



Rivar

REVISTA IBEROAMERICANA DE
VITICULTURA, AGROINDUSTRIA
Y RURALIDAD

Editada por el Instituto
de Estudios Avanzados de la
Universidad de Santiago de Chile

APLICACIÓN DE AGROQUÍMICOS Y REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

*Application of Agrochemicals and Reduction of
Environmental Pollution: A Systematic Review*

*Aplicação de agroquímicos e redução da poluição
ambiental: Uma revisão sistemática*

Estefania Freytez

Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado
Barquisimeto, Venezuela

<https://orcid.org/0000-0002-6133-5555>

estefaniafreytez@gmail.com

Nelly Guananga

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0003-0451-787>

nguananga@esepoch.edu.ec

José Soria

Universidad Nacional de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0001-9464-2263>

vsoria@unach.edu.ec

Patricio Méndez

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-4305-8152>

patricio.mendez@esepoch.edu.ec

Wellington Pincay Ronquillo

Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná
La Maná, Ecuador

<https://orcid.org/0000-0003-3366-6477>

wellington.pincay4586@utc.edu.ec

Vol. 12, N° 35, 268-283, abril de 2025

ISSN 0719-4994

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.35588/jb92sw14>

Recibido

6 de mayo de 2024

Aceptado

20 de agosto de 2024

Publicado

4 de abril 2025

Cómo citar

Freytez, N., Guananga, N., Soria, J., Méndez, P. y Pincay Ronquillo, W. (2025).

Aplicación de agroquímicos y reducción de la contaminación ambiental: Una
revisión sistemática. *RIVAR*, 12(35), 268-283. <https://doi.org/10.35588/jb92sw14>

ABSTRACT

Global agricultural activity is affected by a large number of diseases, insects and weeds, which has led to the excessive use of agrochemicals to maintain adequate yields. The enormous volume of these products used has caused adverse effects on different ecosystems, reflecting the need for sustainable technological innovations that contribute to environmental conservation. In this sense, a systematic review was proposed related to new trends in the application of agrochemicals to reduce environmental pollution. A search of scientific articles published during the period 2014-2024 in the Dialnet, Redalyc, Scielo and Google Scholar databases was carried out, which generated 110 documents evaluated and 29 selected. The literature shows the application of sustainable alternatives in recent years to reduce the adverse effects of agrochemicals on the environment, as well as the use of nanotechnology to produce pesticides and fertilizers with lower pollutant emissions. It is concluded, according to the literature consulted, that the application of agroecological products and nanotechnology represent a feasible way to generate profitable, efficient and environmentally acceptable solutions, which allow us to face the demands of global sustainability of today's society.

■ KEYWORDS

Green chemistry, nanotechnology, environmental degradation, pesticides, soil pollution.

RESUMEN

La actividad agrícola mundial es afectada por una gran cantidad de enfermedades, insectos y malezas, motivando el uso excesivo de agroquímicos para mantener rendimientos adecuados. El enorme volumen utilizado de dichos productos ha provocado efectos adversos sobre diferentes ecosistemas, reflejando la necesidad de innovaciones tecnológicas sustentables que contribuyan con la conservación del ambiente. En este sentido, se planteó realizar una revisión sistemática relacionada con las nuevas tendencias en la aplicación de agroquímicos para reducir la contaminación ambiental. Se desarrolló una búsqueda de artículos científicos publicados durante el periodo 2014-2024 en las bases de datos Dialnet, Redalyc, Scielo y Google Académico, que generó 110 documentos evaluados y 29 seleccionados. La literatura evidencia la aplicación de alternativas sustentables durante los últimos años para disminuir los efectos adversos de los agroquímicos sobre el ambiente, así como también el uso de la nanotecnología para elaborar pesticidas y fertilizantes con menores emisiones de contaminantes. Se concluye, gracias a la literatura consultada, que la aplicación de productos agroecológicos y la nanotecnología representan una vía factible para generar soluciones rentables, eficientes y ambientalmente aceptables, que permitan enfrentar las exigencias de la sostenibilidad global de la sociedad actual.

■ PALABRAS CLAVE

Química verde, nanotecnología, deterioro ambiental, pesticidas, contaminación del suelo.

RESUMO

A atividade agrícola global é afetada por um grande número de doenças, insetos e ervas daninhas, motivando o uso excessivo de agroquímicos para manter rendimentos adequados. O enorme volume destes produtos utilizados tem causado efeitos adversos em diversos ecossistemas, refletindo a necessidade de inovações tecnológicas sustentáveis que contribuam para a conservação do meio ambiente. Nesse sentido, propôs-se a realização de uma revisão sistemática relacionada às novas tendências na aplicação de agroquímicos para redução da poluição ambiental. Foi realizada uma busca de artigos científicos publicados no período 2014-2024 nas bases de dados Dialnet, Redalyc, Scielo e Google Acadêmico, que gerou 110 documentos avaliados e 29 selecionados. A literatura mostra a aplicação de alternativas sustentáveis nos últimos anos para reduzir os efeitos adversos dos agroquímicos ao meio ambiente, bem como o uso da nanotecnologia para produzir pesticidas e fertilizantes com menores emissões de poluentes. Conclui-se, de acordo com a literatura consultada, que a aplicação de produtos agroecológicos e da nanotecnologia representam um caminho viável para gerar soluções lucrativas, eficientes e ambientalmente aceitáveis, que nos permitam enfrentar as demandas de sustentabilidade global da sociedade atual.

■ PALAVRAS-CHAVE

Química verde, nanotecnologia, deterioração ambiental, pesticidas, poluição do solo.

