



# POSGRADOS

## MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES CON MENCIÓN EN REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

RPC-SO-17-NO.363-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:  
ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

TEMA:  
EL USO DE AGROQUÍMICOS Y LA  
SOSTENIBILIDAD EN LOS SISTEMAS  
DE PRODUCCIÓN: UNA REVISIÓN  
CRÍTICA

AUTOR(ES)  
ENITH VANESSA YÁNEZ RAMÍREZ

DIRECTOR:  
MANUEL ERNESTO DELGADO  
FERNÁNDEZ

QUITO – ECUADOR  
2025



**Autor(es):**



Enith Vanessa Yáñez Ramírez  
Ingeniera Química  
Candidata a Magíster en Recursos Naturales Renovables con  
Mención en Remediación y Restauración por la Universidad  
Politécnica Salesiana – Sede Quito  
eyanezr@est.ups.edu.ec

**Dirigido por:**



**Manuel Ernesto Delgado Fernández**  
Licenciado en Ciencias de la Educación en la Especialidad de  
Química, Biología y Ciencias Naturales  
Magister en Tecnologías para el Aprovechamiento de Recursos  
Naturales No Tradicionales  
Dottore di Ricerca in Ecologia Sperimentale e Geobotanica  
mdelgado@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2025 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

**Enith Vanessa Yáñez Ramírez**

***El uso de agroquímicos y la sostenibilidad en los sistemas de producción: una revisión crítica***

## ***DEDICATORIA***

Dedico este trabajo a Enith, por la constancia, la fe y la fortaleza que me han sostenido en este camino. Y aquellos seres maravillosos Bambú y Chiripa, cuyo amor incondicional y dulce compañía, han sido mi apoyo y motivación en los momentos más difíciles, convirtiéndose en una luz en mi andar y recordándome siempre el valor de seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Enith por la perseverancia, la disciplina y la fe que me permitieron llegar hasta este momento. Por cada esfuerzo silencioso, por cada obstáculo superado y por no dejar de creer en mis sueños, a pesar de las adversidades.

Extiendo mi gratitud a mi familia, amigos y mentores que, con su apoyo y cariño, iluminaron los días difíciles y celebraron cada logro conmigo.

# TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
1. INTRODUCCIÓN .....	12
2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....	16
2.1 FERTILIZANTES.....	16
2.1.1 FERTILIZANTES NITROGENADOS .....	16
2.1.2 FERTILIZANTES FOSFATADOS.....	17
2.1.3 FERTILIZANTES POTÁSICOS .....	18
2.2 PLAGUICIDAS: CLASIFICACIÓN Y FUNCIONES .....	19
2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE Y DESTINO FINAL DE LOS AGROQUÍMICOS.....	21
2.3.1 PERSISTENCIA Y MECANISMOS DE DEGRADACIÓN EN EL SUELO .....	21
2.3.2 ESCORRENTÍA, LIXIVIACIÓN Y VOLATILIZACIÓN DE AGROQUÍMICOS .....	22
2.3.3 BIOACUMULACIÓN Y BIOMAGNIFICACIÓN EN LOS ECOSISTEMAS.....	23
2.4 IMPACTOS AMBIENTALES DEL USO DE AGROQUÍMICOS .....	24
2.4.1 EFECTOS DE LOS AGROQUÍMICOS SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO .....	25
2.4.2 INFLUENCIA DE LOS AGROQUÍMICOS EN EL RECURSO HÍDRICO.....	26
2.4.3 AFECTACIÓN A LA BIODIVERSIDAD.....	27
2.5 IMPACTOS DE LOS AGROQUÍMICOS EN LA SALUD HUMANA..	27
2.5.1 MECANISMOS TOXICOLÓGICOS Y EFECTOS SISTÉMICOS ...	28
2.5.2 EXPOSICIÓN CRÓNICA Y VULNERABILIDAD COMUNITARIA .....	29
2.5.3 EXPOSICIÓN PRENATAL Y RIESGOS EN EL DESARROLLO INFANTIL.....	29
2.6 MARCO LEGAL Y REGULATORIO SOBRE EL USO DE LOS AGROQUÍMICOS.....	30
2.6.1 MARCO INTERNACIONAL .....	30
2.6.2 MARCO REGIONAL ANDINO .....	31

2.6.3	MARCO NACIONAL .....	31
2.7	ALTERNATIVAS SOSTENIBLES PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE AGROQUÍMICOS .....	32
2.8	PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS PARA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE.....	33
4.	MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	35
3.1	FUENTES DE INFORMACIÓN.....	35
3.2	CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN.....	35
3.3	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS .....	36
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1	CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS AGROQUÍMICOS .....	37
4.2	TRANSPORTE DE DESTINO FINAL DE LOS AGROQUÍMICOS....	39
4.3	IMPACTO EN LA SALUD Y EL AMBIENTE: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	41
4.4	EVALUACIÓN DEL MARCO LEGAL Y REGULATORIO .....	47
4.5	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS Y PRÁCTICAS AGROECOLÓGICAS .....	49
4.6	PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS NATURALES .....	51
6.	CONCLUSIONES .....	53
	REFERENCIAS .....	55

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>TABLA 1. IMPACTOS DOCUMENTADOS DEL USO INTENSIVO DE AGROQUÍMICOS EN LA SALUD HUMANA Y EL AMBIENTE.....</b>	<b>42</b>
---	-----------

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>FIGURA 1. MECANISMOS DE TRANSPORTE Y DESTINO FINAL DE LOS AGROQUÍMICOS.....</b>	<b>24</b>
--	-----------

# EL USO DE AGROQUÍMICOS Y LA SOSTENIBILIDAD EN LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: UNA REVISIÓN CRÍTICA

AUTOR(ES):

ENITH VANESSA YÁNEZ RAMÍREZ

## RESUMEN

---

El uso de agroquímicos constituye un componente central de la agricultura moderna, aunque su aplicación intensiva plantea desafíos para la sostenibilidad. Esta revisión narrativa analiza literatura científica reciente e informes institucionales para examinar los impactos del uso de agroquímicos, su regulación y las alternativas que promueven sistemas de producción más sostenibles. La evidencia muestra que los plaguicidas y fertilizantes sintéticos generan efectos interconectados sobre la salud humana y los ecosistemas, documentándose casos de neurotoxicidad, disrupción endócrina y exposición crónica, así como alteraciones en hongos acuáticos, polinizadores y microorganismos del suelo, comprometiendo la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

El análisis de los marcos regulatorios evidencia avances hacia enfoques precautorios, aunque persisten limitaciones en la evaluación de mezclas, formulantes no regulados y la falta de armonización internacional en los límites máximos de residuos, que reflejan tensiones entre políticas comerciales y salud pública.

Asimismo, emergen alternativas tecnológicas y agroecológicas, como los bioinsumos, los fertilizantes de liberación controlada y la agricultura de precisión, que optimizan el uso de insumos y fortalecen la resiliencia de los agroecosistemas.

Se concluye que la sostenibilidad agrícola requiere enfoques integradores que articulen innovación tecnológica, regulación basada en evidencia y políticas adaptadas a los contextos locales, equilibrando productividad, salud y conservación ambiental.

**Palabras clave:**

Toxicidad, Polinizadores, Regulación ambiental, Bioinsumos, Resiliencia agroecológica.

# ABSTRACT

---

The use of agrochemicals constitutes a central component of modern agriculture, although their intensive application poses challenges for sustainability.

This narrative review analyzes recent scientific literature and institutional reports to examine the impacts of agrochemical use, its regulation, and the alternatives that promote more sustainable production systems. Evidence shows that synthetic pesticides and fertilizers generate interconnected effects on human health and ecosystems, with documented cases of neurotoxicity, endocrine disruption, and chronic exposure, as well as alterations in aquatic fungi, pollinators, and soil microorganisms hence compromising biodiversity and ecosystem services.

The analysis of regulatory frameworks reveals progress toward precautionary approaches, although limitations persist in the assessment of mixtures, unregulated formulants, and the lack of international harmonization in maximum residue limits, reflecting tensions between trade policies and public health.

Likewise, technological and agroecological alternatives are emerging, such as bio-inputs, controlled release fertilizers, and precision agriculture, which optimize input use and strengthen the resilience of agroecosystems.

Overall, agricultural sustainability requires integrative approaches that combine technological innovation, evidence-based regulation, and policies adapted to local contexts, balancing productivity, health, and environmental conservation.

**Keywords:**

Toxicity, Pollinators, Environmental regulation, Bio-inputs, Agroecological resilience.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

En las últimas décadas, la agricultura moderna ha dependido ampliamente del uso de agroquímicos como respuesta a la creciente demanda alimentaria mundial. Desde la Revolución Verde en la década de 1940, el modelo agrícola basado en monocultivos y en el uso intensivo de pesticidas y fertilizantes químicos se expandió globalmente, incrementando significativamente la productividad (Donald et al., 2012; Huerta & Martínez, 2018; Molina, 2021; Uddin, 2018).

Aunque inicialmente estos insumos fueron promovidos para garantizar la seguridad alimentaria, sus efectos ambientales y sanitarios eran poco conocidos y no existía una regulación internacional sólida. Actualmente, se estima que hasta el 30 % de los pesticidas comercializados en países en desarrollo no cumplen con los estándares de calidad (FAO & WHO, 2019; UNEP, 2020; Vargas & Coto, 2016).

Desde el punto de vista académico y químico, comprender la naturaleza de estos compuestos es esencial para explicar su comportamiento en el ambiente. Los agroquímicos incluyen una amplia gama de compuestos sintéticos, entre los que destacan los organofosforados, carbamatos y clorados (Sunkara, 2023). Estos compuestos fueron desarrollados por su alta estabilidad química y eficacia en el control de plagas y enfermedades agrícolas; sin embargo, dicha estabilidad también explica su persistencia ambiental, ya que muchos de ellos se degradan lentamente y pueden permanecer activos en los ecosistemas durante largos períodos de tiempo (Dugan et al., 2023; Mohanty et al., 2024).

El uso inadecuado y excesivo de agroquímicos ha generado impactos ambientales, sociales y económicos que amenazan la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Mandal et al., 2017). Su degradación depende de factores como el pH del suelo, la radiación solar, la temperatura y la actividad microbiana, lo que determina su movilidad y permanencia. Los procesos de degradación no eliminan completamente las sustancias originales, sino que generan metabolitos intermedios con igual o mayor toxicidad (Malik et al., 2017; Mayer et al., 2024; Mohanty et al., 2024). Este

comportamiento químico, junto con su carácter lipofílico, favorece la bioacumulación y biomagnificación en suelos, agua y los tejidos de organismos vivos, generando riesgos ecológicos y de salud (Ali et al., 2023; Ansari et al., 2024).

Desde el punto de vista ambiental, resulta relevante analizar el uso intensivo y poco regulado de agroquímicos como pesticidas, fungicidas, herbicidas, reguladores del crecimiento, antibióticos y hormonas, cuyos mecanismos de acción y patrones de degradación dificultan su evaluación y control ambiental (Ali et al., 2023; Koli et al., 2019).

Desde un enfoque sanitario y social, la exposición a agroquímicos afecta a trabajadores agrícolas, comunidades cercanas y consumidores, configurando una problemática especialmente crítica en países en desarrollo con normativas limitadas (Butinof et al., 2017; Matthews, 2015).

Este trabajo tiene como objetivo general analizar críticamente el uso de agroquímicos en los sistemas de producción agrícola y su relación con la sostenibilidad ambiental, social y económica, mediante la revisión de literatura científica reciente. En esta línea, se revisan los tipos de agroquímicos más utilizados y sus funciones, se identifican los principales impactos ambientales y sanitarios asociados a su uso intensivo, se analizan políticas y estrategias de manejo sostenible implementadas en diversos contextos, y se exploran alternativas tecnológicas y agroecológicas, formulando recomendaciones orientadas a transitar hacia sistemas productivos más sostenibles.

El documento se organiza en tres apartados principales. El primero aborda los fundamentos químicos y el comportamiento ambiental de los agroquímicos; el segundo analiza los impactos ambientales, sociales y sanitarios derivados de su uso; y el tercero examina alternativas de manejo sostenible y enfoques integrados orientados a reducir la dependencia de insumos químicos en la productividad agrícola. Finalmente, se presentan conclusiones que integran los hallazgos más relevantes y recomendaciones enfocadas en fortalecer la sostenibilidad de los sistemas de producción.

## 2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

---

El uso indiscriminado de agroquímicos ha generado diversos impactos ambientales y sanitarios debido a que una proporción significativa de estos compuestos no cumple su función biológica y se dispersa en el entorno por escorrentía, lixiviación, volatilización o deriva durante su aplicación (Dugan et al., 2023; Mina et al., 2025). Como resultado, los residuos se acumulan en el suelo, el aire y los cuerpos de agua, alterando los sistemas bióticos y abióticos (Koli et al., 2019).

La persistencia de los agroquímicos está asociada a su estructura molecular altamente estable y lipofílica, que dificulta su degradación y favorece su bioacumulación en tejidos biológicos. Estos compuestos pueden transformarse químicamente y generar metabolitos con igual o mayor toxicidad (Ansari et al., 2024; Mayer et al., 2024; Mohd et al., 2023). Estas características explican los efectos crónicos, mutagénicos y neurotóxicos asociados a la exposición prolongada a compuestos organoclorados y organofosforados, lo que constituye un desafío creciente para la salud pública y la sostenibilidad ambiental (Koli et al., 2019; Malik et al., 2017; Pathak et al., 2022).

Asimismo, la aplicación continua y excesiva de fertilizantes y plaguicidas degrada la fertilidad del suelo y contamina los recursos hídricos mediante procesos de escorrentía y transporte subterráneo, reduciendo la biodiversidad y el acceso a agua segura (Cajamarca et al., 2020; Mandal et al., 2017; Uddin, 2018). Estas afectaciones se reflejan también en consecuencias directas sobre la salud humana. A nivel global, la exposición a plaguicidas provoca más de 380 millones de intoxicaciones anuales, con alrededor de 11 000 muertes, principalmente en países en desarrollo (Boedeker et al., 2020). Aunque representan una menor proporción del consumo mundial, estos países concentran la mayor carga sanitaria debido a normativas débiles y al uso de compuestos altamente peligrosos (Barre et al., 2023; Bernardino-Hernández et al., 2019).

En Ecuador, se estima que 1 de cada 7 trabajadores agrícolas ha sufrido intoxicación relacionada con plaguicidas, y se han documentado alteraciones neurológicas y genéticas en poblaciones expuestas laboral o ambientalmente (Atinkut Asmare et al., 2022; Barre et al., 2023; Vargas & Coto, 2016; Vásquez-Venegas et al., 2016).

