, la disminución de la actividad microbiana y la pérdida de biodiversidad, que desempeñan funciones a favor de la calidad del suelo (Grandez, 2020). Esto provoca una disminución en la disponibilidad de nutrientes para las plantas y la reducción de la fertilidad del suelo.

Las enzimas provienen de muchas fuentes diferentes del suelo, incluidos microorganismos vivos y no vivos, residuos y raíces de plantas y animales terrestres; son efectores críticos de todas las alteraciones que ocurren en la ecología, catalizan con especificidad tanto estrecha como amplia, y la actividad en el suelo se traduce en que pueden ser el bioindicador o parámetro adecuado para monitorear la contaminación del suelo debido a su sensibilidad, practicidad operativa y facilidad de evaluación que responde rápidamente a cualquier alteración. La determinación de la actividad enzimática en el suelo indica cambios en el proceso de intensidad biológica, al ser importantes moderadores y catalizadores de funciones principales. Algunos como la invertasa, ureasa, fosfatasa, arilsulfatasa e hidrolasa desempeñan un papel esencial en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes como el carbono, el nitrógeno, el fósforo y el azufre, y también en la descomposición de la materia orgánica (MO) en los suelos (Maphuhla *et al.*, 2021).

Investigadores como Alkorta *et al.* (2003) y Steinweg *et al.* (2013), observaron que la actividad enzimática suele estar estrechamente relacionada con parámetros críticos y relevantes respecto a la condición del suelo; además, pueden cambiar mucho antes (entre uno y dos años) que otras propiedades. Según el estudio que se realizó en el artículo "Los efectos de los parámetros físicoquímicos sobre la actividad enzimática del suelo analizada en el vertedero de Alice" se determina que la actividad de la invertasa y la fosfatasa parece ser apropiada para monitorear la contaminación y el manejo del suelo

debido a su alto nivel de actividad. La actividad de la enzima fosfatasa se correlaciona positivamente con todos los parámetros fisicoquímicos detectados (contenido de humedad, pH, carbono orgánico y conductividad eléctrica), mientras que la actividad invertasa mostró una correlación negativa con las propiedades fisicoquímicas para el contenido de humedad. De igual forma, Maphuhla *et al.* (2021) resaltan que la actividad de las enzimas ureasa e invertasa son indicadores esenciales de las funciones y actividades mediadas por microbios debido a sus rápidos cambios hacia el ambiente los cuales resultan ser significativos.

El estudio realizado por Ortiz *et al.* (2013) evaluó las consecuencias del uso de agroquímicos en el suelo, más específicamente del Glifosato, Bispiribac, Azoxystrobin y Malatión, aplicados en dosis comerciales en un cultivo de arroz. El diseño experimental empleado permitió determinar cómo estos agroquímicos afectaron a los microorganismos presentes. Los resultados indicaron que los hongos, actinomicetos y solubilizadores de fósforo fueron los microorganismos más perjudicados, experimentando una reducción en su abundancia. Por otro lado, el comportamiento de las bacterias varió según el tipo de agroquímico, mientras que los fijadores de nitrógeno fueron estimulados por los tratamientos. Estos hallazgos sugieren que los agroquímicos estudiados afectan de manera diferencial a los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica en el suelo.

Se considera que los microorganismos son indicadores más sensibles y eficaces que otros parámetros, ya que tienen la capacidad de responder rápidamente a las alteraciones del entorno. (Farooq *et al.*, 2022). Vázquez y colaboradores (2021) realizaron un estudio titulado *Effects of glyphosate on soil fungal communities: A field study*, en el cual se evaluó el efecto del glifosato sobre los hongos del suelo; en dos años se observaron cambios temporales en la biomasa fúngica mas no generales a lo largo del tiempo. Además, se observó un efecto estimulador temprano y transitorio en la biomasa fúngica del suelo después de la aplicación del gli-

fosato mediante el método de estimación directa. Los análisis moleculares revelaron cambios en la estructura de las comunidades fúngicas, indicando que el glifosato puede afectar su diversidad y composición a largo plazo. Estos hallazgos resaltan la importancia de comprender mejor el impacto de los herbicidas en las comunidades microbianas del suelo (Krzysko-Lupicka y Sudol, 2008). Gracias a las prácticas que emplean excesivos insumos químicos se ve afectada la condición del suelo, puesto que albergan diversas comunidades que sustentan y regulan las funciones del ecosistema (Beltrán-Pineda y Bernal-Figueroa, 2022). La intensificación agrícola está poniendo en riesgo los servicios ecosistémicos esenciales de todas las especies que conviven en un ecosistema rural/agrícola (El Mujtar *et al.*, 2019). Investigaciones recientes se han enfocado en comprender la dinámica e importancia de las funciones beneficiosas y cooperativas para la productividad agrícola (Singh *et al.*, 2011).