Introducción

La agricultura constituye un sector muy importante del desarrollo económico de los países, principalmente los del tercer mundo porque de ella depende la subsistencia de la mayor parte de la población (Nehra et al., 2016). Para el año 2012, 1.3 billones de personas en el mundo se relacionaban directamente con esta actividad para la producción de capital y futuras ganancias (Freire et al., 2018), destacándose casos de países donde el 42% de la población dependía directamente de la agricultura. Un hecho muy relevante relacionado con este sector es que el crecimiento experimentado en los últimos años de la población mundial ha sido posible por el incremento de la producción de alimentos (Carpio Santos, 2018).

Aún con el incremento a nivel mundial, en la actualidad la producción agrícola es afectada por una gran cantidad de enfermedades, insectos y malezas, que generan pérdidas mundiales de 248.000 millones de dólares anuales (Vásquez-Núñez, 2022), lo que ha motivado a los agricultores a mejorar los rendimientos mediante el uso de agroquímicos. Los agroquímicos son sustancias químicas concentradas destinadas al uso agrícola, donde se incluyen herbicidas, nematocidas, insecticidas, pesticidas, fungicidas y otras variantes utilizadas para estimular el crecimiento productivo (Reyes Palomino y Cano Ccoa, 2022). La categoría de producto es generada por su acción específica, encontrándose los insecticidas que son usados en el control de plagas, los bactericidas y fungicidas, útiles contra el ataque de microorganismos y los herbicidas, que actúan sobre las malezas (Lira-Saldívar et al., 2018a). La aplicación de los agroquímicos es de gran importancia para la protección de los cultivos y para aumentar la producción de alimentos y biocombustibles (Valbuena et al., 2021), estimándose una demanda mundial aproximada de 2.3 millones de toneladas por año (Ordóñez-Beltrán et al., 2019).

El enorme volumen de agroquímicos utilizados en las actividades agrícolas, muchas veces de forma excesiva e indiscriminada, ha generado consecuencias negativas sobre el ambiente, evidenciadas en efectos adversos sobre el suelo, agua, aire, organismos y la salud humana (Elahi et al., 2019), así como también modificaciones en la comunidad de malezas y microorganismos edáficos, aparición de nuevos patógenos y resistencia creciente a los pesticidas por parte de las plagas (Imbach et al., 2017). La alta volatilización y lixiviación de los fertilizantes químicos limita su aprovechamiento y provoca el desvío hacia el suelo y cuerpos de agua, conformando una fuente importante de contaminación ambiental (Sharma y Singhvi, 2017); las pérdidas de nitrógeno procedente de fertilizantes convencionales se ubica entre el 50 y 70%, lo que afecta su disponibilidad para los cultivos (Han et al., 2015). Un 63% de los plaguicidas vendidos con toxicidad levemente aguda son considerados altamente peligrosos (HHP) para los seres humanos o el medio ambiente, siendo necesario el uso de una categorización de peligrosidad (Valbuena et al., 2021). En este sentido, se espera que la demanda de alimentos continúe incrementando al mismo tiempo que se agoten recursos naturales como las tierras de cultivo, el agua y los suelos fértiles (Fukase y Martin, 2020). Por tanto, los investigadores agrícolas enfrentan el desafío de innovar y generar tecnologías para producir alimentos según la calidad y cantidad demandada por la creciente población mundial, pero asegurando la salud de los agroecosistemas (Reyes Palomino y Cano Ccoa, 2022).

Los efectos adversos de los agroquímicos reflejan la necesidad de productos sustentables y más amigables con el ambiente (Reyes Palomino y Cano Ccoa, 2022). La agricultura con-

temporánea requiere intensificar la producción al mismo tiempo que asegure la protección de los recursos naturales, donde el uso racional y seguro de los agroquímicos es clave contra la escasez de alimentos en el futuro (Viera-Arroyo et al., 2020). Asimismo, las limitaciones en disponibilidad de agua y suelo y el incremento de uso de agua para riego ha creado la necesidad de tecnologías enmarcadas dentro de la agricultura sustentable que incluya el uso eficiente de los agroinsumos para reducir los daños a los ecosistemas (Vásquez-Núñez, 2022).

Entre los cambios relacionados con el uso de agroquímicos, que involucran la evolución hacia una agricultura sustentable de menor impacto ambiental, se encuentran la promoción de la salud del suelo, detección, control rápido y preciso de pesticidas, plagas, patógenos y estado nutricional de plantas y suelo y el uso adecuado de fertilizantes y pesticidas (Lira-Saldívar et al., 2018b). Al respecto, en los últimos años se han observado grandes avances y desarrollos e innovaciones tecnológicas en el sector agrícola relacionados con el manejo adecuado de agroquímicos a fin de garantizar la seguridad alimentaria y alcanzar la producción sostenible de alimentos (Vásquez-Núñez, 2022).

Una de las alternativas presentadas para evitar efectos adversos de los agroquímicos sobre los diferentes ecosistemas es el desarrollo y aplicación de productos ecológicos en las actividades agrícolas, ya que no generan efectos secundarios sobre el ambiente (Orozco Corral et al., 2016). De manera similar, la nanotecnología ha sido mencionada como una herramienta científica útil para detectar la presencia de enfermedades, plagas y para aplicar la cantidad correcta de pesticidas y nutrientes que promuevan la productividad, lo que incrementa la eficiencia de los insumos agrícolas y garantiza la seguridad del medioambiente (Lira-Saldívar et al., 2018a).

Por la situación expuesta y la diversidad tecnológica disponible para enfrentar los efectos adversos de los agroquímicos sobre el medio ambiente, se planteó como objetivo del estudio realizar una revisión sistemática relacionada con las nuevas tendencias en la aplicación de agroquímicos para reducir la contaminación ambiental.