En este contexto, la problemática central radica en la dependencia del modelo agrícola convencional respecto al uso intensivo de agroquímicos y la limitada aplicación de normativas sanitarias y ambientales. A pesar de la evidencia científica disponible, persisten vacíos en la comprensión integral de los procesos de persistencia, degradación, transporte y transformación de estos compuestos, así como de sus efectos acumulativos sobre los ecosistemas y la salud pública (Koli et al., 2019; Malik et al., 2017; Pathak et al., 2022). Por tanto, es necesario fortalecer el conocimiento sobre el comportamiento ambiental de los agroquímicos y promover estrategias sostenibles que reduzcan sus impactos negativos y contribuyan a la conservación de los recursos naturales.

## 3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

### 2.1 FERTILIZANTES

Los fertilizantes constituyen una herramienta esencial en la agricultura moderna, orientada a mejorar la productividad de los cultivos mediante el suministro de nutrientes esenciales a las plantas. Entre los principales elementos aportados destacan el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K), conocidos como macronutrientes primarios (Sardans & Peñuelas, 2021; Villavicencio et al., 2019). Su aplicación busca mantener o incrementar la fertilidad del suelo y compensar las pérdidas de nutrientes ocasionadas por la extracción de cosechas y procesos naturales de degradación (Lázaro-Dzul et al., 2012; Torabian et al., 2025).

En las últimas décadas, el desarrollo de la industria química ha permitido la creación de diversas formulaciones, desde fertilizantes inorgánicos de síntesis hasta productos de liberación lenta, biofertilizantes y mezclas orgánicas (Priya et al., 2024; Riddech et al., 2025; Rimski-Korsakov & Lavado, 2022). Estos avances buscan mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes, reducir pérdidas por volatilización o lixiviación y optimizar el manejo del suelo (Pathak et al., 2022).

De esta manera, el conocimiento de las propiedades químicas y fisiológicas de cada tipo de fertilizantes es fundamental para una aplicación adecuada y para lograr una nutrición equilibrada en los sistemas agrícolas.

#### 2.1.1 FERTILIZANTES NITROGENADOS

Los fertilizantes nitrogenados son los más utilizados, ya que el nitrógeno (N) es uno de los macronutrientes más importantes para los cultivos. Este constituye un componente esencial de la clorofila, los aminoácidos, las proteínas y los ácidos nucleicos. Interviene directamente en el crecimiento vegetal y en la fotosíntesis. Aunque es determinante en la producción agrícola, su uso excesivo y la gestión inadecuada provocan pérdidas significativas, debido a la alta solubilidad y movilidad de sus formas químicas más comunes, como el nitrato (NO<sub>3</sub>)<sup>-</sup> y la urea. Estas

especies se disuelven fácilmente en el agua y son susceptibles a procesos de volatilización, escorrentía, lixiviación y desnitrificación, lo que limita la absorción eficiente por las plantas (Priya et al., 2024; Wimalawansa & Wimalawansa, 2014).

De acuerdo con Priya et al. (2024), las pérdidas pueden alcanzar entre el 40 % y el 70 % para nitrógeno, entre el 80 % y el 90% para fósforo, y hasta el 90 % para potasio, generando impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente (Rahman et al., 2021). Estos datos evidencian la necesidad de reducir la dependencia agrícola de estos insumos químicos y promover alternativas sostenibles que contribuyan a la seguridad alimentaria (Priya et al., 2024). Entre las alternativas para minimizar las pérdidas de nutrientes destacan los fertilizantes de liberación controlada o lenta, tanto naturales como sintéticos. Estos productos liberan gradualmente los nutrientes, regulados por factores ambientales como el pH, la temperatura, la humedad y la actividad microbiana, lo que aumenta la eficiencia de absorción, mejora la productividad agrícola y reduce la contaminación (Liu et al., 2014).

Su formulación incorpora tecnologías avanzadas, entre ellas los recubrimientos poliméricos, la nano y microencapsulación, y el uso de hidrogeles con almidón, quitosano o lignina (Ye et al., 2020). El desarrollo de fertilizantes bioorgánicos, elaborados a partir de residuos agrícolas inoculados con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), representa una alternativa para la nutrición sostenible. Estos biofertilizantes no solo aportan los nutrientes, sino que también potencian el crecimiento de especies agrícolas como el arroz, mejoran la salud del suelo, aumentan la disponibilidad de nutrientes y promueven la diversidad microbiana. Todo ello contribuye a reducir la dependencia de fertilizantes químicos y favorece la formación de ecosistemas más resilientes en el ciclo de nutrientes (Riddech et al., 2025).

## 2.1.2 FERTILIZANTES FOSFATADOS

Los fertilizantes fosfatados aportan fósforo, un nutriente esencial para el metabolismo vegetal, ya que forma parte de los ácidos nucleicos, del Adenosín

Trifosfato (ATP) y de los fosfolípidos. Este elemento participa activamente en la transferencia de energía, en la modulación enzimática y en el desarrollo de las raíces y frutos. Sin embargo, su comportamiento en el suelo es complejo, debido a que presenta baja movilidad y tiende a fijarse en las fracciones minerales, lo que reduce su disponibilidad para las plantas (Delgado et al., 2024; Jiaying et al., 2022). La deficiencia de fósforo provoca alteraciones en el crecimiento foliar, disminución de la fotosíntesis y acumulación de antocianinas, mientras que el exceso puede contribuir a la eutrofización y acumulación de formas no asimilables por los cultivos. En este contexto, se han desarrollado tecnologías de fertilización más eficientes, como la aplicación localizada en bandas, la fertirrigación y el uso de fuentes fosfatadas de liberación lenta, que mejoran la eficiencia de absorción y reducen pérdidas (Jiaying et al., 2022; Priya et al., 2024).

Estudios recientes muestran los beneficios significativos de una fertilización fosfatada adecuada. En el trabajo de Liu et al. (2025), reportaron que el suministro de fósforo incrementó la fotosíntesis neta, aumentó el número y el área de hojas verdes y elevó el contenido de sacarosa y almidón, con un incremento del 17 % en el rendimiento de grano de arroz. De forma similar, Torabian et al. (2025), evidenciaron que la fertilización fosfatada incrementó el contenido de vitamina C en los tubérculos de papa, mejorando su calidad nutricional.

### 2.1.3 FERTILIZANTES POTÁSICOS

Los fertilizantes potásicos son aquellos que aportan potasio (K), que es el segundo catión más abundante en la biomasa vegetal, presente principalmente como  $K^+$ . Cumple funciones esenciales como la osmorregulación celular, el transporte de agua y nutrientes, la activación enzimática y la regulación de la fotosíntesis (Liu et al., 2025). Además, mejora la tolerancia de las plantas frente a condiciones de estrés abiótico como sequía, salinidad o bajas temperaturas, contribuyendo al mantenimiento de la integridad de los cloroplastos (Sardans & Peñuelas, 2021).

Un suministro adecuado de potasio optimiza la absorción de otros nutrientes y la eficiencia fotosintética, favoreciendo un crecimiento equilibrado y una mayor

productividad agrícola. En contraste, su deficiencia provoca clorosis, necrosis marginal, reducción del crecimiento y mayor susceptibilidad a enfermedades y factores ambientales adversos (Liu et al., 2025).

A diferencia del fósforo, el potasio es altamente reciclable en el campo a partir de los residuos de cosecha, lo que lo convierte en un elemento clave para el cierre de ciclos de nutrientes y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. En este sentido, el manejo racional de fertilizantes potásicos contribuye a mejorar la eficiencia del uso de nutrientes y a fortalecer la resiliencia ecológica de los agroecosistemas (Sardans & Peñuelas, 2021).

## 2.2 PLAGUICIDAS: CLASIFICACIÓN Y FUNCIONES

Los plaguicidas son compuestos químicos que modifican procesos fisiológicos clave en los organismos objetivo, actuando sobre la síntesis de proteínas, la transmisión nerviosa o la integridad de las membranas celulares. Su uso ha sido fundamental en la agricultura moderna, para aumentar el rendimiento de los cultivos y reducir pérdidas económicas. No obstante, su aplicación intensiva y sin control plantea serios problemas ambientales y sanitarios debido a su alta persistencia, capacidad de bioacumulación y toxicidad para organismos no objetivo (Ahmad et al., 2024; Shekhar et al., 2024).

La clasificación de los plaguicidas se basa en función del organismo al que se dirigen, de su estructura química o de su modo de acción. Según Zhang et al. (2024), se distinguen tres categorías principales que son: los insecticidas, los herbicidas y los fungicidas. Los insecticidas actúan sobre los procesos metabólicos o neurológicos de los insectos, y entre ellos destacan los carbamatos y organofosforados que inhiben la enzima acetilcolinesterasa y otros que provocan parálisis mediante la interferencia con receptores nicotínicos (Garud et al., 2024).

Los herbicidas, en cambio, actúan sobre rutas metabólicas específicas de las plantas como la fotosíntesis o la síntesis de aminoácidos esenciales. Entre los más utilizados

se encuentran el glifosato y la atrazina, debido a su bajo costo y eficacia (Mohd et al., 2023). Los fungicidas se emplean para controlar hongos fitopatógenos que actúan inhibiendo la respiración mitocondrial, la síntesis de ergosterol o la división celular. Las familias más representativas son los triazoles (DMI), cloronitrilos, ditiocarbonatos y estrobilurinas, ampliamente utilizados en cultivos frutales y hortalizas de alto valor económico (Zubrod et al., 2019).

De acuerdo con el Insecticide Resistance Action Committee (IRAC), los insecticidas y acaricidas se agrupan de acuerdo con su modo de acción, con más de 25 mecanismos reconocidos, lo cual constituye un referente técnico importante para la rotación y selección de productos en programas agrícolas (Sparks & Nauen, 2015). Según su modo de aplicación, los plaguicidas se clasifican como estomacales (requieren ingestión), de contacto (actúan en el sitio de aplicación), y fumigantes (penetran por inhalación). Esta diferenciación es clave para reducir la resistencia, mejorar el manejo integrado de plagas y aumentar la eficacia del control (Garud et al., 2024; Pathak et al., 2022). En el caso de los herbicidas, también se distinguen por su selectividad y momento de aplicación: pre-siembra, pre-emergencia o post-emergencia. Por su mecanismo de acción, destacan aquellos que inhiben enzimas o actúan como reguladores del crecimiento (Mohd et al., 2023).

En los últimos años, se ha intensificado la promoción y el desarrollo de los bioplaguicidas como una alternativa más sostenible frente a los compuestos sintéticos tradicionales. Estos productos, elaborados a partir de extractos vegetales como el neem o piretreno, o de microorganismo. Estos productos presentan menor persistencia ambiental y reducen los efectos adversos en organismos no objetivo. Su incorporación refleja una tendencia global hacia sistemas agrícolas más resilientes y ecológicos (Zhang et al., 2024).

Los coadyuvantes, aunque no son ingredientes activos, pueden afectar negativamente a organismos beneficiosos del suelo. Por ejemplo, Zapata-Narváz y Botina-Azin (2023), demostraron que afectan hongos benéficos como *Trichoderma Koningiopsis*. Del mismo modo Mina et al. (2025), documentan los efectos de

ciertos herbicidas en polinizadores, lo que genera desequilibrios ecológicos a largo plazo.

## 2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE Y DESTINO FINAL DE LOS AGROQUÍMICOS

El comportamiento de los agroquímicos en el ambiente está determinado por procesos físicos, químicos y biológicos que definen su destino final. Factores como la presión de vapor, solubilidad, coeficiente de partición, adsorción al suelo, contenido de materia orgánica, pH, y textura, juegan un rol clave en su movilidad y persistencia (Kariyanna et al., 2024; Pérez-Lucas et al., 2018). Comprender estos mecanismos permite optimizar su uso, mitigar los riesgos de contaminación y favorecer una agricultura más sostenible.

### 2.3.1 PERSISTENCIA Y MECANISMOS DE DEGRADACIÓN EN EL SUELO

La persistencia de los agroquímicos depende de la estructura química del compuesto y de los factores ambientales que regulan su degradación.

En el caso de los fertilizantes nitrogenados, se estima que solo el 50 % del nitrógeno aplicado es aprovechado por el cultivo, mientras que el resto se pierde a través de volatilización, lixiviación o emisiones gaseosas (Giordano et al., 2021).

Además, estudios recientes con trazadores isotópicos han demostrado que solo una fracción del nitrógeno aplicado es absorbido por el cultivo, mientras que una parte considerable permanece retenida en el suelo durante largos períodos, representando un riesgo latente de contaminación (Scheer & Rütting, 2023).

En el caso de los plaguicidas, la degradación ocurre a través de procesos como la oxidación, fotólisis, hidrólisis y principalmente la degradación mediada por microorganismos y plantas. Estos organismos pueden transformar los compuestos en metabolitos intermedios, almacenarlos o conjugarlos en formas menos tóxicas (Zhang et al., 2024).

Cuando la vida media de un compuesto supera los 100 días, se considera persistente, lo que aumenta el riesgo de contaminación de aguas subterráneas (Pérez-Lucas et al., 2018).

Se han explorado estrategias para mejorar la degradación, como el uso de biosurfactantes (ramnolípidos y surfactinas), que aumentan la solubilidad de compuestos hidrofóbicos, así como el uso de enmiendas orgánicas o biochar, que favorecen la adsorción y estimulan la actividad microbiana (Mohanty et al., 2024; Mohd et al., 2023).

### 2.3.2 ESCORRENTÍA, LIXIVIACIÓN Y VOLATILIZACIÓN DE AGROQUÍMICOS

Tras su aplicación, los agroquímicos pueden transportarse fuera del área de cultivo por diversos mecanismos. La volatilización permite su paso a fase gaseosa, lo que genera transporte atmosférico regional e incluso global, detectándose residuos en regiones remotas como los polos (Mayer et al., 2024).

Otro proceso clave es la escorrentía superficial que transporta los compuestos disueltos o adsorbidos en partículas del suelo hacia cuerpos de agua superficiales, mientras que la lixiviación moviliza los contaminantes hacia capas más profundas del perfil edáfico, afectando acuíferos subterráneos. Estos procesos están influenciados por las características del suelo, el régimen de las lluvias, la pendiente del terreno y prácticas agrícolas implementadas (Kariyanna et al., 2024).

En el caso de los fertilizantes nitrogenados, se estima que entre un 10 % y el 30 % del nitrógeno aplicado se pierde por lixiviación, y que solo la mitad del total es efectivamente utilizado por la planta (Sumreen, 2024). Los sistemas agrícolas intensivos con suelos arenosos y bajo contenido de materia orgánica presentan una mayor vulnerabilidad (Bijay & Craswell, 2021).

Para reducir estas pérdidas, se han desarrollado fertilizantes de liberación controlada, que ajustan la disponibilidad de nutrientes según condiciones

ambientales, mejorando la eficiencia del uso de insumos y reduciendo la contaminación difusa (Priya et al., 2024).