Entre las prácticas empleadas para la reducción drástica en el uso de agroquímicos se encuentran la rotación de cultivos, el manejo integrado de plagas, los abonos verdes, y la utilización de biofertilizantes (Piotrowski y Rillig, 2008). Los biofertilizantes contienen microorganismos beneficiosos del suelo que pueden estimular el crecimiento vegetal, estos pueden aplicarse a las semillas, a las plantas o al suelo, colonizando tanto la rizosfera como el interior de las plantas (El Mujtar *et al.*, 2019). Se han hecho estudios sobre cultivos aéreos de arroz que reducen el consumo de agua como alternativa a los sistemas de producción que tradicionalmente han sobreexplotado el suelo (Farooq *et al.*, 2022).

Los biofertilizantes no solo mejoran la disponibilidad de nutrientes para las plantas al contener microorganismos vivos, sino que también reducen la contaminación ambiental al generar menos desechos tóxicos que los fertilizantes químicos, lo que contribuye a preservar los recursos naturales. Además, mejoran la calidad,

estructura y fertilidad del suelo, promoviendo cultivos más saludables y resistentes a enfermedades; su uso puede disminuir los riesgos para la salud humana al evitar la liberación de residuos tóxicos en el entorno agrícola y reducir la contaminación del agua, mitigando efectos adversos a largo plazo (Piotrowski y Rillig, 2008) También se ha visto que el uso de biofertilizantes estimula de manera sostenible la fijación biológica de nitrógeno, la promoción del crecimiento vegetal, la solubilización del fósforo y las micorrizas (Ritika y Utpal, 2014).

La industria de biofertilizantes microbianos enfrenta importantes desafíos debido a los diversos efectos observados en condiciones de campo, lo que demanda que los productos comerciales contribuyan a una producción agrícola sostenible tanto a pequeña como a gran escala. Uno de los principales obstáculos reside en la calidad de estos biofertilizantes, ya que muchas agencias privadas que los suministran no cumplen con los estándares requeridos, lo que dificulta su adopción efectiva por parte de los agricultores. Este problema de calidad se atribuye, en parte, a la falta de coordinación entre los agricultores que utilizan los biofertilizantes y los científicos encargados de desarrollarlos. Por lo tanto, es crucial prestar especial atención a los principales microorganismos utilizados como inóculos comerciales. Además, la variabilidad en el rendimiento de campo de los inoculantes microbianos puede explicarse por problemas como la adaptabilidad a suelos no nativos, los efectos adversos de la interacción con microorganismos autóctonos de los cultivos y la falta de compatibilidad en la colonización de diferentes hospederos, especies y variedades de cultivos (Afanador, 2017).

Recomendaciones finales

En esta revisión se han explorado los efectos generados por el uso indiscriminado de agroquímicos en los cultivos destinados a la explotación agrícola, con el objetivo de elucidar qué características

del suelo se ven afectadas por la aplicación de estos productos y su impacto en la actividad enzimática. A lo largo de nuestra investigación, se han descubierto una serie de hallazgos significativos que proporcionan una visión más clara de cómo este tema influye directamente en el desarrollo de nuestra sociedad. El uso excesivo de agroquímicos puede alterar la capacidad del suelo para retener nutrientes, absorber agua y ser viable para el cultivo. Además, está ampliamente implicado en la reducción de las poblaciones de microorganismos necesarios para la producción de enzimas y hormonas esenciales para establecer una relación simbiótica planta/microorganismo, la cual es la base para contar con un terreno fértil y viable para la producción de alimentos. Se puede concluir que el propósito principal del uso óptimo de los agroquímicos, radica en mejorar esa efectividad en los cultivos, evitando la proliferación de plagas que de otra manera reducirían el rendimiento por hectárea. Esto, a su vez, conlleva ventajas para los agricultores ya que, de no ser así, los precios de los alimentos se elevarían debido a las pérdidas ocasionadas en la producción.