Métodos

Se desarrolló una revisión sistemática según la lista de verificación de 27 elementos y el diagrama de flujo de la Declaración PRISMA (Page et al., 2021). La búsqueda de literatura consistió en seleccionar artículos científicos originales indexados en las bases de datos Dialnet, Redalyc, Scielo y Google Académico utilizando las palabras clave en español y en inglés: "química verde/green chemistry", "nanotecnología/nanotechnology", "deterioro ambiental/environmental degradation", "pesticidas/pesticides" y "contaminación del suelo/soil pollution". Los descriptores establecidos fueron combinados para obtener resultados de búsqueda más concretos empleando los operadores booleanos "AND" y "OR" en los sistemas de información e indización científica utilizados.

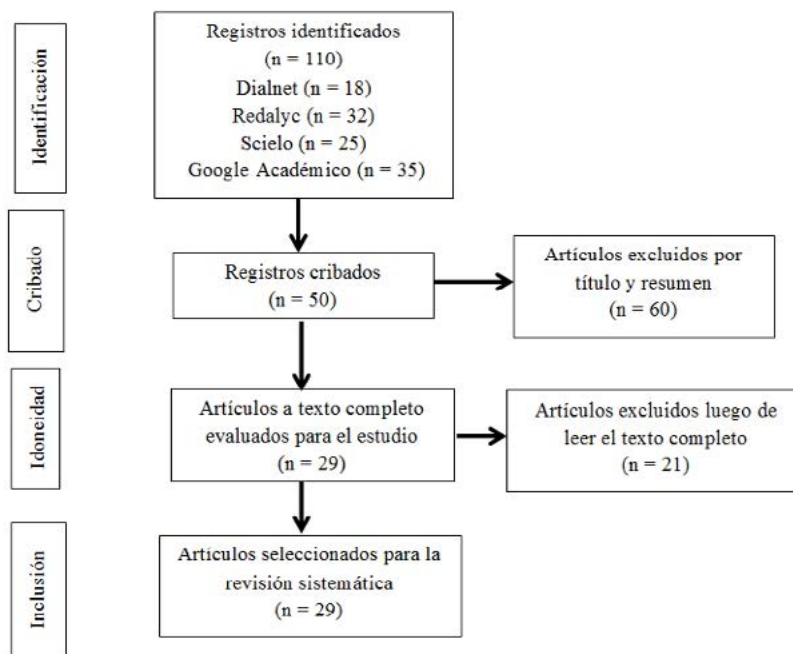
Los criterios de inclusión aplicados en el estudio fueron: a) artículos científicos originales o en revisión, b) publicados en español o inglés c) disponibles en acceso abierto y d) publicaciones entre los años 2014-2024. Posteriormente, se excluyeron de forma manual los artículos duplicados y aquellos que dentro del título y resumen no evidenciaron los referentes teóricos relacionados con el tema en estudio.

Una vez seleccionados los artículos, se procedió con la revisión para extraer la información relevante e identificar técnicas y estrategias novedosas relacionadas con la reducción de la contaminación generada por los agroquímicos. Con la información extraída se construyó una matriz abarcando la referencia bibliográfica y la estrategia identificada.

Resultados y discusión

De la selección realizada a partir de los sistemas de información e indexación científica utilizados y con base a los criterios definidos por la declaración PRISMA, se obtuvieron 29 documentos que trataron del tema en estudio, tal como se muestra en la Figura 1. Según estos criterios se generaron 110 artículos, la mayor parte procedentes de la base de datos Google Académico ($n = 35$), mientras que la base de datos Dialnet fue la que aportó menor cantidad de documentos ($n = 18$). Luego, con la lectura del título y el resumen se consideraron adecuados 50 artículos y posteriormente fueron descartados 21 al leer el texto completo y detectarse que salían del contexto del estudio. Finalmente 29 artículos cumplieron los criterios de inclusión y fueron seleccionados para realizar la revisión sistemática, reflejándose la importancia del tema en los últimos años por el volumen de documentos elegidos.

Figura 1. Diagrama de flujo Prisma para seleccionar los artículos de investigación
Figure 1. Prism flowchart for selecting research articles



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

En Tabla 1 se observan los resultados de la organización de los artículos según el autor, año y la novedad presentada en agroquímicos, donde se observan diferentes técnicas para enfrentar el impacto ambiental generado por el uso de agroquímicos, relacionadas principalmente con la agroecología y la nanotecnología.

Tabla 1. Nuevas tendencias en aplicación de agroquímicos
Table 1. New trends in the application of agrochemicals