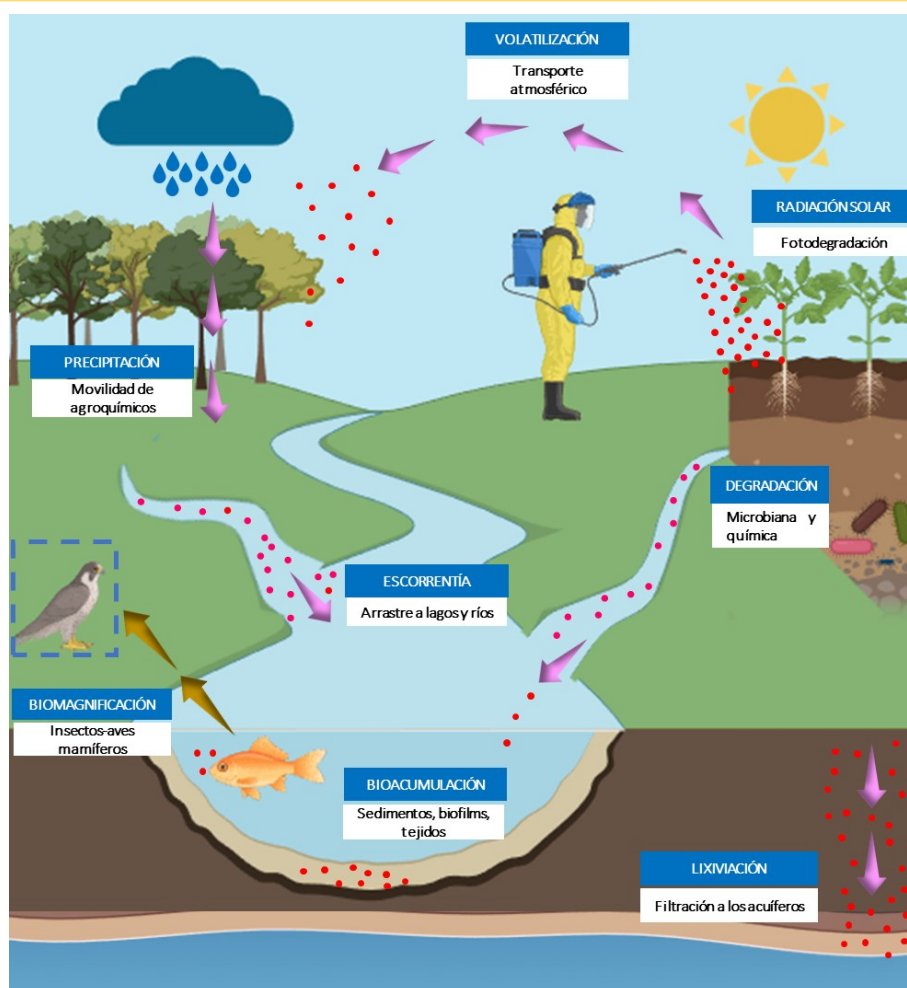
### 2.3.3 BIOACUMULACIÓN Y BIOMAGNIFICACIÓN EN LOS ECOSISTEMAS

La bioacumulación es un proceso característico de ciertos agroquímicos, especialmente plaguicidas persistentes como los organoclorados, que poseen alta afinidad por lípidos. Estos compuestos pueden acumularse en organismos acuáticos, sedimentos y biopelículas microbianas, lo que puede afectar procesos biológicos como la descomposición de materia orgánica. Algunos herbicidas, como las fenilureas, también muestran potencial de bioacumulación en agua y suelos (Mohanty et al., 2024; Zubrod et al., 2019).

La biomagnificación, por su parte, ocurre cuando estas sustancias aumentan su concentración a lo largo de la cadena trófica. Artrópodos contaminados transfieren plaguicidas a depredadores superiores como aves, mamíferos insectívoros o arañas, generando efectos subletales como alteraciones hormonales, reproductivas y comportamentales. Estos impactos comprometen el equilibrio ecológico y pueden debilitar los mecanismos naturales de control biológico (Tison et al., 2024).

Además, la persistencia en la atmósfera de estos compuestos facilita su dispersión hacia zonas más alejadas de la fuente original, exponiendo a organismos no objetivo en ecosistemas no agrícolas (Mayer et al., 2024).

Para integrar visualmente los procesos descritos y facilitar la comprensión de la dinámica ambiental de los agroquímicos, la **Figura 1** sintetiza los principales mecanismos de transporte y su destino final en diferentes matrices ambientales.



**Figura 1.** Mecanismos de transporte y destino final de los agroquímicos.

**Nota.** Creado con BioRender.com y elaboración propia con base en información científica reportada por Kariyanna et al. (2024); Mayer et al. (2024); Mohanty et al. (2024); Pérez-Lucas et al. (2018).

## 2.4 IMPACTOS AMBIENTALES DEL USO DE AGROQUÍMICOS

El uso intensivo de agroquímicos, incluyendo fertilizantes, herbicidas, insecticidas y fungicidas, ha permitido aumentar el rendimiento agrícola en muchas regiones del mundo.

Sin embargo, su aplicación intensiva y en muchos casos sin regulaciones estrictas, ha generado impactos ambientales de diversa magnitud, con efectos diferenciados

según el tipo de compuesto, su persistencia, rutas de transporte y características ecológicas locales (Ahmed et al., 2015; Elias, 2022).

Si bien los marcos normativos priorizan la regulación de plaguicidas por su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación, otros compuestos como los fertilizantes nitrogenados y fosfatados también generan alteraciones ecosistémicas significativas, como la eutrofización y la acidificación del suelo (Giordano et al., 2021; Pérez-Lucas et al., 2018).

Los residuos de agroquímicos afectan de forma diferenciada a los componentes clave del ecosistema como el agua, suelo y biodiversidad, con impactos más severos en regiones con limitada fiscalización ambiental y vulnerabilidad socioeconómica (Zúñiga-Venegas et al., 2022).

## 2.4.1 EFECTOS DE LOS AGROQUÍMICOS SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO

El suelo es uno de los principales receptores de agroquímicos, debido a su papel como medio de aplicación directa. Investigaciones han demostrado que estos compuestos alteran la microbiota edáfica, interfieren en procesos bioquímicos como la mineralización, la fijación de nitrógeno y la descomposición de materia orgánica, reduciendo su fertilidad y capacidad de resiliencia (Lu et al., 2015).

Algunos fungicidas como el metalaxil han mostrado alta movilidad y capacidad de lixiviación hacia capas profundas, lo que incrementa el riesgo de contaminación de aguas subterráneas (Gámiz et al., 2016).

Además, se ha evidenciado que estos productos disminuyen la biomasa microbiana y alteran los ciclos biogeoquímicos del fósforo y del carbono, comprometiendo la productividad agrícola a largo plazo (Elias, 2022; Parker et al., 2019).

En contextos de agricultura intensiva, como el caso reportado en China, la combinación de pesticidas y metales pesados ha contribuido a la degradación del

suelo, la seguridad alimentaria y la aparición de las llamadas “aldeas cancerígenas” (Lu et al., 2015).

## 2.4.2 INFLUENCIA DE LOS AGROQUÍMICOS EN EL RECURSO HÍDRICO

El agua superficial y subterránea representa un compartimento especialmente vulnerable a la contaminación por agroquímicos especialmente a través de procesos de escorrentía, lixiviación o descargas puntuales. Se ha documentado la presencia de plaguicidas persistentes como el dicloro difenil tricloroetano (DDT) y el hexaclorociclohexano (HCH) en cuerpos de agua, que presentan capacidad de transporte a larga distancia, bioacumulación y efectos mutagénicos (Ahmed et al., 2015).

En regiones de América Latina y África se ha detectado la presencia de herbicidas como el glifosato en cuerpos de agua, afectando la biodiversidad acuática y la calidad del agua para consumo humano (Warra & Vara, 2020; Lu et al., 2015).

Asimismo, estudios han demostrado que los plaguicidas y metales pesados se acumulan en biofilms microbianos de ecosistemas acuáticos, facilitando su transferencia trófica en las cadenas alimentarias (Bonnineau et al., 2021).

Por otro lado, investigaciones recientes resaltan que los coformulantes y aditivos presentes en productos comerciales pueden representar hasta el 20 % de la formulación, también contribuyen a la toxicidad ambiental incluyendo compuestos como surfactantes y metales pesados no regulados (Defarge et al., 2018).

Finalmente, la inadecuada disposición de envases y residuos sólidos derivados del uso de agroquímicos representa un riesgo ambiental relevante para la fauna terrestre y acuática, especialmente en zonas agrícolas con escasa gestión de desechos (Elias, 2022).

### 2.4.3 AFECTACIÓN A LA BIODIVERSIDAD

La exposición de organismos no objetivo a agroquímicos ha generado múltiples efectos subletales que comprometen la estabilidad ecológica. Se ha documentado la bioacumulación de plaguicidas en sedimentos y biota acuática, especialmente en compuestos lipofílicos como los organoclorados (Zubrod et al., 2019).

Estos compuestos han afectado procesos ecológicos clave como la descomposición de materia orgánica, la polinización y el control biológico de plagas (Hisamoto et al., 2024).

Estudios en la Sierra Ecuatoriana reportan una disminución significativa en las poblaciones de polinizadores debido al uso intensivo de insecticidas, lo que compromete la producción agrícola, dado que el 35 % de los cultivos a nivel mundial dependen directamente de estos organismos (Mina et al., 2025).

Además, se ha evidenciado que los artrópodos terrestres actúan como vectores en la transferencia trófica de plaguicidas hacia aves, pequeños mamíferos e insectívoros, generando procesos de biomagnificación. Esto provoca alteraciones reproductivas, cambios en el comportamiento y desequilibrios en las cadenas alimenticias (Tison et al., 2024).

## 2.5 IMPACTOS DE LOS AGROQUÍMICOS EN LA SALUD HUMANA

La exposición humana a agroquímicos representa una problemática creciente de salud pública, especialmente en países en desarrollo donde los sistemas de control sanitario y ambiental presentan deficiencias.

Diversos estudios han confirmado que los efectos adversos pueden generarse tanto por exposiciones agudas como crónicas, con impactos que van desde síntomas leves hasta enfermedades graves e incluso mortales (Ahmad et al., 2024; González-Alzaga et al., 2014).

El grupo más vulnerable es el de los trabajadores agrícolas, quienes enfrentan exposiciones directas durante la preparación, mezcla y aplicación de plaguicidas. En América Latina, investigaciones han evidenciado una elevada prevalencia de alteraciones neuroconductuales, daño genético, y síntomas de toxicidad sistémica en este grupo poblacional (Butinof et al., 2017; Shekhar et al., 2024).

### 2.5.1 MECANISMOS TOXICOLÓGICOS Y EFECTOS SISTÉMICOS

Los plaguicidas actúan sobre sistemas biológicos específicos, dependiendo de su clase química. Los organofosforados y carbamatos, por ejemplo, inhiben la acetilcolinesterasa, lo que interfiere con la neurotransmisión colinérgica, provocando efectos agudos como convulsiones, parálisis y colapso respiratorio (Pathak et al., 2022; Pernalet & Hernández, 2016).

Por su parte, los organoclorados, aunque más estables y persistentes, generan alteraciones hormonales y afectan receptores GABA, lo que se asocia con disfunciones neurológicas crónicas y disrupción endócrina (Ansari et al., 2024; Malik et al., 2017).

Además, se ha documentado que los efectos de estas sustancias no dependen únicamente del ingrediente activo, sino también de los coformulantes presentes en las formulaciones comerciales. Algunos productos contienen metales pesados y solventes que aumentan la toxicidad y amplifican los riesgos sanitarios (Defarge et al., 2018).

La exposición continua a bajas dosis puede inducir mutaciones genéticas, estrés oxidativo y procesos inflamatorios crónicos, asociados con enfermedades como Parkinson, Alzheimer, distintos tipos de cáncer, infertilidad y alteraciones inmunológicas (Ahmad et al., 2024; Koli et al., 2019).

Los efectos descritos a nivel molecular y fisiológico se reflejan también en las poblaciones humanas expuestas de forma constante a agroquímicos, evidenciando la conexión entre los procesos biológicos y las consecuencias epidemiológicas.

## 2.5.2 EXPOSICIÓN CRÓNICA Y VULNERABILIDAD COMUNITARIA

La exposición a agroquímicos no se limita al campo laboral. Poblaciones rurales ubicadas en zonas agrícolas presentan niveles elevados de residuos de plaguicidas en agua, aire y alimentos producto de la deriva de aplicación, la contaminación de fuentes hídricas, o el consumo de productos con residuos por encima de los límites permitidos (Ortíz et al., 2014; Zúñiga-Venegas et al., 2022). En Uruguay, por ejemplo, se ha evidenciado incumplimiento de las normativas de residuos máximos permitidos en alimentos y agua de consumo (Cauci et al., 2024).

Según la OMS y el PNUMA, se estima que cada año se registran cerca de tres millones de casos de intoxicación aguda por plaguicidas, con aproximadamente 200 000 muertes, concentradas principalmente en países en desarrollo, y esta cifra pone en evidencia la magnitud del problema y la necesidad urgente de mejorar las políticas de prevención y control (Ahmad et al., 2024; Brusseau et al., 2019; González-Alzaga et al., 2014).

## 2.5.3 EXPOSICIÓN PRENATAL Y RIESGOS EN EL DESARROLLO INFANTIL

La etapa prenatal y la infancia temprana son períodos de alta susceptibilidad a contaminantes químicos. Estudios sistemáticos han demostrado que la exposición intrauterina a organofosforados se asocia con efectos neurológicos duraderos, incluyendo alteraciones cognitivas, problemas de atención y alteraciones conductuales, que pueden persistir hasta la adolescencia o la adultez (González-Alzaga et al., 2014).

Estas consecuencias son especialmente preocupantes en contextos de pobreza rural, donde las mujeres embarazadas viven cerca de zonas de cultivo o participan en actividades agrícolas sin equipos de protección adecuados. En tales escenarios, la exposición transplacentaria o vía lactancia representa una vía significativa de riesgo para el desarrollo infantil.

## 2.6 MARCO LEGAL Y REGULATORIO SOBRE EL USO DE LOS AGROQUÍMICOS

La regulación del uso de agroquímicos constituye un componente esencial dentro de las políticas ambientales y sanitarias, tanto a nivel internacional, como regional y nacional. Estos marcos normativos buscan garantizar la protección de la salud humana, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida de los plaguicidas, desde su producción hasta la disposición final.

### 2.6.1 MARCO INTERNACIONAL

Los principios orientadores de carácter voluntario para todos los actores involucrados en la gestión de plaguicidas están contenidos en el Código Internacional de Conducta para la Gestión de Plaguicidas elaborado por la FAO y la OMS. Este instrumento promueve prácticas seguras y responsables en todas las etapas del ciclo de vida de los plaguicidas, con énfasis en la reducción de riesgos para la salud humana y el ambiente (FAO & OMS, 2014).

