



**Residuos agroquímicos en el sector agrícola colombiano: desafíos y oportunidades para
una gestión eficaz**

Laura Andrea Gordillo Durán

Évelyn Flórez Ocampo

Trabajo de grado de maestría presentado para optar al título de Magíster en Sostenibilidad

Directora

Mariluz Betancur Vélez, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Maestría en Sostenibilidad

Medellín, Antioquia, Colombia

2026

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestra directora, Mariluz Betancur Vélez por su acompañamiento durante el proceso de construcción de este trabajo de grado. Su orientación académica, disposición para resolver dudas y valiosos aportes fueron fundamentales para el desarrollo y fortalecimiento de este documento. Apreciamos profundamente su dedicación, paciencia y compromiso, los cuales contribuyeron de manera significativa a nuestro crecimiento académico y a la culminación satisfactoria de esta investigación.

Agradecimientos de Laura Andrea Gordillo Durán

Agradezco a Dios, por darme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para alcanzar esta meta. A mi esposo, por su amor constante, su paciencia y su acompañamiento en cada paso de este camino. A mi familia, por su amor incondicional, su confianza y su apoyo constante, que han sido la fuerza que me impulsó a seguir adelante y nunca rendirme. A todos ustedes les dedico este logro, como un homenaje a su presencia en mi vida y al papel fundamental que han tenido en la consecución de esta meta, que hoy celebro junto a ustedes.

Agradecimientos de Évelyn Flórez Ocampo

Agradezco a Dios por acompañarme y orientarme en esta etapa de mi vida, por brindarme las herramientas necesarias para culminar de manera satisfactoria mi proceso académico y por concederme salud, prosperidad y claridad para avanzar con firmeza. Agradecimientos especiales a mis padres, por ser el soporte esencial en mi camino profesional. Aprecio y agradezco profundamente su dedicación, sus consejos y el respaldo inquebrantable que me han brindado durante este periodo académico. Gracias por impulsarme a seguir adelante, por creer en mis capacidades y por acompañarme en cada paso de este proceso. Este logro es reflejo de su esfuerzo y de su amor.

Tabla de Contenido

Resumen.....	8
Abstract.....	11
1. Problema.....	14
2. Justificación.....	21
3. Objetivos	24
3.1 Objetivo General	24
3.2 Objetivos Específicos.....	24
4. Marco referencial	25
4.1 Marco conceptual	25
4.2 Marco normativo	30
5. Estado del arte	35
6. Metodología	47
6.1. Fase 1: Revisión bibliográfica - vigilancia tecnológica	48
6.2. Fase 2: Análisis de contenido y procesamiento de la información	49
6.2.1 Análisis temático de la literatura	50
6.2.2 Identificación de vacíos de investigación.....	50
6.3. Fase 3: Propuesta de estrategias para el manejo de envases vacíos de agroquímicos	51
7. Resultados	53
7.1. Revisión bibliográfica - vigilancia tecnológica.....	53
7.1.1 Estrategia de búsqueda y formulación de ecuaciones	53
7.1.2 Fuentes de información y herramientas de análisis	54
7.1.3 Organización y depuración del corpus documental.....	54
7.1.4 Análisis de tendencias temporales de publicación	55
7.1.5 Concentración del impacto académico	57

7.2	Análisis de contenido y extracción de información relevante.....	59
7.2.1.	Procesamiento de información y análisis relacional.....	59
7.2.2.	Identificación de enfoques temáticos predominantes	64
7.2.3	Distribución geográfica de la producción científica.....	67
7.2.4	Análisis comparativo internacional y contexto colombiano.....	73
7.2.5	Líneas de investigación	74
7.2.6	Identificación de vacíos de investigación	76
7.3	Propuesta de estrategias para el manejo de envases vacíos de agroquímicos	87
8.	Conclusiones	103
9.	Propiedad Intelectual y Confidencialidad	107
10.	Concepto ético.....	108
11.	Referencias	109