Autores y autoras	Nuevas tendencias
Santos et al., 2014	Bioplaguicida a base del nucleopoliedrovirus de <i>Spodoptera frugiperda</i>
Kah, 2015	Nanotecnología
Méndez-Argüello et al., 2016	Nanopartículas de óxido de zinc
Nehra et al., 2016	Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en cultivos de algodón
Orozco Corral et al., 2016	Biofertilizante líquido, lombricomposta y aserrín de pino para aumentar la fertilidad del suelo
Rivera-Méndez et al., 2016	Control biológico del hongo <i>Sclerotium cepivorum</i> utilizando <i>Trichoderma asperellum</i> en el cultivo del ajo
Lagler, 2017	Biofertilizantes
Álvarez-Palomino et al., 2018	Abonos orgánicos bocashi y compostaje
Armendáriz Barragán et al., 2018	Nanoherbicidas de poli-ε-caprolactona y nanofertilizantes de zinc
Lira-Saldívar et al., 2018a	Nanofertilizantes y nanopesticidas
Lira-Saldívar et al., 2018b	Nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y nanosensores
Moreno Reséndez et al., 2018	Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal como biofertilizantes
Quispe Quezada, 2018	Agricultura orgánica
Martínez-Centeno y Huerta, 2018	Biotecnología en las prácticas agrícolas
Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2019	Bioinsecticidas botánicos
Yadav et al., 2019	Formulaciones agrícolas de nanopartículas
Álvarez-García et al., 2020	Pseudomonas fluorescens como biocontrol
Cotrino et al., 2020	Abonos bocashi y gallinaza
Viera-Arroyo et al., 2020	Hongo <i>Trichoderma</i> spp. para control biológico en aplicaciones agrícolas sostenibles
Marín-Bustamante et al., 2021	Nanofertilizantes y nanopesticidas
Abdollahdokht et al., 2022	Nanotecnología en formulaciones de biopesticidas
An et al., 2022	Nanomateriales en pesticidas y fertilizantes químicos
Duante, 2022	Nanopesticidas y nanofertilizantes
Martez, 2022	Nanopesticidas y nanofertilizantes
Reyes Palomino y Cano Ccoa, 2022	Agroquímicos sustentable
Tejeda Villagómez et al., 2022	Nanopartículas de silicio
Vázquez-Núñez, 2022	Nanofertilizantes y nanoplaguicidas
Zelaya-Molina et al., 2022	Insectos benéficos para controlar insectos plagas
López-Maldonado, 2023	Nanotecnología en sistemas productivos

Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

En Tabla 2 se observa que de la bibliografía seleccionada 16 artículos contienen alternativas relacionadas con el uso de productos agroecológicos, y 15 se relacionan con la aplicación de la nanotecnología para la fabricación de agroquímicos con menor impacto negativo sobre el ambiente. Cabe señalar que dos documentos trataron ambos temas mencionados.

Tabla 2. Tema principal de la literatura consultada
Table 2. Main theme of the literature consulted

Tema	Referencia	Total de referencias
Uso de productos ecológicos	Santos et al., 2014 Nehra et al., 2016 Orozco Corral et al., 2016 Rivera-Méndez et al., 2016 Lagler, 2017 Martínez-Centeno y Huerta, 2018 Moreno Reséndez et al., 2018 Quispe Quezada, 2018 Álvarez-Palomino et al., 2018 Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2019 Cotrina et al., 2020 Viera-Arroyo et al., 2020 Álvarez-García et al., 2020 Abdollahdokht et al., 2022 Reyes Palomino y Cano Ccoa, 2022 Zelaya-Molina et al., 2022	16
Aplicación de la nanotecnología en el desarrollo de agroquímicos	Kah, 2015 Méndez-Argüello et al., 2016 Armendáriz Barragán et al., 2018 Lira-Saldívar et al., 2018a y 2018b Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2019 Yadav et al., 2019 Marín-Bustamante et al., 2021 Abdollahdokht et al., 2022 An et al., 2022 Duante, 2022 Martez, 2022 Tejeda Villagómez et al., 2022 Vázquez-Núñez, 2022 López-Maldonado, 2023	15

Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

En la literatura consultada se han encontrado evidencias de diferentes técnicas para reducir la contaminación ambiental procedente de los agroquímicos. De acuerdo a Reyes Palomino y Cano Ccoa (2022), es necesario implementar productos ecológicos que mejoren las interacciones del ecosistema agrícola con el medio ambiente, a fin de contrarrestar el enorme uso de agroquímicos en la agricultura intensiva que afecta los patrones naturales de la biodiversidad de los ecosistemas terrestres. Quispe Quezada (2018) indica que la agricultura ecológica integra uno de los varios enfoques para el desarrollo de sistemas de producción sostenibles de la agricultura mundial, ya que es lo opuesto al uso de agroquímicos que han ocasionado grandes problemas de contaminación ambiental en varias regiones del planeta.

Una vía para disminuir la aplicación de agroquímicos es el uso de microorganismos que actúan favoreciendo la accesibilidad de agua, reduciendo la pérdida de nutrientes, mejorando el estrés hídrico, inhibiendo el ataque de fitopatógenos y manteniendo las tasas de crecimiento activo del cultivo. Al respecto, cepas de *Pseudomonas fluorescens* en presencia de fósforo ($25 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) han aumentado el rendimiento del grano de haba (*Vicia faba*) entre 42 y 65% en relación a las plantas no inoculadas, mientras que, combinada con fertilizantes en los suelos, estimula el crecimiento del garbanzo (*Cicer arietinum*), incrementa el peso de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y aumenta el rendimiento de legumbres. También tienen capacidad para colonizar las raíces de la papa (*Solanum tuberosum*), caña de

azúcar, betabel (*Beta vulgaris* L.) y rábano (*Raphanus sativus*) y para promover el crecimiento y producción de tomate (*Solanum lycopersicum*) (Álvarez-García et al., 2020).

El bioplaguicida elaborado con el nucleopoliedrovirus de *Spodoptera frugiperda* resulta adecuado para usarse en el cultivo de maíz, mostrando compatibilidad con los agroquímicos empleados comúnmente en este rubro y estabilidad en almacenamiento sin refrigeración durante 17 meses, superior a otros bioproductos a base de hongos o bacterias, que exhiben menor vida útil y demandan cadena de frío para su comercialización y distribución (Santos et al., 2014). De manera similar, el *Trichoderma asperellum* ha mostrado eficacia similar a los controles químicos aplicados en el hongo *Sclerotium cepivorum*; indicando que la sustitución de plaguicidas por el uso de métodos a base de microorganismos constituye una alternativa para contribuir con la sostenibilidad y disminuir los efectos negativos de las actividades agrícolas sobre el ambiente (Rivera-Méndez et al., 2016).