Se identifica la necesidad de llevar a cabo estudios experimentales que detallen cómo los mecanismos enzimáticos, en coordinación con la actividad de diversos microorganismos, se ven afectados por el uso de agroquímicos. Es crucial enfocarse en esta perspectiva más detallada en lugar de limitarse a una visión general de los microorganismos afectados, para comprender de manera más precisa y completa los impactos de los agroquímicos en el ecosistema agrícola. Estos hallazgos subrayan la importancia de abordar de manera integral y precisa los efectos del uso de agroquímicos en la agricultura, no solo para garantizar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental, sino también para promover prácticas agrícolas que preserven la salud del suelo y fomenten sistemas de cultivo más resilientes a largo plazo.

Referencias

- Afanador, L. N. (2017). Biofertilizantes: conceptos, beneficios y su aplicación en Colombia. *Ingeciencia*, 2(1), 65-76. https://editorial.ucentral.edu.co/ojs_uc/index.php/Ingeciencia/article/view/2353
- Agbeve, S., Osei-Fosu, P. & Carboo, D. (2014). Levels of organochlorine pesticide residues in *Mondia whitei*, a medicinal plant used in traditional medicine for erectile dysfunction in Ghana. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:43379958>
- Ahmad, S., Chandrasekaran, M. & Ahmad, H. W. (2023). Investigation of the Persistence, Toxicological Effects, and Ecological Issues of S-Triazine Herbicides and Their Biodegradation Using Emerging Technologies: A Review. *Microorganisms*, 11(10), 2558. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102558>
- Alkorta, I., Aizpurua, A., Riga, P., Albizu, I., Amézaga, I. & Garbisu, C. (2003). Soil Enzyme Activities as Biological Indicators of Soil Health. *Reviews on Environmental Health*, 18(1), 65-73. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2003.18.1.65>
- Álvarez, S. (2005). La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano. *Ecosistemas*, 14(2), 17-29. https://www.researchgate.net/publication/26495772_La_descomposicion_de_materia_organica_en_humedales_la_importancia_del_componente_microbiano
- Azcarate, M. P., Montoya, J. C. & Koskinen, W. C. (2015). Sorption, desorption and leaching potential of sulfonyleurea herbicides in Argentinean soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 50(4), 229-237. <https://doi.org/10.1080/03601234.2015.999583>
- Bajsa, N., Morel, M. A., Brañna, V. & Castro Sowinski, S. (2013). The Effect of Agricultural Practices on Resident Soil Microbial Communities: Focus on Biocontrol and Biofertilization. In Frans de Bruijn (Ed.), *Molecular Microbial Ecology of the Rhizosphere* (pp. 687-700). Editorial Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118297674.ch65>
- Beltrán-Pineda, M. E. y Bernal-Figueroa, A. A. (2022). Biofertilizantes: alternativa biotecnológica para los agroecosistemas. *Revista Mutis*, 12(1). <https://doi.org/10.21789/22561498.1771>
- Bini, I., Annabi, A., Jallouli, M., Marzouki, S., Gharbi, N., Elfazaa, S. & Montassar, M. (2016). Carbamates pesticides induced immunotoxicity and carcinogenicity in human: A review. *Journal of Applied Biomedicine*, 14, 85-90. <https://doi.org/10.1016/j.jab.2016.01.001>
- Botero, L. R., Nagles, N., Quintero, J. C. y Peñuela, G. A. (2011). Efecto de la concentración del metil paratión y el extracto de levadura como factores de selección de microorganismos degradadores del pesticida a partir de suelos contaminados. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(19), 13-20. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v10n19/v10n19a02.pdf>
- Bustamante-Osuna L. Z., Cruz-Quiñonez, J. L., Guerrero-Flores, M. C., Medina-Torres, Y. M., Ortiz-Muñoz, M. I. y Rice-Maldonado, M. (2019). Efecto del uso del plaguicida metilparatión sobre las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo en los cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum*) en el predio Campo Chaparral, Unidad Culiacán, México. https://www.researchgate.net/publication/333677151_EFECTO_DEL_USO_DEL_PLAGUICIDA_METIL-PARA-