A nivel jurídico vinculante, destacan tres instrumentos internacionales. El *Convenio de Rotterdam* (1998), que regula el comercio internacional de plaguicidas peligrosos mediante el procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo (PIC), mecanismo que garantiza que los países importadores puedan decidir sobre la entrada de productos químicos que impliquen riesgos significativos para la salud o el ambiente. El *Convenio de Estocolmo* (2001), cuyo objetivo es restringir y eliminar el uso de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs), entre los cuales se incluyen plaguicidas como el aldrín, dieldrín, endrina, clordano, mirex y DDT, debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación. Por su parte el *Convenio de Basilea* (1989) establece directrices para el control del movimiento transfronterizo y la gestión ambientalmente racional de desechos peligrosos, incluyendo los residuos y envases contaminados con agroquímicos (PNUMA, 1989; FAO & PNUMA, 1998; PNUMA, 2001). Complementariamente, la Comisión del Codex Alimentarius define los Límites Máximos de Residuos (LMR) de plaguicidas en alimentos que sirven como referente técnico internacional para asegurar la inocuidad alimentaria

y facilitar el comercio (Comisión del Codex Alimentarius, 2024). En conjunto, estos instrumentos constituyen el marco global que orienta las regulaciones regionales y nacionales, incluyendo las adoptadas por el Ecuador.

## 2.6.2 MARCO REGIONAL ANDINO

En el ámbito regional, la Comunidad Andina de Naciones (CAN) ha desarrollado un marco normativo común para el control y registro de plaguicidas de uso agrícola. La Decisión 804 (Comisión de la Comunidad Andina, 2015) establece los requisitos técnicos, procedimientos de evaluación y criterios para el registro y revalidación de estos productos, con el propósito de homologar estándares sanitarios y ambientales entre los países miembros. Esta normativa se complementa con el *Manual Técnico Andino*, aprobado mediante la Resolución 2075 del Comité Andino de Sanidad Agropecuaria, que especifica lineamientos sobre etiquetado bajo el Sistema Globalmente Armonizado (SGA), clasificación de peligrosidad, metodologías de análisis de residuos y pruebas de eficacia biológica (Comité Andino de Sanidad Agropecuaria, 2017). Estos instrumentos promueven la coherencia normativa regional, facilitan el comercio intrarregional y fortalecen la seguridad sanitaria y ambiental en la producción agrícola.

## 2.6.3 MARCO NACIONAL

En el caso del Ecuador, el marco normativo que regula el uso de agroquímicos se sustenta principalmente en el Código Orgánico del Ambiente (Asamblea Nacional del Ecuador, 2017) y su Reglamento General (Presidencia de la República del Ecuador, 2019).

Estos instrumentos establecen disposiciones específicas sobre la producción, importación, uso, distribución y disposición final de sustancias químicas peligrosas, entre ellas los plaguicidas, e incorporan la obligación de controlar los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos en concordancia con el *Convenio de Basilea* (PNUMA, 1989).

Adicionalmente, Agrocalidad es la autoridad competente, responsable del registro, control y fiscalización de plaguicidas de uso agrícola. Entre las disposiciones más recientes se encuentra la Resolución 0026, que regula la inspección y validación de los ensayos de eficacia durante los procesos de registro y reevaluación, con el fin de garantizar la confiabilidad técnica de los estudios presentados.

Asimismo, Ecuador mantiene un registro actualizado de plaguicidas prohibidos, que incluyen ingredientes activos de alta peligrosidad reconocidos internacionalmente, como el dieldrín y el lindano (Agrocalidad, 2019).

Complementariamente, desde el ámbito ambiental, el MAATE ha elaborado guías para la gestión segura de plaguicidas, que incluyen directrices sobre el almacenamiento, transporte, triple lavado de envases, y disposición final de residuos. Estas medidas buscan reducir los riesgos ambientales y sanitarios, y se alinean con los compromisos asumidos por el país en el marco de los convenios internacionales mencionados, garantizando así la coherencia con los principios de sostenibilidad, prevención y precaución ambiental (MAATE, 2019).

## 2.7 ALTERNATIVAS SOSTENIBLES PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE AGROQUÍMICOS

La agricultura moderna enfrenta desafíos importantes, siendo el principal aumentar la productividad sin comprometer la sostenibilidad ambiental. Este reto ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a los agroquímicos.

Los fertilizantes de liberación controlada y los llamados “smart fertilizers” han surgido como soluciones para reducir las pérdidas por lixiviación o volatilización, sincronizando la liberación de N, P y K según las necesidades de la planta. Estas formulaciones emplean matrices biodegradables como almidón, lignina o alginato (Almutari, 2023; Shanmugavel et al., 2023; Sharma & Sharma, 2025; Song et al., 2024). El uso de nanotecnología también ha permitido desarrollar microportadores bioinspirados que mejoran la adherencia y absorción foliar, promoviendo una dosificación precisa con menores pérdidas (Noman et al., 2024). Asimismo, los

materiales superabsorbentes bioinspirados contribuyen a retener el agua y mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes en escenarios de estrés hídrico (Djafaripetroudy et al., 2025). En el plano operativo, los sistemas de aplicación diferenciada, como los rociadores de tasa variable guiados por visión computacional; optimizan el uso de agroquímicos sin sacrificar la eficacia (Farooque et al., 2023).

Finalmente, dentro de un enfoque integral, los bioplaguicidas representan una alternativa sostenible, con menor toxicidad y mayor especificidad hacia los organismos blancos, alineados con los principios de sostenibilidad y salud de los agroecosistemas (Aioub et al., 2024; Maaz et al., 2025).

## 2.8 PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS PARA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE

Si bien las tecnologías avanzadas de fertilización y aplicación de plaguicidas muestran un alto potencial, su adopción a gran escala enfrenta obstáculos técnicos, económicos y regulatorios, donde se requiere equilibrar la biodegradabilidad con el rendimiento agronómico (Almutari, 2023; Sharma & Sharma, 2025).

A nivel de impacto y evaluación, se requiere el desarrollo de marcos comparables que ponderen beneficios y riesgos, especialmente cuando intervienen nanomateriales, junto con la evidencia en campo que refleje la variabilidad edafoclimática y operativa (Farooque et al., 2023; Singh et al., 2024).

La agenda I+D+i (Investigación + Desarrollo + Innovación) identifica cuellos de botella en escalamiento, estandarización y certificación, proponiendo líneas de trabajo para superar la brecha entre laboratorio y predio (Maaz et al., 2025).

En el plano agronómico, los reguladores de crecimiento de nueva generación muestran potencial para integrarse en esquemas de nutrición de precisión y manejo integrado, lo cual exige el diseño de paquetes tecnológicos coherentes y medibles (Zhumanova et al., 2024).

Finalmente, la operacionalización de estas alternativas demanda estrategias de transferencia, capacitación y adopción gradual en contextos reales, articulando superabsorbentes bioinspirados y fertilizantes inteligentes con prácticas agronómicas y políticas de incentivos (Djafaripetroudy et al., 2025; Shanmugavel et al., 2023).

Desde esta perspectiva, los agroquímicos del futuro no deben concebirse únicamente como productos, sino como parte de sistemas integrados de manejo agrícola, que respondan a los desafíos productivos, ambientales, sociales y económicos del siglo XXI.

## 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 3.1 FUENTES DE INFORMACIÓN

La información utilizada en esta revisión proviene de artículos científicos y documentos técnicos obtenidos principalmente de bases de datos académicas internacionales como Scopus, SpringerLink, PubMed, ScienceDirect, RedALyC, y Google Scholar. Se priorizaron fuentes que abordaran la temática del uso de agroquímicos, sus impactos ambientales, sociales y económicos, así como las estrategias de manejo sostenible en la agricultura. Se consultaron informes de organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Codex Alimentarius. Asimismo, se consideraron documentos del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y de la Agencia de Regulación y Control Fito Zoosanitario (Agrocalidad), los cuales aportan información actualizada sobre políticas públicas, marcos regulatorios y prácticas de gestión ambiental relacionadas con el uso de agroquímicos.

### 3.2 CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Para la selección de los documentos, se consideraron aquellos publicados entre los años 2015 y 2025, tanto en idioma inglés como en español, que presentaran resultados empíricos, revisiones teóricas o análisis de políticas sobre agroquímicos y sostenibilidad agrícola. Se incluyeron estudios que abordaran al menos uno de los siguientes aspectos: tipos de agroquímicos utilizados, impactos ambientales y de salud, políticas de manejo y alternativas sostenibles. De manera complementaria, se incluyeron fuentes previas a este rango temporal cuando aportaron un valor histórico, conceptual o fundacional relevante para contextualizar los procesos analizados.

Se excluyeron publicaciones con limitaciones metodológicas evidentes, documentos no arbitrados o fuentes duplicadas, así como aquellas que no presentaran relación directa con los objetivos de la investigación.

### 3.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Esta investigación corresponde a una revisión bibliográfica narrativa, con elementos de análisis cualitativo, orientada a sintetizar y contrastar la información proveniente de diversas fuentes académicas y técnicas.

El proceso metodológico se estructuró en cinco fases:

- Delimitación temática, centrada en la relación de agroquímicos y sostenibilidad ambiental, social y económica.
- Búsqueda y selección de información, aplicando una combinación de palabras clave como “agroquímicos”, “pesticidas”, “fertilizantes”, “sostenibilidad”, “impacto ambiental”, “salud humana” y “agricultura sostenible”.
- Criterios de inclusión y exclusión, ya definidos previamente
- Sistematización de la información, mediante matrices temáticas que permitieron clasificar los hallazgos por tipo de agroquímico, ámbito de impacto y contexto geográfico
- Síntesis argumentativa, orientada a identificar tendencias, vacíos de investigación y oportunidades para la gestión sostenible de los recursos naturales.

En total se analizaron aproximadamente 90 documentos, lo que permitió establecer una visión amplia sobre el tema y sustentar los apartados analíticos y de discusión de la presente revisión.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS AGROQUÍMICOS

La clasificación de los agroquímicos constituye un pilar fundamental para el manejo agronómico y del sector agrícola, ya que permite optimizar el uso de fertilizantes y gestionar de forma preventiva la resistencia y los impactos ecotoxicológicos de los plaguicidas (Jiaying et al., 2022).

En el caso de los fertilizantes, la clasificación tradicional se basa en el contenido de nutrientes primarios como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, esenciales para el crecimiento vegetal. La deficiencia de nitrógeno limita la fotosíntesis y la producción de energía. Jiaying et al. (2022), demostraron en arroz que una proporción adecuada de NPK incrementa el contenido de ATP y la actividad enzimática, reafirmando su papel clave en el desarrollo de las plantas.

Ante la necesidad de mejorar la eficiencia y reducir pérdidas ambientales, se han desarrollado los denominados fertilizantes inteligentes como los de liberación lenta (SRF) y los de liberación controlada (CRF). Los primeros dependen de la degradación microbiana o la hidrólisis, mientras que los segundos emplean encapsulación para liberar nutrientes de manera sincronizada con las necesidades del cultivo. Aunque esta tecnología mejora la eficiencia agronómica, persisten desafíos en cuanto a su regulación y evaluación ambiental (Shanmugavel et al., 2023).

En cuanto a los plaguicidas, la clasificación por modo de acción (MoA), propuesta por el Insecticide Resistance Action Committee, es una herramienta esencial para prevenir resistencias. Este enfoque agrupa los compuestos según el sitio específico de acción en el organismo blanco, independientemente de su estructura química.

Por ejemplo, los piretroides y neonicotinoides actúan de forma diferente, mientras que carbamatos y organofosforados comparten un mismo sitio activo (Sparks & Nauen, 2015).

La rotación entre insecticidas con diferentes mecanismos de acción MoA ha demostrado ser una estrategia eficaz para retrasar el desarrollo de resistencias en plagas agrícolas. Diversos estudios recientes destacan que la repetición continua del mismo MoA puede generar resistencias en períodos cortos, mientras que las rotaciones adecuadas reducen la presión de selección y prolongan la eficacia de las herramientas de control efectiva (Madgwick & Kanitz, 2024; Sparks et al., 2021). La correcta aplicación del esquema IRAC es, por tanto, una base fundamental para preservar la eficacia de estas herramientas de control a largo plazo.

En el caso de los fungicidas, que representan más del 40 % de las ventas totales en la Unión Europea, su clasificación también se basa en el MoA. Estos compuestos se agrupan según el proceso biológico que afectan, como los inhibidores de la biosíntesis de ergosterol, los bloqueadores del transporte electrónico mitocondrial o los inhibidores de la mitosis. No obstante, sus efectos ambientales han recibido menos atención que los de los insecticidas y herbicidas, pese a su alto riesgo para organismos acuáticos. La brecha existente entre las concentraciones ambientales detectadas en campo y las concentraciones que provocan efectos tóxicos evidencia la necesidad de fortalecer la investigación científica y la regulación en torno a su aplicación y control (Zubrod et al., 2019).

En este contexto, una clasificación más estricta y funcional de los agroquímicos que considere su comportamiento ambiental y biológico es clave para avanzar hacia una agricultura productiva, resiliente y sostenible. A partir de esta clasificación, resulta fundamental analizar cómo estos compuestos se comportan en el ambiente, considerando los procesos que determinan su transporte y destino final.

## 4.2 TRANSPORTE DE DESTINO FINAL DE LOS AGROQUÍMICOS

El análisis del transporte y destino final de los agroquímicos en la ambiente evidencia un sistema complejo, dinámico y no lineal, determinado principalmente por la interacción entre las propiedades fisicoquímicas de los compuestos, las prácticas agrícolas locales y las condiciones ambientales.

En este contexto, la modelación ecohidrológica con herramientas como el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT+) ha demostrado ser una herramienta eficaz para simular la dinámica de algunos plaguicidas a nivel de cuenca, especialmente aquellos con movilidad moderada a alta (Wendell et al., 2024). Sin embargo, se identifican limitaciones significativas al modelar el transporte de sustancias altamente absorbentes, como la pendimetalina, lo cual deja en evidencia que los mecanismos de transporte preferencial no están completamente integrados en dichos modelos.

A nivel global, estos modelos se complementan con enfoques cartográficos y geoespaciales. En este sentido, Hendriks et al. (2019), destacan el uso de mapas geoespaciales, como los aplicados en África, que permiten identificar zonas vulnerables a la lixiviación y erosión. No obstante, su aplicación presenta limitaciones importantes debido a la escasa disponibilidad de datos obtenidos en campo, lo que reduce la representatividad y precisión de las predicciones.

En relación con las vías de transporte, la evidencia empírica señala que la fase particulada predomina en el transporte a largo plazo, superando incluso las predicciones basadas en la solubilidad del compuesto. En cambio, a corto plazo, tanto a nivel nacional como internacional, el transporte disuelto es dominante, mientras que el transporte asociado a sedimentos actúa como una fuente crónica y continua (Commelin et al., 2022).

En regiones con drenaje artificial, los flujos superficiales actúan como rutas idóneas

para la exportación de contaminantes, especialmente en temporadas de invierno seco, cuando la escorrentía superficial es mínima. En este escenario, cobran relevancia productos de transformación (TPs) de pesticidas móviles, como el flufenacet, que pueden representar hasta el 50 % de la masa total exportada, elevando considerablemente el riesgo ambiental (Wendell et al., 2024).