La aplicación de biofertilizantes a base de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) han mejorado el crecimiento de las plantas, la disponibilidad de los elementos nutritivos y los rendimientos agrícolas, constituyendo una opción sustentable para reducir el uso en la agricultura de los fertilizantes sintéticos (Nehra et al., 2016). Desde el punto de vista de sustentabilidad, se requiere estudiar las potencialidades de las RPCV en cultivos de importancia económica y social para la consecuente preservación del ambiente (Moreno Reséndez et al., 2018).

El control de plagas en la agricultura también se puede realizar aprovechando las propiedades de algunos productos naturales derivados de plantas y microorganismos, que generalmente son biodegradables y no afectan el equilibrio de los ecosistemas. Para el control de insectos han sido efectivos los agentes activos disulfuro de alilpropilo y alicina del ajo (*Allium sativum*), ricinina y ricina de la higuera (*Ricinus communis*) y resina de la gobernadora (*Larrea tridentata*) (Zelaya-Molina et al., 2022). De manera similar, el *Trichoderma spp.* es un hongo antagonista ampliamente utilizado en aplicaciones agrícolas sostenibles para control biológico y por su efecto en procesos de biorremediación, descomposición y crecimiento de plantas. Este hongo ha sido útil para prevenir y controlar enfermedades como mal de semillero, marchitez, la pudrición de la raíz, pudrición de la fruta, entre otras, recomendándose aplicarlo solo y no en combinación con otro biocontrolador, ya que presenta cepas antagonistas que pueden afectar a otros microorganismos además de los patógenos (Viera-Arroyo et al., 2020).

Otra opción ecológica mencionada en la literatura para disminuir el uso de agroquímicos es la recuperación y mantenimiento de los suelos agrícolas por aplicación de abono orgánico. El bocashi y el compostaje son los métodos más utilizados por sus grandes potencialidades para incorporar materia orgánica a los suelos y corregir las carencias nutricionales, representando una herramienta para disminuir el uso de fertilizantes sintéticos (Álvarez-Palomino et al., 2018). Por su parte, Cotrina et al. (2020) muestran los beneficios de los abonos bocashi y gallinaza para mejorar las propiedades químicas de los suelos y aumentar las concentraciones de macronutrientes, principalmente nitrógeno, con la particularidad del bocashi de reducir la acidez. De manera similar, Orozco Corral et al. (2016) reportaron aumento de la fertilidad del suelo por la combinación de biofertilización, fertilización química, lombricomposta y aserrín de pino como acolchado, comportamiento reflejado en mejora de la capacidad de almacenamiento de agua (10,36%), capacidad de intercambio catiónico (83,05%), materia orgánica (24,41%) y la biomasa microbiana (113,99%).

Los bioinsumos también constituyen una de las soluciones sustentables actuales para incorporar prácticas agrícolas amigables con el ambiente, donde intervienen diferentes microorganismos que mejoran el uso de nutrientes, que se traduce en promoción de crecimiento vegetal, fijación de nitrógeno, solubilización de nutrientes, efectos de biocontrol y mejora de la tolerancia a patógenos (Lagler, 2017). De la misma manera, la aplicación de la biotecnología en las prácticas agrícolas es otra alternativa para salvaguardar los recursos y proteger el futuro productivo. Además, hay que considerar las maneras tradicionales de cultivar que no perjudican la tierra, a fin de evitar la caída del sector productivo y aumentar la vida de los recursos naturales (Martínez-Centeno y Huerta, 2018).

En la revisión sistemática realizada se observa que la nanotecnología ha alcanzado diferentes aplicaciones dentro de la rama de la agricultura sustentable o ecológica (Figura 2), donde resalta el uso de nanopartículas en la elaboración de agroquímicos (nanoherbicidas, nanofertilizantes y nanopesticidas, entre otros) con menor impacto negativo sobre el ambiente. Por medio de esta tecnología se puede emplear la cantidad correcta del componente activo y elaborar así pesticidas que afecten únicamente a la plaga objetiva y fertilizantes que liberen los nutrientes que realmente requieran las plantas (Duante, 2022), garantizando de esta manera una mayor eficiencia en el uso de insumos agrícolas y la seguridad ambiental (Lira-Saldívar et al., 2018a)

Figura 2. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura
Figure 2. Applications of nanotechnology in agriculture



Fuente/source: Armendáriz Barragán et al. (2018).

El avance principal de la nanotecnología en el desarrollo de agroquímicos sustentables es el encapsulamiento de ingredientes activos (nutrientes, fungicidas, fertilizantes, insecticidas y herbicidas) en nanopartículas elaboradas con matrices poliméricas y metálicas (Marín-Bustamante et al., 2021), a fin de reducir las pérdidas por lixiviación y volatilización e incrementar su eficiencia (Lira-Saldívar et al., 2018b). Los nanoencapsulados provocan una liberación lenta y controlada, lo que aumenta su nivel de acción y disminuye la cantidad del producto por aplicar (Kah, 2015). La cantidad óptima del ingrediente activo se coloca en la zona ideal del cultivo, evitando el problema del uso excesivo y desproporcionado de agroquímicos, por lo tanto, constituye una alternativa para la protección ambiental (Marín-Bustamante et al., 2021). Las nanopartículas son aplicadas por aspersión al follaje de las plantas y en el suelo mediante el sistema de riego.

Se ha optimizado la forma, tamaño y concentración de las nanopartículas para mejorar su penetración en la planta, obteniéndose mayor crecimiento vegetal con nanopartículas menores a 5 ppm. En el caso de los nanofertilizantes foliares, es recomendable tamaños de nanopartículas menores a 20 nm para que puedan acceder al interior de las plantas mediante la apertura de los estomas, cuyo tamaño varía entre 10 a 60 μm (Lira-Saldívar et al., 2018b).