Lista de Tablas

Tabla 1. Publicaciones con mayor impacto académico según número de citasiones	58
Tabla 2. Enfoques predominantes en la literatura sobre residuos agroquímicos: fuentes, acciones, estrategias y aportes para la gestión.....	66
Tabla 3. Distribución geográfica de los estudios analizados según región, tipo de residuos agroquímicos, matrices evaluadas, acciones de gestión y fuentes bibliográficas.	70
Tabla 4. Algunos vacíos de investigación y líneas estratégicas para la gestión integral de residuos agroquímicos	84
Tabla 5. Hoja de ruta estratégica para la gestión integral de envases vacíos de agroquímicos en Colombia.....	97

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Variación temporal del uso global de plaguicidas, 2010-2023. Fuente FAOSTAT	18
Ilustración 2. Distribución porcentual del uso mundial de plaguicidas por continente. Fuente FAOSTAT.....	19
Ilustración 3. Distribución temporal de la producción científica sobre residuos de agroquímicos	57
Ilustración 4. Análisis de co-ocurrencia de palabras clave en publicaciones sobre residuos agroquímicos.....	61
Ilustración 5. Diagrama de corresponsabilidad y estrategias para la gestión integral de envases vacíos de agroquímicos.....	89

Resumen

En Colombia, la agricultura constituye un componente fundamental del sistema económico, desempeñando un papel esencial en la generación de valor agregado para la economía nacional, el desarrollo rural y las cadenas agroindustriales asociadas. Su contribución se refleja no solo en la producción de alimentos y materias primas, sino también en la dinamización del empleo, la reducción de brechas territoriales y el fortalecimiento de la seguridad alimentaria. El agro colombiano sustenta a millones de familias en zonas rurales, impulsa la seguridad alimentaria y se posiciona como una pieza clave en los esfuerzos por alcanzar un crecimiento sostenible e inclusivo.

El sostenimiento de la productividad agrícola es fundamental para garantizar el aporte económico y social del sector, ha estado históricamente asociado al uso intensivo de agroquímicos en la mayoría de los sistemas productivos del país. No obstante, en los últimos años se evidencia un proceso de transición hacia alternativas más sostenibles, impulsado por entidades como el ICA, el Ministerio de Agricultura y organizaciones de cooperación internacional que promueven el desarrollo y adopción de bioinsumos. A pesar de estos avances, los agroquímicos continúan siendo predominantes, especialmente en cultivos de alta demanda fitosanitaria, lo que mantiene vigente la preocupación por los impactos derivados del manejo inadecuado de sus residuos. Sustancias como plaguicidas, herbicidas e insecticidas contienen compuestos persistentes y potencialmente tóxicos que, bajo prácticas deficientes de disposición, pueden afectar suelos, cuerpos de agua, materiales agrícolas y, en general, la integridad ambiental de los territorios rurales.

Aunque existe un marco regulatorio que aborda la gestión de plaguicidas y sus residuos, la gestión de residuos agroquímicos en Colombia continúa enfrentando deficiencias significativas, especialmente en zonas rurales. Entre las normas relevantes se encuentran la Ley 99 de 1993, que

establece los principios ambientales generales; la Ley 822 de 2003 sobre el registro, control y venta de agroquímicos, con el ICA como entidad responsable de su evaluación técnica y ambiental; y la Resolución 1675 de 2013, que regula los planes de gestión de devolución de productos posconsumo, incluidos envases y empaques de plaguicidas. Además, instrumentos recientes como la Resolución 00295 de 2025 han fortalecido el reconocimiento formal de los bioinsumos en la política pública de insumos agropecuarios, promoviendo su producción y uso como alternativas sostenibles. También existe un protocolo técnico y normativo para bioinsumos y controladores biológicos publicado por la ANLA en coordinación con el ICA y AGROSAVIA, que orienta la introducción y manejo ambiental de estos productos. Sin embargo, la implementación y cumplimiento de las disposiciones regulatorias enfrentan limitaciones prácticas en el ámbito rural, donde los pequeños productores carecen de acceso a servicios técnicos especializados y de conocimiento suficiente sobre prácticas de manejo responsable. Estas barreras dificultan la adopción de procesos adecuados para la recolección, tratamiento y disposición final de residuos agroquímicos, perpetuando conductas que ponen en riesgo tanto el ambiente como la salud de las comunidades locales.