De manera paralela, el transporte atmosférico de largo alcance también ha cobrado relevancia, debido a la detección de más de 50 plaguicidas en la atmósfera europea, incluyendo compuestos con vidas medias aparentemente cortas. Esto sugiere una mayor dispersión de la esperada, pudiendo deberse al efecto de coformulantes que incrementan la volatilización o por procesos de adsorción en partículas (Mayer et al., 2024). Esta situación revela vacíos críticos en los actuales esquemas de evaluación de riesgo.

A nivel molecular, propiedades como la quiralidad y la persistencia desempeñan un rol decisivo. Por ejemplo, el metalaxil presenta una degradación enantioselectiva, que modifica su perfil de riesgo residual (Gámiz et al., 2016).

Las nuevas tecnologías, como los nanoplaguicidas y los ARN de interferencia (dsRNA), promueven dinámicas de liberación que dependen más de la solubilidad del compuesto que de la degradación del transportador (Kah et al., 2018). Lo cual exige el desarrollo de nuevos enfoques metodológicos para su monitoreo.

Adicionalmente, factores edáficos, como la textura del suelo especialmente en suelos arcillosos y el tipo de cultivo, por ejemplo, la papa en zonas con pendiente, influyen de manera significativa en el destino ambiental de estos compuestos (Commelin et al., 2022; Sultan et al., 2019).

Frente a este panorama, se han propuesto múltiples estrategias de mitigación, incluyendo el uso de cultivos de cobertura y la aplicación de biocarbón. Este último ha demostrado eficacia en la retención de contaminantes, en particular los compuestos polares, y en la reducción de la lixiviación hacia cuerpos de agua subterráneos (Gámiz et al., 2016).

Sin embargo, la eficacia de estas estrategias depende del tipo de compuesto y del contexto agroecológico en el que se apliquen.

Adicionalmente, se identifica que la regulación presenta rezagos, al centrarse exclusivamente en ingredientes activos puros, dejando de lado la dinámica ambiental de la formulación comercial completa, así como la de los productos de transformación y coadyuvantes. Resulta prioritario establecer una normativa que incorpore estos elementos, así como también protocolos de evaluación del riesgo ambiental que analicen en profundidad las distintas vías de transporte, como el drenaje superficial, el transporte particulado y la dispersión atmosférica de largo alcance (Commelin et al., 2022; Dugan et al., 2023).

Además de los impactos ambientales y sociales, el uso intensivo de agroquímicos conlleva implicaciones económicas relevantes. Entre ellas destacan el aumento en los costos de producción por la dependencia creciente de insumos químicos, la vulnerabilidad a la volatilidad de los precios internacionales de pesticidas y fertilizantes, así como los gastos asociados a la mitigación de daños a la salud pública y al ambiente (Mance et al., 2025). Asimismo, las restricciones comerciales derivadas de residuos por encima de los límites legales pueden traducirse en pérdidas económicas para productores y exportadores, afectando la competitividad agrícola en mercados exigentes (Devi et al., 2025).

### 4.3 IMPACTO EN LA SALUD Y EL AMBIENTE: ANÁLISIS COMPARATIVO

La literatura científica revisada confirma que los agroquímicos, especialmente los plaguicidas, generan una cadena de impactos adversos que afectan tanto a los ecosistemas como a la salud humana, evidenciando la estrecha interconexión entre el bienestar ambiental y humano.

Con el fin de integrar los resultados reportados por diversas investigaciones y fortalecer el análisis comparativo, la **Tabla 1** resume los efectos más relevantes asociados al uso de agroquímicos, diferenciando el tipo de compuesto involucrado, la población o ecosistema afectado y las implicaciones para la sostenibilidad.

**Tabla 1.** Impactos documentados del uso intensivo de agroquímicos en la salud humana y el ambiente

Tipo de impacto	Descripción del efecto	Población/Ecosistema afectado	Compuesto / Grupo químico asociado	Referencia
Neurotoxicidad por inhibición de AChE	Disminución significativa de la actividad de AChE y presencia de síntomas neurológicos como cefaleas, problemas de memoria, irritabilidad e insomnio	Trabajadores bananeros y florícolas	Organofosforados	Barre et al. (2023); Vásquez-Venegas et al. (2016)
Toxicidad crónica y cáncer	Asociación entre exposición acumulada e incremento de mortalidad por cáncer en general (hombres) y cáncer de mama (mujeres)	Agroaplicadores rurales	Mezclas de plaguicidas	Butinof et al. (2017)

Toxicidad por formulantes comerciales	Formulantes POEA responsables de mayor citotoxicidad e inhibición de aromatasas; efectos tóxicos incluso en bajas dosis	Células humanas y organismos acuáticos	Herbicidas GBH (glifosato + formulantes)	Defarge et al. (2018)
Exposición alimentaria	Residuos detectados en alimentos y biomarcadores urinarios en 98 % de niños escolares	Población infantil	Organofosforados	Wongta et al. (2022)
Alteración de hongos acuáticos	Riesgo crítico para hongos esenciales en la descomposición y el soporte de cadenas tróficas	Ecosistemas acuáticos	Fungicidas	Pimentão et al. (2024)
Disminución de polinizadores	Reducción significativa en la abundancia de abejas y otros polinizadores en cultivos tratados	Polinizadores terrestres	Neonicotinoides e insecticidas	Hisamoto et al. (2024); Mina et al. (2025)

**Nota.** Elaboración propia a partir de datos reportados por Barre et al. (2023); Butinof et al. (2017); Defarge et al. (2018); Hisamoto et al. (2024); Mina et al. (2025); Pimentão et al. (2024); Vásquez-Venegas et al. (2016); Wongta et al. (2022).

Los hallazgos sintetizados permiten evidenciar la magnitud y diversidad de los efectos asociados a la exposición a agroquímicos, lo que destaca la necesidad de analizar críticamente sus implicaciones en el contexto de sostenibilidad ambiental y salud pública.

La exposición ocupacional a plaguicidas constituye un problema de salud pública de primer orden, siendo la neurotoxicidad el efecto más documentado en la literatura científica (Butinof et al., 2017; Vásquez-Venegas et al., 2016). El mecanismo de acción principal de los organofosforados se basa en la inhibición de la enzima acetilcolinesterasa (AChE), interfiriendo con la transmisión de impulsos nerviosos y provocando efectos tóxicos agudos y crónicos (Barre et al., 2023; Elena et al., 2016).

La actividad de AChE eritrocitaria se ha establecido como biomarcador clave para el seguimiento biológico. Una disminución de su actividad entre 20 y 30 % sugiere una exposición aguda, mientras que niveles por debajo del 50 % se asocian con intoxicación crónica (Barre et al., 2023). En trabajadores bananeros de Ecuador, Barre et al. (2023) reportaron una disminución significativa de AChE, asociada con cefaleas, problemas de memoria y otros síntomas neurológicos, incluso cuando los niveles enzimáticos se encontraban dentro del rango considerado “normal”.

De forma similar, Vásquez-Venegas et al. (2016), reportaron que entre el 32 % y el 50 % de los trabajadores de florícolas ecuatorianos presentaban insomnio, irritabilidad y pérdida de concentración. En Argentina, se observó una correlación negativa entre el Índice de Exposición Acumulada (IE) y la actividad de la butirilcolinesterasa plasmática (BChE) en agroaplicadores, fortaleciendo el uso de biomarcadores como herramientas diagnósticas (Butinof et al., 2017).

Además de la neurotoxicidad, existen riesgos crónicos graves. En Argentina, un aumento en el IE se asoció con mayores tasas de mortalidad por cáncer total en hombres y de mama en mujeres, a nivel departamental (Butinof et al., 2017). Es importante resaltar que estos efectos no se deben exclusivamente a los principios activos declarados en los productos, sino también a los coadyuvantes y formulantes presentes en los productos comerciales.

Investigaciones con herbicidas a base de glifosato (GBH) revelan que formulantes como los POEA (polioxietilenaminas) son responsables de gran parte de la actividad citotóxica y herbicida, superando al glifosato puro (Defarge et al., 2018). Estos formulantes, que representan entre el 10 y 20 % del producto, mostraron efectos

tóxicos significativos en células humanas, incluso a bajas concentraciones, e inhibieron la enzima aromatasa, clave en el sistema endócrino (Defarge et al., 2018).

La evidencia también refuerza que la dieta es un factor crítico de exposición. Por ejemplo, un estudio realizado en escolares tailandeses encontró residuos de organofosforados como clorpirifos en alimentos y biomarcadores urinarios en el 98 % de los niños evaluados. Además, el 100 % de las muestras vegetales recolectadas en mercados locales contenían residuos detectables (Wongta et al., 2022), subrayando la necesidad urgente de implementar controles estrictos para proteger a poblaciones vulnerables, como la infantil. En conjunto, estos hallazgos refuerzan la necesidad de políticas preventivas que integren la salud humana y la protección ambiental.

Los impactos ambientales de los plaguicidas se extienden a múltiples niveles ecológicos, afectando a organismos no objetivo y comprometiendo servicios ecosistémicos clave (Hisamoto et al., 2024; Mina et al., 2025).

En los ecosistemas acuáticos, los fungicidas, la segunda clase de plaguicidas más vendida globalmente se detectan en las concentraciones más elevadas, representando una amenaza directa para los hongos de agua dulce. Estos organismos desempeñan funciones esenciales en la descomposición de materia orgánica y en el sostenimiento de redes tróficas, constituyendo uno de los grupos más vulnerables a estos compuestos (Pimentão et al., 2024).

A pesar de este rol ecológico crítico, las comunidades fúngicas acuáticas son frecuentemente excluidas de los marcos regulatorios, los cuales priorizan peces y macroinvertebrados (Pimentão et al., 2024). Estudios locales, como el realizado en quebrada La Arabia (Colombia), evidencian la presencia de residuos de plaguicidas arrastrados desde zonas agrícolas, aunque en este caso las concentraciones no superaron niveles de riesgo ecotoxicológico para la fauna acuática (Jaramillo, 2015).

En ecosistemas terrestres, el impacto más crítico recae sobre los polinizadores, y la estructura del paisaje se posiciona como un determinante clave del riesgo.

Investigaciones en Japón revelan que zonas agrícolas como arrozales y huertos, así como áreas urbanas donde se emplean insecticidas ornamentales, presentan una elevada frecuencia de residuos de neonicotinoides y glifosatos en la miel recolectada por abejas (Hisamoto et al., 2024).

Un estudio realizado en Ecuador evidenció una disminución significativa en la abundancia de polinizadores como *Eristalis* sp. y *Halictidae* en cultivos de chochos tratados con insecticidas, en comparación con campos sin tratamiento. Además, en algunos casos, las aplicaciones no lograron un control eficaz de plagas objetivo como los barrenadores, e incluso se planteó la hipótesis de un efecto contraproducente al interferir con mecanismos naturales de sobrecompensación vegetal (Mina et al., 2025). Los resultados de este estudio resaltan la necesidad de establecer regulaciones más estrictas, particularmente en etapas sensibles como la floración, para proteger a la entomofauna benéfica.

Esta evidencia revela un patrón continuo y preocupante: los plaguicidas aplicados al campo no solo contaminan el suelo y agua, sino que también alteran las bases ecológicas de los ecosistemas acuáticos al afectar hongos; disminuyen poblaciones de polinizadores terrestres y exponen a los trabajadores a riesgos neurotóxicos y crónicos.

Además, estudios como el de Defarge et al. (2018), muestran que los formulantes tóxicos de los productos comerciales más que los ingredientes activos aislados generan efectos adversos tanto en organismos acuáticos y terrestres como en células humanas. Esto sugiere que existen mecanismos de toxicidad conservados entre distintos reinos biológicos, lo que incrementa la preocupación sobre la magnitud y alcance de sus impactos.

La pérdida de polinizadores, no solo constituye un problema de conservación, sino que representa una amenaza directa a la seguridad alimentaria y la productividad agrícola (Hisamoto et al., 2024; Mina et al., 2025).

Tras abordar los efectos ecológicos, se examinan a continuación las implicaciones sociales y sanitarias derivadas del uso intensivo de agroquímicos.

De manera convergente, la evidencia demuestra que las regiones con mayor uso de plaguicidas presentan simultáneamente mayor degradación ambiental y peores indicadores de salud (Butinof et al., 2017; Pimentão et al., 2024), confirmando la estrecha interrelación entre ambiente y salud pública.

En consecuencia, separar la evaluación de riesgo ambiental de la evaluación sanitaria resulta artificial y contraproducente. Las estrategias futuras deben adoptar un enfoque holístico que contemple los efectos de los plaguicidas en su totalidad, incluidos los formulantes y productos de degradación, integrando la protección de los ecosistemas con la salud de las poblaciones más vulnerables.

## 4.4 EVALUACIÓN DEL MARCO LEGAL Y REGULATORIO

El análisis de los marcos regulatorios globales revela un panorama complejo y fragmentado, donde los intentos por armonizar estándares se enfrentan a realidades nacionales divergentes y desafíos científicos emergentes. Un hallazgo central es la desarmonización en los límites máximos de residuos (LMRs) entre distintas jurisdicciones. Mientras la Comisión del Codex Alimentarius establece parámetros internacionales para facilitar el comercio, la Unión Europea adopta regulaciones mucho más estrictas. Esta discrepancia plantea una inquietud clave si los estándares del Codex priorizan el comercio por encima de la protección de la salud (Kubiak-Hardiman et al., 2023).

Estas diferencias no solo generan barreras comerciales, sino que también reflejan profundas diferencias en la evaluación del riesgo y los niveles aceptables de protección poblacional y ambiental.

Un ejemplo revelador es el caso de Brasil, que ha migrado recientemente de un sistema basado en la peligrosidad intrínseca (*hazard*) hacia un enfoque centrado en

la evaluación del riesgo, con la promulgación de la Ley 14.785/2023 (Cione et al., 2024). Si bien este cambio busca alinearse con sistemas como el de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), surge una tensión significativa, si la aplicabilidad directa de criterios desarrollados para contextos templados puede no ser adecuada para regiones tropicales. Esto subraya la necesidad imperante de desarrollar directrices locales adaptadas a condiciones ecológicas y climáticas específicas, para evitar evaluaciones de riesgos poco realistas o ineficaces (Cione et al., 2024).

Más allá de las discrepancias con los LMR, persisten vacíos estructurales en los marcos regulatorios vigentes. Uno de los más significativos es la falta de consideración del riesgo por mezclas y la exposición acumulativa a múltiples residuos (Carrasco & Medina, 2021; Kubiak-Hardiman et al., 2023). Evaluar sustancias de manera aislada ignora los posibles efectos sinérgicos entre compuestos. Una excepción notable es la Food Quality Protection Act (FQPA) de Estados Unidos, que exige evaluaciones acumulativas y factores de seguridad adicionales. Esto demuestra que un enfoque más robusto es viable, aunque todavía no es la norma a nivel global.