En relación al material utilizado en las matrices, se ha reportado que las nanopartículas de Cu presentan un amplio espectro de acción contra hongos y bacterias fitopatógenas, atribuido a la habilidad de este metal para aceptar o donar electrones, generando alto nivel de reducción potencial y oxidación catalítica. De manera similar, las nanopartículas a base de carbono han mejorado el crecimiento de las plantas de lechuga, repollo, pepino, zanahoria, tomate, cebolla y tabaco, considerándose una mejor opción en relación al fertilizante convencional debido a la liberación lenta o controlada de nutrientes que mejora la asimilación y aumenta la eficiencia de aplicación, absorción y utilización (Lira-Saldívar et al., 2018b). El tamaño de los nano tubos de carbono facilita su entrada a través de las membranas y paredes celulares, convirtiéndolos en una opción eficiente para el transporte de agua y nutrientes dentro de las plantas (López-Maldonado, 2023).

Se ha reportado la elaboración de nanofertilizantes amigables con el ambiente con materiales que mejoran la absorción y difusión de nutrientes y el crecimiento vegetal, incrementando la capacidad fotosintética de las plantas y el índice de área foliar (Marín-Bustamante et al., 2021). Diversos materiales nanoestructurados como zeolitas, quitosano, ácido poliacrílico, hidroxiapatita y nanoarcillas se han empleado en el desarrollo de fertilizantes de aplicación foliar o en suelo (An et al., 2022), los cuales son estimulados por agentes ambientales químicos y físicos para asegurar la proveeduría de nutrientes y el crecimiento de las plantas. La hidroxiapatita presenta un área superficial grande, ideal para las interacciones con urea y lograr suministrar nitrógeno durante más de 60 días, equivalente al doble que exhiben los fertilizantes comunes (nitrato de amonio o urea) que solo lo hacen hasta treinta días (Vázquez-Núñez, 2022).

También se ha observado que las nanopartículas de ZnO en el cultivo del sorgo (*Pennisetum americanum*) han logrado promover el crecimiento del tallo y el aumento del rendimiento de grano. De manera similar, la aplicación foliar de nanopartículas de óxido de titanio en plantas de *Vigna radiata* incrementa el crecimiento de forma significativa (Vázquez-Núñez, 2022). Por otro lado, nanopartículas de ZnO han mejorado la absorción en sitios específicos de las plantas de los macronutrientes utilizados como coberturas (Armendáriz Barragán et

al., 2018). Mientras que la aplicación foliar de nanopartículas de óxido de zinc con plata ha aumentado significativamente el crecimiento y producción de biomasa seca en plantas de *Capsicum annuum*. (Méndez-Argüello et al., 2016).

Adicionalmente, se conoce que los nanofertilizantes con micronutrientes pueden promover el crecimiento de las plantas al mejorar la salud del suelo. En este sentido, los nanotubos de carbono de paredes múltiples han mejorado el crecimiento del maíz (*Zea mays*) al incrementar la absorción micronutrientes y agua. Asimismo, la aplicación de nanodióxido de titanio ha promovido la actividad fotosintética y la síntesis de clorofila de las espinacas (*Spinacia oleracea* L.) al aumentar la eficiencia de absorción de iones. Por tanto, por medio de la nanotecnología se incrementa la eficiencia de absorción de las plantas, disminuyendo de esta manera los requisitos de fertilizantes y las emisiones de contaminantes al ambiente (Yadav et al., 2019).

Las sustancias húmicas (SH) constituyen un componente importante de los suelos, ya que estabilizan Fe coloidal. Esta propiedad se ha aprovechado en compósitos de SH-Fe unidos a N, P y K, que han exhibido buena asimilación y aprovechamiento por parte de las plantas al mismo tiempo que reducen el riesgo de daño ambiental, lo que representa una ventaja competitiva frente a los fertilizantes convencionales (Vázquez-Núñez, 2022).

La nanotecnología también es usada en el desarrollo de nuevos productos contra plagas, representando una alternativa ecológica para el manejo de enfermedades fitopatogénicas al incorporar ciertas nanopartículas metálicas y microorganismos benéficos a matrices zeolíticas (Lira-Saldívar et al., 2018a). La nanotecnología tiene potencial para el desarrollo de bioinsecticidas botánicos altamente eficientes en el control de plagas de insectos y con beneficios al medio ambiente (Hernández-Tenorio y Orozco-Sánchez, 2019), así como también es útil para formular biopesticidas estables con efectos a largo plazo (Abdollahdokht et al., 2022). Martez (2022) menciona la elaboración de plaguicidas a base de neem (*Azadirachta indica*) en forma de nanopartículas con diámetros medios entre 150 y 250 nm, muy eficaces en diferentes tipos de plagas de plantas.

Algunos hongos antagonistas de patógenos sirven como unidades de biofabricación, donde la facilidad de manejo y producción de algunas especies, la naturaleza no patogénica y respeto al ambiente, contribuyen a la fabricación en masa para apoyo de la agricultura sustentable o ecológica. También se ha encontrado buen control del hongo *Alternaria alternata* al mezclar ácido cítrico con nanotubos de carbón, demostrando que pueden ser empleados en dosis muy bajas como fungicidas en la agricultura moderna para disminuir el impacto negativo a los agroecosistemas. Además, se ha reportado un aumento de la expresión de la proteína tóxica de *Bacillus thuringiensis* en plantas de algodón transgénico usando insecticidas a base de nanopartículas metálicas de óxido de cobre a bajas concentraciones (Lira-Saldívar et al., 2018a).