TION SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL SUELO EN LOS CULTIVOS DE TOMATE *Solanum lycopersicum* EN EL PREDIO CAMPO CHARRAL UNIDAD CULIACAN ME

- Cardona, W. A., Bolaños, M. M. y Chavarriaga, W. (2016). Efecto de fertilizantes químicos y orgánicos sobre la agregación de un suelo cultivado con *Musa acuminata* AA. *Acta Agronómica*, 65(2), 144-148. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n2.44493>
- Cuervo Andrade JL. (2007). Interacción del glifosato (roundup®) con la biota microbiana del suelo y comportamiento de este herbicida en tres suelos del Tolima-Colombia, bajo condiciones controladas. [Tesis Doctoral]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- COP- Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes. (2019). Texto revisado de 2019 del Convenio que incluye enmiendas- Tratado Multilateral Ambiental que busca proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los contaminantes orgánicos persistentes. Documento disponible en: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>
- Cruz-Cárdenas, C. I., Zelaya, L. X., Sandoval, G., de los Santos, S., Rojas, E., Chávez, I. F. y Ruíz, S. (2021). Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: consideraciones y retos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 899-913. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2905/4188>
- del Puerto, A. M., Suárez, S. y Palacio, D. E. (2014). Efectos de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(3), 372-387. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223240764010>
- Díaz-Rodríguez, A. M., Salcedo, L. A., Félix, C. M., Parra-Cota, F. I., Santoyo, G., Puente, M. L., Bhattacharya, D., Mukherjee, J. & de los Santos-Villalobos, S. (2021). The Current and Future Role of Microbial Culture Collections in Food Security Worldwide. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.614739>
- Dilly, O. (2003). Regulation of the respiratory quotient of soil microbiota by availability of nutrients. *FEMS Microbiology Ecology*, 43(3), 375-381. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2003.tb01078.x>
- Dohrmann, A. B., Küting, M., Jünemann, S., Jaenicke, S., Schlüter, A. & Tebbe, C. C. (2012). Importance of rare taxa for bacterial diversity in the rhizosphere of Bt- and conventional maize varieties. *The ISME Journal*, 7(1), 37-49. <https://doi.org/10.1038/ismej.2012.77>
- El Mujtar, V., Muñoz, N., Prack, B., Pulleman, M. & Tiftonell, P. (2019). Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand? *Global Food Security*, 20, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.007>
- Esquivel-Cote, R., Gavilanes-Ruiz, M., Cruz-Ortega, R. y Huante, P. (2013). Importancia agrobiotecnológica de la enzima ACC desaminasa en rizobacterias, una revisión. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(3), 251-258. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=50187-73802013000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Farooq, M. S., Wang, X., Uzair, M., Fatima, H., Fiaz, S., Maqbool, Z., Rehman, O. U., Yousuf, M. & Khan, M. R. (2022). Recent trends in nitrogen cycle and eco-efficient nitrogen management strategies in aerobic rice system.

- Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.960641>
- Fosu-Mensah, B. Y., Okoffo, E. D., Darko, G. & Gordon, C. (2016). Assessment of organochlorine pesticide residues in soils and drinking water sources from cocoa farms in Ghana. *SpringerPlus*, 5, 869. <https://doi.org/10.1186/S40064-016-2352-9>
- Garay, I., Herrera, J., Fernández, J. A., Díaz, A. y Domínguez, E. Y. (2022). Contaminación en el suelo por uso irracional de agroquímicos y sus repercusiones en salud. Actas del VII Congreso de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología. <https://revistas.unicyt.org/index.php/actasidi-unicyt/article/view/54>
- Gómez-Luna, B. E., Hernández-Morales, A., Herrera-Méndez, C. H., Arroyo-Figueroa, G., Vargas-Rodríguez, L. y Olalde-Portugal, V. (2012). Aislamiento de bacterias promotoras del crecimiento de la rizósfera de plantas de guayaba (*Psidium guajava*). *Ra Ximhai*, 8(3), 97-102. <https://doi.org/10.35197/rx.08.03.e1.2012.10.bg>
- Gordon, C. y Marrugo, J. L. (2018). Prácticas Agrícolas Y Riesgos A La Salud Por El Uso De Plaguicidas En Agricultores Subregión Mojana - Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(1), 29-40. <https://doi.org/10.22490/21456453.2098>
- Grandez, G. (2020). *Revisión Sistemática: Efectos de los agroquímicos en la calidad de los suelos agrícolas usando Bioindicadores*, 2020. [Trabajo de grado Pregrado, Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59147>
- Hernández-Soriano, MC; Mingorance, MD; y Peña, A. (2007). Interacción de pesticidas con una interfase de suelo modificada por surfactante: Efecto de las propiedades del suelo. *Coloides y superficies A. Aspectos físico-químicos y de ingeniería*, 306, 49-55.
- Hussain, S., Hartley, C. J., Shettigar, M. & Pandey, G. (2016). Bacterial biodegradation of neonicotinoid pesticides in soil and water systems. *FEMS Microbiology Letters*, 363(23), fnw252. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnw252>
- Ibarra-Villarreal, A. L., Gándara-Ledezma, A., Godoy-Flores, A. D., Herrera-Sepúlveda, A., Díaz-Rodríguez, A. M., Parra-Cota, F. I. & de los Santos-Villalobos, S. (2021). Salt-tolerant *Bacillus* species as a promising strategy to mitigate the salinity stress in wheat (*Triticum turgidum* subsp. durum). *Journal of Arid Environments*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104399>
- IRAC España. (2024). Clasificación del modo de acción de insecticidas y acaricidas incluyendo nematocidas. *Comité de acción contra la resistencia a insecticidas*. (5.1 ed.). <https://irac-online.org/documents/folleto-modo-de-accion-insecticidas-y-acaricidas/>
- Joshi, H., Somduttand, S., Choudhary, P. & Mundra, S. L. (2019). Role of Effective Microorganisms (EM) in Sustainable Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(03), 172-181. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.803.024>
- Krzysko-Lupicka, T. & Sudol, T. (2008). Interactions between glyphosate and autochthonous soil fungi surviving in aqueous solution of glyphosate. *Chemosphere*, 71(7), 1386-1391. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.11.006>

- Landini, F., Beramendi, M. y Vargas, G. L. (2019). Uso y manejo de agroquímicos en agricultores familiares y trabajadores rurales de cinco provincias argentinas. *Revista Argent Salud Pública*, 10(38), 22-28. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/104376/CONICET_Digital_Nro.8932fef3-fbb9-4626-9e88-f4f8c237e4cf_A.pdf?sequence=2
- Li, M., Li, Q., Yao, J., Sunahara, G., Duran, R., Zhang, Q. & Ruan, Z. (2022). Transcriptomic response of *Pseudomonas nicosulfuronedens* LAM1902 to the sulfonylurea herbicide nicosulfuron. *Scientific Reports*, 12, 13656. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17982-7>
- Maphuhla, N. G., Lewu, F. B., y Oyedeji, O. O. (2021). The Effects of Physicochemical Parameters on Analysed Soil Enzyme Activity from Alice Landfill Site. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(1), 221, 1-15. <https://doi.org/10.3390/IJER-PH18010221>
- Mdeni, N. L., Adeniji, A. O., Okoh, A. I. & Okoh, O. O. (2022). Analytical Evaluation of Carbamate and Organophosphate Pesticides in Human and Environmental Matrices: A Review. *Molecules*, 27(3), 618. <https://doi.org/10.3390/molecules27030618>
- Mohammadi, K. (2011). Soil Microbial Activity and Biomass as Influenced by Tillage and Fertilization in Wheat Production. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences (AEJAES)*, 10(3), 330-337. <https://www.researchgate.net/publication/228476702>
- Molina, N. P. y Castro, J. (2018). Síntomas oculares reportados por los trabajadores expuestos a agroquímicos en cultivos de flores. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*. 16(2), 45-53. <https://doi.org/10.19052/sv.5331>
- Ochoa, V., Hinojosa, M. B. Gómez-Muñoz, B. y García-Ruiz, R. (2007). Actividades enzimáticas como indicadores de calidad del suelo en agroecosistemas ecológicos. *Revista de inicio a la investigación Universidad de Jaén*. https://www.researchgate.net/publication/232607805_Actividades_enzimaticas_como_indicadores_de_calidad_del_suelo_en_agroecosistemas_ecologicos
- Ortiz, M. L., Ortiz, L. Y. y Chaves, G. (2013). Efecto de la aplicación de agroquímicos en un cultivo de arroz sobre los microorganismos del suelo. *Acta Agronómica*, 62(1), 66-72. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/30023
- Pertile, M., Lopes, J. E., Araujo, F. F., Mendes, L. W., Van den Brink, P. J. & Ferreira, A. S. (2020). Responses of soil microbial biomass and enzyme activity to herbicides imazethapyr and flumioxazin. *Scientific Reports* 10, 7694, 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64648-3>
- Piotrowski, J. S. & Rillig, M. C. (2008). Succession of Arbuscular Mycorrhizal Fungi: Patterns, Causes, and Considerations for Organic Agriculture. *Advances in Agronomy*, 97, 111-130. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)00003-X)
- Ritika, B. & Utpal, D. (2014). Biofertilizer, a way towards organic agriculture: A review. *African Journal of Microbiology Research*, 8(24), 2332-2343. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6374>
- Sánchez, C., Enríquez, R., López, H. y Velásquez, M. (2018). Estudio cronoamperométrico de la transferencia de triazinas a través de la interfase de dos soluciones electrolíticas inmiscibles. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26(4), 585-592. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000400585>