A este contexto se suma la práctica cuestionable de la exportación de plaguicidas prohibidos desde países desarrollados hacia naciones en desarrollo (Handford et al., 2015). Este comercio plantea dilemas éticos y riesgos ambientales, ya que estos productos pueden reingresar como residuos en alimentos importados, comprometiendo la seguridad alimentaria local e internacional (Reeves et al., 2019).

En respuesta han surgido herramientas de gestión con diversos niveles de sofisticación. Se observa una transición desde modelos como el Environmental Impact Quotient (EIQ), ampliamente usado pero criticado por su arbitrariedad, hacia enfoques más precisos como el Pesticide Risk Tool (PRT).

El PRT utiliza modelos probabilísticos que cuantifican la probabilidad de efectos adversos, portando valor ecológico y toxicológico útil para decisiones de manejo integrado de plagas (Meys et al., 2024).

En cuanto a modelos operativos, el análisis de la externalización de servicios de aplicación en China aporta perspectivas clave. De acuerdo con la teoría principal-agente, una supervisión más estricta del productor reduce la intensidad en el uso de agroquímicos y limita la ocurrencia de prácticas negligentes durante la aplicación (Liu, Y., et al., 2024). No obstante, el aumento en la escala de operaciones incrementa los costos de supervisión, lo que limita su efectividad. Esto implica que las políticas de reducción de plaguicidas deben considerar también los modelos de negocio, incorporando sanciones claras y mecanismos de supervisión eficaces a lo largo de la cadena de valor.

En síntesis, el sistema regulatorio global se encuentra en transición. Aunque la evolución hacia una evaluación basada en el riesgo es prometedora, es indispensable complementar, con una armonización internacional basada en el principio de la precaución, el desarrollo de capacidades técnicas para evaluar riesgos acumulativos y efectos crónicos, la coherencia política que prohíba la exportación de plaguicidas no autorizados localmente, la adopción de herramientas de evaluación de riesgo más precisas y enfoques integrales que internalicen la responsabilidad en toda la cadena de producción y aplicación.

## 4.5 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS Y PRÁCTICAS AGROECOLÓGICAS

La revisión evidencia un paradigma emergente en la agronomía, donde la sostenibilidad se construye sobre la base de la innovación en formulaciones, la sinergia con bioinsumos (productos biológicos formulados a partir de microorganismos, extractos vegetales o minerales que mejoren la productividad agrícola sin generar impactos tóxicos) y la integración de tecnologías de precisión (da Silva Medina et al., 2024). Los resultados apuntan a una transición desde

enfoques unidimensionales hacia estrategias integradas que maximizan la eficiencia de los recursos y minimizan la huella ambiental.

En el ámbito de las tecnologías emergentes, se han desarrollado formulaciones de alta ingeniería como los complejos de inclusión (ICs) con poliésteres degradables, que permiten controlar con precisión la liberación de nutrientes mediante la manipulación de la cristalinidad del polímero (Ye et al., 2020). Los fertilizantes vitrificados (agrividrios), por su parte, encapsulan macro y micronutrientes en matrices inorgánicas que cumplen con normativas internacionales de liberación controlada, y superan el rendimiento de formulaciones NPK convencionales (Labbilta et al., 2021).

Un avance significativo en la economía circular lo constituyen los nanofertilizantes (NEF) derivados de residuos como los lodos de plantas de tratamiento de agua, que permiten recuperar fósforo, potasio y magnesio, transformando un desecho en un recurso de valor agrícola (Elsabagh et al., 2024). Tecnologías habilitadoras como el cribado de alto rendimiento que utiliza big data para correlacionar variables como el tamaño de partícula con la eficacia biocida, potencian el diseño racional de agroquímicos (Yu et al., 2023).

En la aplicación foliar, el uso de adyuvantes ecológicos como calcita y dolomita ha mejorado la absorción de nutrientes como calcio, potasio y magnesio. No obstante, su interacción con otros micronutrientes como el zinc, requiere formulaciones específicas para evitar la formación de precipitados indeseados (Pimentel et al., 2023). La eficiencia de nutrientes también se optimiza mediante bioestimulantes y prácticas de manejo. Por ejemplo, los glicolípidos permiten reducir el uso de nitrógeno hasta en un 20 % en maíz sin afectar el rendimiento (Meng et al., 2024).

En arroz, paquetes tecnológicos que combinan fertilizantes de liberación controlada con densidades de siembra ajustadas han aumentado el rendimiento entre un 3.1 % y 10.3 %, mejorando además la eficiencia de recuperación del nitrógeno en un 30 % (Hu et al., 2024).

El papel del microbioma y los bioinsumos es crucial. Fertilizantes nitrogenados a base de biocarbón no solo incrementan el rendimiento, sino que modulan genes del suelo para reducir las emisiones de óxido nitroso de la comunidad microbiana del suelo (Liao et al., 2020). De la misma manera, los fertilizantes orgánicos enriquecidos con rizobacterias mitigan el estrés salino (Riddech et al., 2025), mientras, biorreguladores como el tidiázurón y el ácido giberélico incrementan la brotación y el rendimiento en cultivos como el arándano (García-Vázquez et al., 2023). Bioestimulantes foliares derivados de algas ayudan a enfrentar sequías en pimiento (Yaseen et al., 2024).

La precisión en la aplicación se fortalece con sensores capacitivos helicoidales que permiten el monitoreo en tiempo real del flujo de fertilizantes sólidos, garantizando uniformidad y eficiencia (Dalacort & Stevan, 2018). Este tipo de tecnologías posibilita sistemas de aplicación de tasa variable guiados por sensores y datos digitales, que reducen el uso de agroquímicos sin afectar el rendimiento (Liu, D., et al., 2024).

## 4.6 PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS NATURALES

Un hallazgo clave emergente es la capacidad de las nuevas formulaciones para modular activamente el microbioma del suelo, no como efecto colateral, sino como un mecanismo central para mejorar la salud del suelo y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este avance abre la posibilidad de desarrollar diagnósticos microbiológicos personalizados que orienten a la fertilización según las características de cada suelo. No obstante, la adopción masiva de estas innovaciones exige superar retos significativos. La escalabilidad industrial, junto a análisis rigurosos de costo-beneficio, será fundamental para viabilizar su implementación a gran escala.

Simultáneamente, es urgente establecer marcos regulatorios ágiles y específicos capaces de evaluar tecnologías que no encajan en las categorías tradicionales.

Adicionalmente, se requiere el desarrollo de una infraestructura digital de soporte basada en sensores, inteligencia artificial y sistemas de ayuda a la decisión. Esta infraestructura permitiría aplicar agroquímicos de forma más precisa y ambientalmente responsable.

## 6. CONCLUSIONES

---

La evidencia científica revisada demuestra que los agroquímicos generan una cadena compleja de impactos interconectados que comprometen simultáneamente la salud humana, la integridad de los ecosistemas terrestres y acuáticos, y la estabilidad de los servicios ecosistémicos. Destacan los efectos neurotóxicos y endócrinos en trabajadores agrícolas, así como la pérdida de polinizadores y de microorganismos edáficos clave, esenciales para la productividad y la resiliencia de los sistemas agrícolas.

Los coformulantes e “ingredientes inertes” presentes en muchas formulaciones comerciales de plaguicidas y herbicidas evidencian toxicidades comparables o superiores a los principios activos declarados. Esta situación plantea la necesidad urgente de redefinir los marcos de evaluación toxicológica y regulación y ampliar la regulación hacia una valoración integral del producto comercial completo y sus metabolitos.

Los marcos regulatorios actuales a escala internacional, regional y nacional presentan vacíos estructurales significativos, especialmente en lo que respecta a la evaluación de mezclas químicas, exposiciones crónicas, efectos sinérgicos y acumulativos. La desarmonización de los límites máximos de residuos (LMR) entre regiones evidencia la disparidad de prioridades entre el comercio y la protección de la salud y el ambiente.

Las Innovaciones tecnológicas recientes como fertilizantes de liberación controlada, los bioinsumos, los bioplaguicidas, las formulaciones ecológicas y las herramientas de agricultura de precisión constituyen alternativas viables y sostenibles. Estas tecnologías permiten reducir la dependencia de insumos químicos convencionales, mejorar la eficiencia agronómica y fortalecer la salud del suelo y de los agroecosistemas.

La adopción efectiva de las nuevas tecnologías requiere políticas públicas integrales que faciliten la transferencia tecnológica, la capacitación a agricultores y la creación de marcos regulatorios adaptados a las condiciones locales. Además, es indispensable promover nuevas metodologías de evaluación del riesgo que integren simultáneamente las dimensiones ecológica, sanitaria, social y económica, asegurando coherencia entre productividad y sostenibilidad.

## REFERENCIAS

- Agencia de Regulación y Control Fito y Zoonosanitario. (2025, 7 de abril). *Resolución 0026: Manual técnico para la implementación y autorización del servicio de inspección de ensayos de eficacia de plaguicidas de uso agrícola*. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://www.agrocalidad.gob.ec/>
- Agencia de Regulación y Control Fito y Zoonosanitario. (2019, noviembre). *Plaguicidas prohibidos en el Ecuador*. Coordinación General de Registro de Insumos Agropecuarios, Dirección de Registro de Insumos Agrícolas. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://www.agrocalidad.gob.ec/>
- Ahmad, M. F., Ahmad, F. A., Alsayegh, A. A., Zeyaulah, M., AlShahrani, A. M., Muzammil, K., Saati, A. A., Wahab, S., Elbendary, E. Y., Kambal, N., Abdelrahman, M. H., & Hussain, S. (2024). Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. *Heliyon*, *10*(7), e29128. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E29128>
- Ahmed, G., Anawar, H. M., Takuwa, D. T., Chibua, I. T., Singh, G. S., & Sichilongo, K. (2015). Environmental assessment of fate, transport and persistent behavior of dichlorodiphenyltrichloroethanes and hexachlorocyclohexanes in land and water ecosystems. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *12*(8), 2741–2756. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/S13762-015-0792-3/TABLES/6>
- Aioub, A. A. A., Ghosh, S., AL-Farga, A., Khan, A. N., Bibi, R., Elwakeel, A. M., Nawaz, A., Sherif, N. T., Elmasry, S. A., & Ammar, E. E. (2024). Back to the origins: biopesticides as promising alternatives to conventional agrochemicals. *European Journal of Plant Pathology*, *169*(4), 697–713. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10658-024-02865-6>
- Ali, S., Ahmad, N., Dar, M. A., Manan, S., Rani, A., Alghanem, S. M. S., Khan, K. A., Sethupathy, S., Elboughdiri, N., Mostafa, Y. S., Alamri, S. A., Hashem, M., Shahid, M., & Zhu, D. (2023). Nano-Agrochemicals as Substitutes for Pesticides: Prospects and Risks. *Plants*, *13*(1). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/PLANTS13010109>

- Almutari, M. M. (2023). Synthesis and modification of slow-release fertilizers for sustainable agriculture and environment: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(9), 518. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11614-8>
- Ansari, I., El-Kady, M. M., El Din Mahmoud, A., Arora, C., Verma, A., Rajarathinam, R., Singh, P., Verma, D. K., & Mittal, J. (2024). Persistent pesticides: Accumulation, health risk assessment, management and remediation: An overview. *Desalination and Water Treatment*, 317. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100274>
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento N.º 983, 12 de abril de 2017. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/>
- Atinkut Asmare, B., Freyer, B., & Bingen, J. (2022). Women in agriculture: pathways of pesticide exposure, potential health risks and vulnerability in sub-Saharan Africa. In *Environmental Sciences Europe* (Vol. 34, Issue 1). Springer. Obtenido de <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00638-8>
- Barre, V. L. M., Briones, Á. M. I., & Muñoz, A. K. B. (2023). Efectos neurotóxicos asociados a la exposición crónica a plaguicidas organofosforados en trabajadores bananeros: Neurotoxic effects associated with chronic exposure to organophosphate pesticides in banana workers. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2), 5470-5483–5470–5483. Obtenido de <https://doi.org/10.56712/LATAM.V4I2.994>
- Bernardino-Hernández, H. U., Mariaca-Méndez, R., Nazar-Beutelspacher, A., Álvarez-Solís, J. D., Torres-Dosal Arturo, & Herrera-Portugal, C. (2019). Conocimientos, conductas y síntomas de intoxicación aguda por plaguicidas entre productores de tres sistemas de producción agrícolas en los altos de Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(1), 7–23. Obtenido de <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.01.01>
- Bijay, S., & Craswell, E. (2021). Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. *SN Applied Sciences*, 3(4), 518. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/S42452-021-04521-8/FIGURES/4>
- Boedeker, W., Watts, M., Clausing, P., & Marquez, E. (2020). The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review.

- BMC Public Health*, 20(1). Obtenido de <https://doi.org/10.1186/S12889-020-09939-0>
- Bonnineau, C., Artigas, J., Chaumet, B., Dabrin, A., Faburé, J., Ferrari, B. J. D., Lebrun, J. D., Margoum, C., Mazzella, N., Miège, C., Morin, S., Uher, E., Babut, M., & Pesce, S. (2021). Role of Biofilms in Contaminant Bioaccumulation and Trophic Transfer in Aquatic Ecosystems: Current State of Knowledge and Future Challenges. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 253, 115–153. Obtenido de [https://doi.org/10.1007/398\\_2019\\_39/FIGURES/5](https://doi.org/10.1007/398_2019_39/FIGURES/5)
- Brusseau, M. L., Ramirez-Andreotta, M., Pepper, I. L., & Maximillian, J. (2019). Environmental Impacts on Human Health and Well-Being. In M. Brusseau, I. Pepper, & C. Gerba (Eds.), *Environmental and Pollution Science* (pp. 477–499). Elsevier. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814719-1.00026-4>
- Butinof, M., Fernández, R., Muñoz, S., Lerda, D., Lantieri, M. J., Antolini, L., Gioco, M., Ortiz, P., Filippi, I., Franchini, G., Eandi, M., Montedoro, F., & Díaz, M. del P. (2017). Valoración de la exposición a plaguicidas en cultivos extensivos de Argentina y su potencial impacto sobre la salud. *Rev Argent Salud Pública*, 8, 8–15. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/323944518>
- Cajamarca, C. D. I., Paredes, G. M. M., Cabrera, E. C. P., Velasco, M. L. A., & Vaca, C. M. L. (2020). Agroquímicos: enemigos latentes para los polinizadores y la producción de alimentos primarios que agonizan. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, 3, 31. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7760495&info=resumen&idoma=ENG>
- Carrasco, C. L., & Medina, P. P. (2021). The 2019 European Union report on pesticide residues in food. *EFSA Journal*, 19(4), 6491. Obtenido de <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6491>
- Cauci, B. A. I., Pena, D., & Risso, F. (2024). Plaguicidas y salud socio-ambiental: las dificultades en el acceso a la información y su impacto socio-político. *ResearchGate*, 5, 183–208. Obtenido de <https://doi.org/10.36225/tekopora.v5i2.212>
- Cione, A. P., Santos, G. S., Del Giudice Paniago, M., Sales, M., & Casallanovo, F. (2024). A new regulatory paradigm for pesticide registration in Brazil: Comments on recent