Las nanopartículas poliméricas biodegradables son útiles para detener el desarrollo y crecimiento de enfermedades ocasionadas por hongos y bacterias y para la aplicación controlada y focalizada de nanoherbicidas, evitando así el exceso de químicos que afectan la calidad del agua y disminuyen la fertilidad del suelo (López-Maldonado, 2023). Las nanocápsulas de *poli-ε-caprolactona* se han utilizado para la aplicación de los herbicidas simazina, atrazina y ametrina. En el caso de la atrazina, se ha logrado controlar el crecimiento de

las especies blanco sin afectar la seguridad de las especies no blanco, además las nanocápsulas reducen la dispersión de la atrazina y exhiben estabilidad con el compuesto activo (Armendáriz Barragán et al., 2018).

Hoy en día, las nanopartículas de silicio son utilizadas ampliamente como transportadoras de compuestos químicos con efectos pesticidas y herbicidas, ofreciendo mejores resultados en el desarrollo de pesticidas, donde se logra el control de insectos y hongos sin afectar el ambiente. Las nanopartículas de silicio se muestran como una excelente alternativa para reducir el uso de agroquímicos y se consideran sistemas eficaces para administrar nutrientes y compuestos químicos en plantas y cultivos de interés agrícola (Tejeda Villagómez et al., 2022).

En el futuro, se espera que a través de la nanotecnología se pueda detectar y tratar una deficiencia de nutrientes en las plantas o una infección por hongos y bacterias antes que se presenten los síntomas visibles. También se considera posible el diseño de sistemas que ataquen sitios de emisiones químicas específicas en las plantas (Lira-Saldívar et al., 2018b).

Conclusión

La revisión exhaustiva de la literatura científica evidencia una tendencia durante los últimos años al uso de alternativas ecológicas y sustentables para disminuir los efectos de los agroquímicos sobre el ambiente, basadas principalmente en la aplicación de bioplaguicidas y biofertilizantes para el control de plagas y enfermedades y el empleo de abono orgánico para mantener y recuperar la salud de los suelos. También es común el uso de bioinsumos y la biotecnología en las prácticas agrícolas, a fin de preservar los principales recursos naturales.

Otra práctica observada en la bibliografía consultada para combatir el impacto de los agroquímicos sobre el ambiente es el uso de la nanotecnología, que minimiza las emisiones de contaminantes por medio del control de la liberación y el uso de la cantidad adecuada de los componentes activos. Los estudios muestran la optimización de la forma, tamaño, concentración y material de las nanopartículas y el desarrollo de nanofertilizantes y nanopesticidas como una alternativa ecológica para el manejo de enfermedades y plagas y promover el desarrollo de las plantas.

Tomando en consideración la información mostrada por la literatura, la aplicación de productos agroecológicos y de la nanotecnología representan una vía factible para generar soluciones rentables, eficientes y ambientalmente aceptables, que permitan enfrentar las exigencias de la sostenibilidad global de la sociedad actual.

Bibliografía

- Abdollahdokht, D., Gao, Y., Faramarz, S., Poustforoosh, A., Abbasi, M., Asadikaram, G. y Nematollahi, M.H. (2022). Conventional Agrochemicals Towards Nano-Biopesticides: An Overview on Recent Advances. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00281-0>
- Álvarez-García, J.A., Santoyo, G. y Rocha-Granados, M. del C. (2020). *Pseudomonas fluorescens*: Mecanismos y aplicaciones en la agricultura sustentable. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 16(1), 1-10. <https://doi.org/10.33154/rlrn.2020.01.01>
- Álvarez-Palomino, L., Vargas-Bayona, J.E. y García-Díaz, L.K. (2018). Abono orgánico: Aprovechamiento de los residuos orgánicos agroindustriales. *Spei Domu*, 14(28-29), 1-10. <https://doi.org/10.16925/2382-4247.2018.01.04>
- An, C. et al. (2022). Nanomaterials and Nanotechnology for the Delivery of Agrochemicals: Strategies Towards Sustainable Agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), 1-19.
- Armendáriz Barragán, B., Álvarez Román, R., Elaissari, A., Hatem, F., Oranday Cárdenas, A. y Galindo Rodríguez, S.A. (2018). La nanotecnología en las ciencias biológicas. *Biología y Sociedad*, 1(1), 108-125.
- Carpio Santos, L.K. (2018). El uso de la tecnología en la agricultura. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 2(14), 25-32. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol2iss14.2018pp25-32>
- Cotrina, V., Alejos, I., Cotrina, G., Córdova, P. y Córdova, I. (2020). Efecto de abonos orgánicos en suelo agrícola de Purupampa Panao, Perú. *Centro de Investigaciones Agropecuarias*, 47(2), 31-40. <https://doi.org/10.33326/29585309.2023.1.2008>
- Duante, C. (2022). Utilización de la nanotecnología en el desarrollo de fertilizantes orgánicos y pesticidas. *Revista Internacional de Revista Científica*, 4(2), 172-178.
- Elahi, E., Weijun, C., Zhang, H. y Nazeer, M. (2019). Agricultural Intensification and Damages to Human Health in Relation to Agrochemicals: Application of Artificial Intelligence. *Land Use Policy*, 83, 461-474. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.023>
- Freire, C.E., Govea, K. y Arguello, J. (2018). Importancia de la agricultura en una economía dolarizada. *Revista Espacios*, 39(16).
- Fukase, E. y Martin, W. (2020). Economic Growth, Convergence, and World Food Demand and Supply. *World Development*, 132, 104954. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104954>
- Han, M., Okamoto, M., Beatty, P. H., Rothstein, S. J. y Good, A.G. (2015). The Genetics of Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Annual Review of Genetics*, 49, 269-289. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-112414-055037>