- Sawunyama, P.; y Bailey, GW 2001. Modelado de la interacción de agroquímicos con superficies ambientales: pesticidas sobre superficies de rutilo y organo-rutilo. *J. Mol. Structure* 541, 119-129.
- Schulz, R., Bub, S., Petschick, L. L., Stehle, S. & Wolfram, J. (2021). Applied pesticide toxicity shifts toward plants and invertebrates, even in GM crops. *Science*, 372(6537), 81-84. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abe1148>
- Silberman J. y Taylor, A. (2023). *Carbamate Toxicity*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482183/>
- Silveira-Gramont, M. I., Aldana-Madrid, M. L., Piri-Santana, J., Valenzuela-Quintanar, A. I., Jasa-Silveira, G. y Rodríguez-Olibarria, G. (2018). Plaguicidas agrícolas: un marco de referencia para evaluar riesgos a la salud en comunidades rurales en el Estado de Sonora, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1), 7-21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.01>
- Simon-Delso, N., Amaral-Rogers, V., Belzunces, L. P., Bonmatin, J. M., Chagnon, M., Downs, C., Furlan, L., Gibbons, D. W., Giorio, C., Girolami, V., Goulson, D., Kreutzweiser, D. P., Krupke, C. H., Liess, M., Long, E., McField, M., Mineau, P., Mitchell, E. A. D., Morrissey, C. A., ... Wiemers, M. (2015). Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 5-34. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3470-y>
- Singh, J. S., Pandey, V. C. & Singh, D. P. (2011). Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(3-4), 339-353. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.017>
- Steinweg, J. M., Dukes J. S., Paul, E. A. & Wallenstein, M. D. (2013). Microbial responses to multi-factor climate change: effects on soil enzymes. *Frontiers in Microbiology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00146>
- Vázquez, M. B., Moreno, M. V., Amodeo, M. R. & Bianchinotti, M. V. (2021). Effects of glyphosate on soil fungal communities: A field study. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(4), 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.10.005>
- Xie, H., Wang, X., Chen, J., Li, X., Jia, G., Zou, Y., Zhang, Y. & Cui, Y. (2019). Occurrence, distribution and ecological risks of antibiotics and pesticides in coastal waters around Liaodong Peninsula, China. *Science of The Total Environment*, 656, 946-951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.449>
- Yu, B., Chen, Z., Lu, X., Huang, Y., Zhou, Y., Zhang, Q., Wang, D. & Li, J. (2020). Effects on soil microbial community after exposure to neonicotinoid insecticides thiamethoxam and dinotefuran. *Science of The Total Environment*, 725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138328>
- Zaragoza-Bastida, A., Valladares-Carranza, B., Ortega-Santana, C., Zamora-Espinosa, J., Velázquez-Ordoñez, V. & Aparicio-Burgos, J. (2016). Implications of the use of organochlorine in the environment, and public health. *Abanico Veterinario*, 6(1), 43-55. <https://www.medigraphic.com/pdfs/abanico/av-2016/av161f.pdf>