- legislative amendments (Law 14.785/2023). In *Integrated Environmental Assessment and Management* (Vol. 20, Issue 3, pp. 595–597). John Wiley and Sons Inc. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/ieam.4923>
- Comisión de la Comunidad Andina. (2015). Decisión 804: *Normas andinas para el registro y control de plaguicidas químicos de uso agrícola*. Secretaría General de la Comunidad Andina. Obtenido de <https://www.comunidadandina.org/>
- Comité Andino de Sanidad Agropecuaria. (2017). Resolución 2075: *Requisitos para el reconocimiento y funcionamiento de los laboratorios oficiales de control de calidad de plaguicidas químicos de uso agrícola*. [Manual Técnico Andino]. Secretaría General de la Comunidad Andina. Obtenido de <https://www.comunidadandina.org/>
- Commelin, M. C., Baartman, J. E. M., Zomer, P., Riksen, M., & Geissen, V. (2022). Pesticides are Substantially Transported in Particulate Phase, Driven by Land use, Rainfall Event and Pesticide Characteristics—A Runoff and Erosion Study in a Small Agricultural Catchment. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 830589. Obtenido de <https://doi.org/10.3389/FENVS.2022.830589/BIBTEX>
- da Silva Medina, G., Rotondo, R., & Rodríguez, G. R. (2024). Innovations in Agricultural Bio-Inputs: Commercial Products Developed in Argentina and Brazil. *Sustainability* *2024*, Vol. 16, Page 2763, 16(7), 2763. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/SU16072763>
- Dalacort, R., & Stevan, S. L. (2018). Mobile Helical Capacitive Sensor for the Dynamic Identification of Obstructions in the Distribution of Solid Mineral Fertilizers. *Sensors*, *18*(11), 3991. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/S18113991>
- Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J., & Séralini, G. E. (2018). Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. *Toxicology Reports*, *5*, 156–163. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.TOXREP.2017.12.025>
- Delgado, A., Quemada, M., Mateos, L., & Villalobos, F. J. (2024). Fertilization with Phosphorus, Potassium, and Other Nutrients. *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture, Second Edition*, 415–437. Obtenido de [https://doi.org/10.1007/978-3-031-69150-8\\_28/TABLES/8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-69150-8_28/TABLES/8)

- Devi, P. I., Manjula, M., & Bhavani, R. V. (2025). *Annual Review of Environment and Resources Agrochemicals, Environment, and Human Health*. 40, 3. Obtenido de <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120920>
- Djafaripetroudy, S., Fatehi, P., El Idrissi, A., Kang, K., Abidi, N., & McLaren, B. (2025). Advancing agricultural efficiency and sustainability: Bio-inspired superabsorbent hydrogels for slow and controlled release fertilizers. In *Science of the Total Environment* (Vol. 977). Elsevier B.V. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179366>
- Donald, P. F., Green, R. E., & Heath, M. F. (2012). Agricultural intensification and the collapse of Europe's farmland bird populations. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 268(1462), 25–29. Obtenido de <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1325>
- Dugan, S. T., Muhammetoglu, A., & Uslu, A. (2023). A combined approach for the estimation of groundwater leaching potential and environmental impacts of pesticides for agricultural lands. *Science of The Total Environment*, 901, 165892. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.165892>
- Elias, E. D. F. (2022). Impacto de la toxicidad de los residuos sólidos generados por plaguicidas. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 2022(9), 124–139. Obtenido de <https://doi.org/10.18800/KAWSAYPACHA.202201.006>
- Elsabagh, S. S., Elkhatib, E. A., & Rashad, M. (2024). Novel nano-fertilizers derived from drinking water industry waste for sustained release of macronutrients: performance, kinetics and sorption mechanisms. *Scientific Reports*, 14(1). Obtenido de <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56274-0>
- FAO & WHO. (2019). *Report on Counterfeit and Substandard Pesticides*. Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Management. Rome: FAO. Obtenido de <https://www.fao.org/pesticide-management/jmpm/en/>
- Farooque, A. A., Hussain, N., Schumann, A. W., Abbas, F., Afzaal, H., McKenzie-Gopsill, A., Esau, T., Zaman, Q., & Wang, X. (2023). Field evaluation of a deep learning-based smart variable-rate sprayer for targeted application of agrochemicals. *Smart Agricultural Technology*, 3. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100073>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), & World Health Organization (WHO). (2014). *The international code of conduct on pesticide management*. FAO & WHO. Obtenido de <https://www.fao.org/publications>
- Gámiz, B., Pignatello, J. J., Cox, L., Hermosín, M. C., & Celis, R. (2016). Environmental fate of the fungicide metalaxyl in soil amended with composted olive-mill waste and its biochar: An enantioselective study. *Science of the Total Environment*, 541, 776–783. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.097>
- García-Vázquez, I., Calderón-Zavala, G., & Arévalo-Galarza, Ma. de L. (2023). Bioregulators and biostimulants on development, growth and fruit yield of blueberry cv. biloxi. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(4), 383–388. Obtenido de <https://doi.org/10.35196/RFM.2023.4.383>
- Garud, A., Pawar, S., Patil, M. S., Kale, S. R., & Patil, S. (2024). A Scientific Review of Pesticides: Classification, Toxicity, Health Effects, Sustainability, and Environmental Impact. *Cureus*, 16(8), e67945. Obtenido de <https://doi.org/10.7759/CUREUS.67945>
- Giordano, M., Petropoulos, S. A., & Roupheal, Y. (2021). The Fate of Nitrogen from Soil to Plants: Influence of Agricultural Practices in Modern Agriculture. *Agriculture*, 11(10), 944. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11100944>
- González-Alzaga, B., Lacasaña, M., Aguilar-Garduño, C., Rodríguez-Barranco, M., Ballester, F., Rebagliato, M., & Hernández, A. F. (2014). A systematic review of neurodevelopmental effects of prenatal and postnatal organophosphate pesticide exposure. *Toxicology Letters*, 230(2), 104–121. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2013.11.019>
- Handford, C. E., Elliott, C. T., & Campbell, K. (2015). A review of the global pesticide legislation and the scale of challenge in reaching the global harmonization of food safety standards. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(4), 525–536. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/ieam.1635>
- Hendriks, C. M. J., Gibson, H. S., Trett, A., Python, A., Weiss, D. J., Vrieling, A., Coleman, M., Gething, P. W., Hancock, P. A., & Moyes, C. L. (2019). Mapping geospatial processes affecting the environmental fate of agricultural pesticides in Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(19), 3523. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/ijerph16193523>

- Hisamoto, S., Ikegami, M., Goka, K., & Sakamoto, Y. (2024). The impact of landscape structure on pesticide exposure to honey bees. *Nature Communications*, 15(1), 8999. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52421-3>
- Hu, Q., Gu, Y., Lu, X., Jiang, W., Zhang, K., Zhu, H., Li, G., Xu, F., Zhu, Y., Liu, G., Gao, H., Zhang, H., & Wei, H. (2024). Effects of One-Time Reduced Basal Application of Controlled-Release Nitrogen Fertilizer with Increased Planting Density on Yield and Nitrogen Utilization of Mechanically Transplanted Japonica Rice. *Agronomy*, 14(12), 3072. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14123072>
- Huerta, S. K. K., & Martínez, C. A. L. (2018). La revolución verde. *Periodicidad: Semestral*, 4, 1040–1046. Obtenido de <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i8.6717>
- Jaramillo, J. P. (2015). Estudio preliminar sobre los impactos de los agroquímicos en el agua de la quebrada La Arabia y en la salud pública del municipio de Venecia, Antioquia, Colombia. *Que Es Una Revista de Investigación En Administración, Contabilidad, Economía y Sociedad*, 3, 59–75. Obtenido de <https://doi.org/10.53995/23463279.293>
- Jiaying, M., Tingting, C., Jie, L., Weimeng, F., Baohua, F., Guangyan, L., Hubo, L., Juncai, L., Zhihai, W., Longxing, T., & Guanfu, F. (2022). Functions of Nitrogen, Phosphorus and Potassium in Energy Status and Their Influences on Rice Growth and Development. *Rice Science*, 29(2), 166–178. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.RSCI.2022.01.005>
- Kah, M., Walch, H., & Hofmann, T. (2018). Environmental fate of nanopesticides: durability, sorption and photodegradation of nanoformulated clothianidin †. *Environmental Science: Nano*, 5(4), 882. Obtenido de <https://doi.org/10.1039/c8en00038g>
- Kariyanna, B., Senthil-Nathan, S., Vasantha-Srinivasan, P., Subba Reddy, B. V., Krishnaiah, A., Meenakshi, N. H., Han, Y. S., Karthi, S., Chakravarthy, A. K., & Park, K. B. (2024). Comprehensive insights into pesticide residue dynamics: unraveling impact and management. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11(1), 182. Obtenido de <https://doi.org/10.1186/S40538-024-00708-4/FIGURES/2>
- Koli, P., Bhardwaj, N. R., & Mahawer, S. K. (2019). Agrochemicals: Harmful and beneficial effects of climate changing scenarios. In *Climate Change and Agricultural Ecosystems: Current Challenges and Adaptation* (pp. 65–94). Elsevier. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816483-9.00004-9>

- Kubiak-Hardiman, P., Haughey, S. A., Meneely, J., Miller, S., Banerjee, K., & Elliott, C. T. (2023). Identifying Gaps and Challenges in Global Pesticide Legislation that Impact the Protection of Consumer Health: Rice as a Case Study. *Exposure and Health*, 15(3), 597–618. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/S12403-022-00508-X/TABLES/4>
- Labbilta, T., Ait-El-mokhtar, M., Abouliatim, Y., Khouloud, M., Meddich, A., & Mesnaoui, M. (2021). Innovative Formulations of Phosphate Glasses as Controlled-Release Fertilizers to Improve Tomato Crop Growth, Yield and Fruit Quality. *Molecules*, 26(13), 3928. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26133928>
- Lázaro-Dzul, M. O., Velázquez-Mendoza, J., Vargas-Hernández, J. J., Gómez-Guerrero, A., Álvarez-Sánchez, M. E., & López-López, M. A. (2012). Fertilization With Nitrogen, Phosphorus And Potassium In Pinus Patula Schl. Et Cham Samplings. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 18(1), 33–42. Obtenido de <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.01.001>
- Liao, J., Liu, X., Hu, A., Song, H., Chen, X., & Zhang, Z. (2020). Effects of biochar-based controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen-use efficiency of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Scientific Reports*, 10(1), 1–14. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/S41598-020-67528-Y;SUBJMETA>
- Liu, D., Li, W., Gao, H., Huang, C., Xu, S., & Liu, W. (2024). Organic Water-Soluble Fertilizers Enhance Pesticide Degradation: Towards Reduced Residues. *Journal of Agricultural Sciences*, 30(1), 179–192. Obtenido de <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1315200>
- Liu, G., Zotarelli, L., Li, Y., Dinkins, D., Wang, Q., & Ozores-Hampton, M. (2014). Controlled-Release and Slow-Release Fertilizers as Nutrient Management Tools. In *University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences*. Obtenido de <https://doi.org/10.32473/edis-hs1255-2014>
- Liu, T., Deng, F., Zhu, Y., Wang, L., He, C., Liu, R., Liu, Y., Yang, J., Li, Q., Yuan, Y., Ai, X., Wang, R., Peng, Y., Hu, X., Cheng, H., Tao, Y., Zhou, W., Lei, X., Chen, Y., & Ren, W. (2025). Potassium fertilizer management improves rice yield by optimizing the morphological and physiological characteristics of leaves under shading stress. In *Journal of Integrative Agriculture*. Obtenido de [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311925001467?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=97c7aaba8cb6a9e5](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311925001467?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=97c7aaba8cb6a9e5)

- Liu, Y., Wang, H., Liu, C., Li, M., & Xu, D. (2024). The Impact of Outsourcing Service Adoption on Pesticide Application Reduction from the Perspective of the Principal-Agent Theory: An Empirical Study from Rural China. *Land*, 13(12), 2046. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/LAND13122046>
- Lu, Y., Song, S., Wang, R., Liu, Z., Meng, J., Sweetman, A. J., Jenkins, A., Ferrier, R. C., Li, H., Luo, W., & Wang, T. (2015). Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. *Environment International*, 77, 5–15. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.12.010>
- Maaz, T. M., Dobermann, A., Lyons, S. E., & Thomson, A. M. (2025). Review of research and innovation on novel fertilizers for crop nutrition. *Npj Sustainable Agriculture*, 3(1). Obtenido de <https://doi.org/10.1038/s44264-025-00066-0>
- Madgwick, P. G., & Kanitz, R. (2024). What is the value of rotations to insecticide resistance management? *Pest Management Science*, 80(4), 1671–1680. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/ps.7939>
- Malik, Z., Ahmad, M., Abassi, G. H., Dawood, M., Hussain, A., & Jamil, M. (2017a). *Agrochemicals and Soil Microbes: Interaction for Soil Health* (pp. 139–152). Obtenido de [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47744-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47744-2_11)
- Mance, D., Pedić, A., & Mance, D. (2025). Economic development and pesticide use in EU agriculture. *Chemosphere*, 380. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144461>
- Mandal, A., Sarkar, B., Mandal, S., Vithanage, M., Patra, A. K., & Manna, M. C. (2017). Impact of agrochemicals on soil health. *Elsevier*, 161–187. Obtenido de [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47744-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47744-2_11)
- Matthews, G. A. (2015). *Pesticides: health, safety and the environment*. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118975923>
- Mayer, L., Degrendele, C., Šenk, P., Kohoutek, J., Příbylová, P., Kukučka, P., Melymuk, L., Durand, A., Ravier, S., Alastuey, A., Baker, A. R., Baltensperger, U., Baumann-Stanzer, K., Biermann, T., Bohlin-Nizzetto, P., Ceburnis, D., Conil, S., Couret, C., Degórska, A., ... Lammel, G. (2024). Widespread Pesticide Distribution in the European Atmosphere Questions their Degradability in Air. *Environmental Science & Technology*, 58(7), 3342–3352. Obtenido de <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.3C08488>