- Hernández-Tenorio, F. y Orozco-Sánchez, F. (2019). Nanoformulaciones de bioinsecticidas botánicos para el control de plagas agrícolas. *Revista de La Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia*, 9(1), 72-91.
<https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v9n1.81401>
- Imbach, P. et al. (2017). Climate Change, Ecosystems and Smallholder Agriculture in Central America: An Introduction to the Special Issue. *Climatic Change*, 141, 1-12.
<https://doi.org/10.1007/s10584-017-1920-5>
- Kah, M. (2015). Nanopesticides and Nanofertilizers: Emerging Contaminants or Opportunities for Risk Mitigation? *Frontiers in Chemistry*, 3, 1-6.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2015.00064>
- Lagler, J.C. (2017). Bioinsumos: Distintas percepciones haciendo foco en la fertilización biológica. *Agronomía y Ambiente*, 37(1), 73-89.
- Lira-Saldívar, R.H., Méndez Argüello, B., Vera Reyes, I. y De los Santos Villarreal, G. (2018a). Agronanotechnology: A New Tool for Modern Agriculture. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 50(2), 395-411.
- _____. (2018b). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9-24. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>
- López-Maldonado, V. (2023). Uso de la nanotecnología en los diferentes sistemas productivos. *Milenaria, Ciencia y Arte*, 22, 19-22.
<https://doi.org/10.35830/mcya.vi22.410>
- Marín-Bustamante, M.Q., Hernández-Flores, A. y Cásarez-Santiago, R.G. (2021). Nanotecnología y agricultura: Detección, monitoreo y remediación de contaminantes. *Salud y Administración*, 8(23), 29-35.
- Martez, L. (2022). Uso de la nanotecnología en el desarrollo de fertilizantes orgánicos y pesticidas. *International Journal of Science and Society*, 4(4), 547-556.
<https://doi.org/10.54783/ijssoc.v4i4.604>
- Martínez-Centeno, A.L. y Huerta Sobalvarro, K.K. (2018). La revolución verde. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(8), 1040-1045.
<https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i8.6717>
- Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L.A., Puente-Urbina, B.A. y Lira-Saldívar, R.H. (2016). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 8(2), 140-156.
- Moreno Reséndez, A., García Mendoza, V., Reyes Carrillo, J.L., Vásquez Arroyo, J. y Cano Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: Una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20(1), 68-83. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>

- Nehra, V., Saharan, B.S. y Choudhary, M. (2016). Evaluation of *Brevibacillus brevis* as a Potential Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Cotton (*Gossypium hirsutum*) crop. *SpringerPlus*, 5, 948. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2584-8>
- Ordóñez-Beltrán, V., Frías-Moreno, M.N., Parra-Acosta, H. y Martínez-Tapia, M.E. (2019). Estudio sobre el uso de plaguicidas y su posible relación con daños a la salud. *Revista de Toxicología*, 36(2), 148-153.
- Orozco Corral, A.L., Valverde Flores, M.I., Téllez, R.M., Bustillos, C.C. y Hernández, R.B. (2016). Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con biofertilización cultivado con manzano. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 441-456.
- Page, M.J. et al. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74, 790-799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.10.020>
- Quispe Quezada, U.R. (2018). Producción orgánica sostenible y su demanda en el mundo al 2030. *Udaff*, 4(1), 37-47.
- Reyes Palomino, S.E. y Cano Ccoa, D.M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 24(1), 53-64. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- Rivera-Méndez, W., Zúñiga-Vega, C. y Brenes-Madriz, J. (2016). Control biológico del hongo *Sclerotium cepivorum* utilizando *Trichoderma asperellum* en el cultivo del ajo en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(7), 41.
- Santos, A.M., Uribe, L.A., Ruiz, J.C., Tabima, L., Gómez, J.A. y Villamizar, L.F. (2014). Nucleopoliedrovirus de *Spodoptera frugiperda* SfNPV003: Compatibilidad con agroquímicos y estabilidad en condiciones de almacenamiento. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 15(2), 219-228. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num2_art:361
- Sharma, N. y Singhvi, R. (2017). Effects of Chemical Fertilizers and Pesticides on Human Health and Environment: A Review. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 10(6), 675. <https://doi.org/10.5958/2230-732x.2017.00083.3>
- Tejeda Villagómez, E.A., Hernández-Adame, L., Nieto Navarro, F. y Anzaldo Montoya, M. (2022). Nanopartículas de silicio como vehículos de transporte para moléculas de interés agrícola. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(30), 1e-20e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69732>
- Valbuena, D., Cely-Santos, M. y Obregón, D. (2021). Agrochemical Pesticide Production, Trade, and Hazard: Narrowing the Information Gap in Colombia. *Journal of Environmental Management*, 286, 112141. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112141>
- Vázquez-Núñez, E. (2022). Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(30), 1e-25e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69704>

- Viera-Arroyo, W.F. et al. (2020). Control biológico: Una herramienta para una agricultura sustentable, un punto de vista de sus beneficios en Ecuador. *Journal of the Selva Biosphere*, 8(2), 128-149. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2020.080200128>
- Yadav, S.K. et al. (2019). Use of Nanotechnology in Agri-food Sectors and Apprehensions: An Overview. *Seed Reserch*, 47(2), 99-149.
- Zelaya-Molina, L.X., Chávez-Díaz, I. F., De los Santos-Villalobos, S., Cruz-Cárdenas, C.I., Ruíz-Ramírez, S. y Rojas-Anaya, E. (2022). Control biológico de plagas en la agricultura mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 27, 69-79. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i27.3251>