- Meng, X., Dong, Q., Wang, B., Ni, Z., Zhang, X., Liu, C., Yu, W., Liu, J., Shi, X., Xu, D., & Duan, Y. (2024). Effect of Glycolipids Application Combined with Nitrogen Fertilizer Reduction on Maize Nitrogen Use Efficiency and Yield. *Plants*, 13(9), 1222. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/PLANTS13091222/S1>
- Meys, E. L., Mineau, P., Werts, P., Nelson, S. G. A., Larson, A., & Hutchison, W. D. (2024). Assessment of insecticide risk quantification methods: Introducing the Pesticide Risk Tool and its improvements over the Environmental Impact Quotient. *Journal of Integrated Pest Management*, 15(1), 9–10. Obtenido de <https://doi.org/10.1093/JIPM/PMAD032>
- Mina, D., Cayambe, J., Cárdenas, T., Navarrete, I., & Dangles, O. (2025). Pesticidas y su impacto sobre la entomofauna en fincas de agricultores andinos de Ecuador. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de La Vida*, 41(1), 53–71. Obtenido de <https://doi.org/10.17163/LGR.N41.2025.03>
- Ministerio del Ambiente y Agua. (2019). *Guía para la gestión adecuada de plaguicidas*. Programa Nacional para la Gestión Ambientalmente Adecuada de Sustancias Químicas en su Ciclo de Vida (PNGQ). Quito, Ecuador: Autor. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/>
- Mohanty, S. S., Singh, P., Nistala, S., & Mohanty, K. (2024). Understanding the environmental fate and removal strategies of phenylurea herbicides: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 16, 100496. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.HAZADV.2024.100496>
- Mohd, G. R., Nik, Y. N. R., Abdul, H. N. S., Abdul, W. I. R., Ab Latif, N., Hasmoni, S. H., Ahmad, M. A., & Zakaria, A. Z. (2023). Health effects of herbicides and its current removal strategies. *Bioengineered*, 14, 2259526. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2259526>
- Molina, Z. J. E. (2021). La revolución verde como revolución tecnocientífica: artificialización de las prácticas agrícolas y sus implicaciones. *Revista Colombiana de Filosofía de La Ciencia*, 21(42), 174–304. Obtenido de <https://doi.org/10.18270/rcfc.v21i42.3477>
- Noman, M., Ahmed, T., White, J. C., & Wang, J. (2024). Bioinspired smart microcarriers precisely deliver agrochemicals in plants. In *Trends in Plant Science* (Vol. 29, Issue 12, pp. 1288–1289). Elsevier Ltd. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.07.011>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024). *Comisión del Codex Alimentarius: Límites máximos de residuos de plaguicidas en alimentos*. FAO y OMS. Obtenido de <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (1998). *Convenio de Rotterdam sobre el Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo Aplicable a Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos Objeto de Comercio Internacional*. Adoptado el 10 de septiembre de 1998, en vigor desde el 24 de febrero de 2004. Obtenido de <https://www.pic.int/>

Ortíz, I., Avila-Chávez, M. A., & Torres, L. G. (2014). Plaguicidas en México: usos, riesgos y marco regulatorio. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 5(1), 26–46. Obtenido de <https://doi.org/10.7603/S40682-014-0003-9>

Parker, K. M., Barraga, B. V., van Leeuwen, D. M., Lever, M. A., Mateescu, B., & Sander, M. (2019). Environmental Fate of RNA Interference Pesticides: Adsorption and Degradation of Double-Stranded RNA Molecules in Agricultural Soils. *Environmental Science & Technology*, 53, 3027–3036. Obtenido de <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05576>

Pathak, V. M., Verma, V. K., Rawat, B. S., Kaur, B., Babu, N., Sharma, A., Dewali, S., Yadav, M., Kumari, R., Singh, S., Mohapatra, A., Pandey, V., Rana, N., & Cunill, J. M. (2022). Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 13). Frontiers Media S.A. Obtenido de <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.962619>

Pérez-Lucas, G., Vela, N., Abderrazak, E. A., & Navarro, S. (2018). Environmental Risk of Groundwater Pollution by Pesticide Leaching through the Soil Profile. In *Pesticides - Use and Misuse and Their Impact in the Environment*. IntechOpen. Obtenido de <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.82418>

- Pernalete, R. M. E., & Hernández, P. A. J. (2016). Riesgos laborales por exposición a plaguicidas contra el mosquito *Aedes aegypti*. *Saber*, 28(1), 05–17. Obtenido de [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1315-01622016000100002](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622016000100002)
- Pimentão, A. R., Cuco, A. P., Pascoal, C., Cássio, F., & Castro, B. B. (2024). Current trends and mismatches on fungicide use and assessment of the ecological effects in freshwater ecosystems. *Environmental Pollution*, 347, 123678. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2024.123678>
- Pimentel, C., Pina, C. M., Müller, N., Lara, L. A., Melo, R. G., Orlando, F., Schoelkopf, J., & Fernández, V. (2023). Mineral Particles in Foliar Fertilizer Formulations Can Improve the Rate of Foliar Uptake. *Plants*, 13(1), 71. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/PLANTS13010071>
- Presidencia de la República del Ecuador. (2019). *Reglamento al Código Orgánico del Ambiente*. Decreto Ejecutivo N.º 752, Registro Oficial Suplemento N.º 507, 12 de junio de 2019. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/>
- Priya, E., Sarkar, S., & Maji, P. K. (2024). A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(4), 113211. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.113211>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (1989). *Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación*. Adoptado el 22 de marzo de 1989, en vigor desde el 5 de mayo de 1992. Obtenido de <https://www.basel.int/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2001). *Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes*. Adoptado el 22 de mayo de 2001, en vigor desde el 17 de mayo de 2004. Obtenido de <https://www.pops.int/>
- Rahman, Md. H., Haque, K. M. S., & Khan, Md. Z. H. (2021). A review on application of controlled released fertilizers influencing the sustainable agricultural production: A Cleaner production process. *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101697. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101697>

- Reeves, W. R., McGuire, M. K., Stokes, M., & Vicini, J. L. (2019). Assessing the Safety of Pesticides in Food: How Current Regulations Protect Human Health. *Advances in Nutrition*, 10(1), 80–88. Obtenido de <https://doi.org/10.1093/ADVANCES/NMY061>
- Riddech, N., Theerakulpisut, P., Ma, Y. N., & Sarin, P. (2025). Bioorganic fertilizers from agricultural waste enhance rice growth under saline soil conditions. *Scientific Reports*, 15(1), 1–17. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/S41598-025-93619-9>;SUBJMETA
- Rimski-Korsakov, H., & Lavado, R. S. (2022). *Uso de fertilizantes y abonos en agroecosistemas*.
- Sardans, J., & Peñuelas, J. (2021). Potassium Control of Plant Functions: Ecological and Agricultural Implications. *Plants*, 10, 419. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/plants10020419>
- Scheer, C., & Rütting, T. (2023). Use of <sup>15</sup>N tracers to study nitrogen flows in agroecosystems: transformation, losses and plant uptake. In *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (Vol. 125, Issue 2, pp. 89–93). Institute for Ionics. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10269-x>
- Shanmugavel, D., Rusyn, I., Solorza-Feria, O., & Kamaraj, S.-K. (2023). Sustainable SMART fertilizers in agriculture systems: A review on fundamentals to in-field applications. In *Science of the Total Environment* (Vol. 904, p. 166729). Elsevier B.V. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166729>
- Sharma, H., & Sharma, N. (2025). A Review on the Efficient Release of Nutrients for Sustainable Agriculture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25, 7061–7073. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02580-z>
- Shekhar, C., Khosya, R., Thakur, K., Mahajan, D., Kumar, R., Kumar, S., & Sharma, A. K. (2024). A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term human health impacts. *Toxicology Reports*, 13, 101840. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.TOXREP.2024.101840>
- Singh, S., Singh, R., Singh, K., Katoch, K., Zaeen, A. A., Birhan, D. A., Singh, A., Sandhu, H. S., Singh, H., & Sahrma, L. K. (2024). Smart fertilizer technologies: An environmental impact assessment for sustainable agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100504. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100504>

- Song, Y., Ma, L., Duan, Q., Xie, H., Dong, X., Zhang, H., & Yu, L. (2024). Development of Slow-Release Fertilizers with Function of Water Retention Using Eco-Friendly Starch Hydrogels. *Molecules*, 29(20), 4835. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/molecules29204835>
- Sparks, T. C., & Nauen, R. (2015). IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 121, 122–128. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.PESTBP.2014.11.014>
- Sparks, T. C., Storer, N., Porter, A., Slater, R., & Nauen, R. (2021). Insecticide resistance management and industry: the origins and evolution of the Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) and the mode of action classification scheme. In *Pest Management Science* (Vol. 77, Issue 6, pp. 2609–2619). John Wiley and Sons Ltd. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/ps.6254>
- Sultan, M., Waheed, S., Ali, U., Sweetman, A. J., Jones, K. C., & Malik, R. N. (2019). Insight into occurrence, profile and spatial distribution of organochlorine pesticides in soils of solid waste dumping sites of Pakistan: Influence of soil properties and implications for environmental fate. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 195–204. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.020>
- Sumreen, H. N. (2024). Global Meta-Analysis of Nitrate Leaching Vulnerability in Synthetic and Organic Fertilizers over the Past Four Decades. *Water*, 16(3), 457. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/W16030457>
- Sunkara, M. (2023). Agrochemicals: An Overview of their Types and Impact on Agriculture. *Journal of Agricultural Science and Food Research*, 1000151. Obtenido de <https://doi.org/10.35248/2469-9837.23.14.151>
- Tison, L., Beaumelle, L., Monceau, K., & Thiéry, D. (2024). Transfer and bioaccumulation of pesticides in terrestrial arthropods and food webs: State of knowledge and perspectives for research. *Chemosphere*, 357, 142036. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.142036>
- Torabian, S., Goyer, A., Qin, R., Jones, K., Flagg, C., Phillips, R., & Spear, R. (2025). Effect of potassium fertilizer, genetic makeup, and environment on the potato tuber nutrition. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101645. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2025.101645>

- Uddin, Md. K. (2018). Agrochemicals and environmental risks. *Environmental Policy and Law*, 48(2), 91–96. Obtenido de <https://doi.org/10.3233/EPL-180055>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *Illegal trade in pesticides: A growing threat to health and the environment*. Nairobi: UNEP. Obtenido de <https://www.unep.org/resources/report/illegal-trade-pesticides-growing-threat-health-and-environment>
- Vargas, T. Y., & Coto, C. W. I. (2016). Alimentos con sabor a agroquímicos. contaminación agrotóxica de alimentos y sus efectos en la salud de la población costarricense, 1950-2015. In *Foro de Medio ambiente: Naturaleza, biodiversidad y sustentabilidad*. (10/10/2025).
- Vásquez-Venegas, C. E., León-Cortés, S. G., González-Baltazar, R., & Preciado-Serrano, M. de L. (2016). Exposición laboral a plaguicidas y efectos en la salud de trabajadores florícolas de Ecuador. *SALUCJALISCO*, 3, 150–158.
- Villavicencio, G. E. E., Trejo, T. L. I., Herrera, L. B., López, L. Á. M., & Ostoa, G. A. (2019). *Nutrición mineral con nitrógeno, fósforo y potasio en la producción del barril azul en invernadero* (10, Trans.). Obtenido de <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V0I23.2030>
- Warra, A. A., & Vara, P. M. N. (2020). African perspective of chemical usage in agriculture and horticulture—their impact on human health and environment. In P. M. N. Vara (Ed.), *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation: Pesticides and Chemical Fertilizers* (pp. 401–436). Elsevier. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00016-7>
- Wendell, A.-K., Guse, B., Bieger, K., Wagner, P. D., Kiesel, J., Ulrich, U., & Fohrer, N. (2024). A spatio-temporal analysis of environmental fate and transport processes of pesticides and their transformation products in agricultural landscapes dominated by subsurface drainage with SWAT+. *Science of The Total Environment*, 945, 173629. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.173629>
- Wimalawansa, S. A., & Wimalawansa, S. J. (2014). Agrochemical-Related Environmental Pollution: Effects on Human Health. *Global Institute for Research & Education (GIFRE)*, 3(3), 72–83. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/284805057>

- Wongta, A., Sawang, N., Tongjai, P., Jatiket, M., & Hongsibsong, S. (2022). The Assessment of Organophosphate Pesticide Exposure among School Children in Four Regions of Thailand: Analysis of Dialkyl Phosphate Metabolites in Students' Urine and Organophosphate Pesticide Residues in Vegetables for School Lunch. *Toxics*, *10*(8), 434. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/TOXICS10080434>
- Yaseen, A. A., Ahmed, S. J., & Bakr, T. D. (2024). Effect of biofertilizers in improving production of hot pepper (*Capsicum annuum* L.), and tolerating drought stress. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*, *36*(6), 104–117. Obtenido de <https://doi.org/10.21271/ZJPAS.36.6.12>
- Ye, H. M., Li, H. F., Wang, C. S., Yang, J., Huang, G., Meng, X., & Zhou, Q. (2020). Degradable polyester/urea inclusion complex applied as a facile and environment-friendly strategy for slow-release fertilizer: Performance and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, *381*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122704>
- Yu, L., Liu, H., Yu, M., Zhang, Q., Chou, J., & Wu, Y. (2023). Particle Size Effect of Cyetpyrafen Formulation in the Pesticide Transmission Process and Its Impact on Biological Activity. *Molecules*, *28*(21), 7432. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28217432/S1>
- Zapata-Narváez, Y. A., & Botina-Azain, L. B. (2023). Effect of adjuvants, fungicides and insecticides on the growth of *Trichoderma koningiopsis* Th003 Efecto de coadyuvantes, fungicidas e insecticidas sobre el crecimiento de *Trichoderma koningiopsis* Th003. *Mexican Journal of Phytopathology*, *41*(3), 412–433. Obtenido de <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2305-1>
- Zhang, B., Lv, F., & Yang, J. (2024). Pesticides Toxicity, Removal and Detoxification in Plants: A Review. *Agronomy*, *14*(6), 1260. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14061260>
- Zhumanova, N., Akimbayeva, N., Myrzakhmetova, N., Dzhiembraev, B., Kuandykova, A., Diyarova, B., Seilkhanov, O., Kishibayev, K., Meldeshov, A., Saparbekova, I., & Yerezhepova, A. (2024). A Comprehensive Review of New Generation Plant Growth Regulators. *ES Food and Agroforestry*, *17*, 1190. Obtenido de <https://doi.org/10.30919/esfaf1190>
- Zubrod, J. P., Bundschuh, M., Arts, G., Brühl, C. A., Imfeld, G., Knäbel, A., Payraudeau, S., Rasmussen, J. J., Rohr, J., Scharmüller, A., Smalling, K., Stehle, S., Schulz, R., &

Schäfer, R. B. (2019). Fungicides: An Overlooked Pesticide Class? *Environmental Science & Technology*, 53(7), 3347–3365. Obtenido de <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B04392>

Zúñiga-Venegas, L. A., Hyland, C., Muñoz-Quezada, M. T., Quirós-Alcalá, L., Butinof, M., Buralli, R., Cardenas, A., Fernandez, R. A., Foerster, C., Gouveia, N., Gutiérrez, J. P., Lucero, B. A., Muñoz, M. P., Ramírez-Santana, M., Smith, A. R., Tirado, N., De Joode, B. van W., Calaf, G. M., Handal, A. J., ... Mora, A. M. (2022). Health Effects of Pesticide Exposure in Latin American and the Caribbean Populations: A Scoping Review. *Environmental Health Perspectives*, 130(9). Obtenido de <https://doi.org/10.1289/EHP9934>