Este trabajo de grado tuvo como propósito identificar los desafíos y oportunidades que existen en la gestión de residuos agroquímicos en el sector agrícola colombiano. Para ello, se desarrolló una revisión de literatura orientada a reconocer las principales tendencias, problemáticas y estrategias documentadas tanto a nivel nacional como internacional. El análisis de los estudios revisados permitió identificar vacíos persistentes en materia de infraestructura, articulación institucional, regulación, capacitación y cultura ambiental, así como oportunidades emergentes relacionadas con la adopción de buenas prácticas, el fortalecimiento de los sistemas posconsumo la mejora de los esquemas de recolección y tratamiento y la promoción de alternativas productivas

más sostenibles como los bioinsumos. Estos aspectos representan oportunidades clave para el desarrollo de nuevas líneas de investigación y para el diseño de estrategias más integrales e innovadoras en el contexto colombiano.

Como resultado, se presenta una propuesta estratégica para la gestión integral de los residuos agroquímicos en Colombia, estructurada en ejes orientados al fortalecimiento de la gobernanza y la responsabilidad de los actores involucrados, la optimización de la logística y los mecanismos económicos, la integración de herramientas digitales, la participación comunitaria con enfoque sociocultural y el impulso a la transición hacia bioinsumos y prácticas agroecológicas. Este trabajo se articula con el marco normativo vigente con mecanismos operativos y líneas de investigación prioritarias, y se presenta como un instrumento orientador para el diseño de políticas públicas, la toma de decisiones territoriales y el avance hacia un modelo agrícola más sostenible.

Palabras clave: *Agroquímicos, Residuos peligrosos, COP - Contaminantes orgánicos persistentes, Bioacumulación, Disposición final.*

Abstract

In Colombia, agriculture is a fundamental component of the economic system, playing an essential role in generating added value for the national economy, rural development, and associated agro-industrial chains. Its contribution is reflected not only in the production of food and raw materials, but also in job creation, the reduction of territorial disparities, and the strengthening of food security. The Colombian agricultural sector supports millions of rural families, drives food security, and positions itself as a key pillar in efforts to achieve sustainable and inclusive growth.

Maintaining agricultural productivity is essential to ensure the economic and social contribution of the sector and has historically been associated with the intensive use of agrochemicals in most productive systems across the country. However, in recent years a transition toward more sustainable alternatives has emerged, driven by institutions such as the Colombian Agricultural Institute (ICA), the Ministry of Agriculture, and international cooperation organizations that promote the development and adoption of bio-inputs. Despite these advances, agrochemicals remain predominant, particularly in crops with high phytosanitary requirements, sustaining concerns about the impacts derived from inadequate management of their residues. Substances such as pesticides, herbicides, and insecticides contain persistent and potentially toxic compounds that, under deficient disposal practices, may affect soils, water bodies, agricultural materials, and the overall environmental integrity of rural territories.

Although a regulatory framework addressing pesticide management and related waste exists, agrochemical waste management in Colombia continues to face significant deficiencies, particularly in rural areas. Relevant regulations include Law 99 of 1993, which establishes general

environmental principles; Law 822 of 2003 on the registration, control, and commercialization of agrochemicals, assigning the ICA responsibility for their technical and environmental evaluation; and Resolution 1675 of 2013, which regulates post-consumer take-back management plans, including pesticide containers and packaging. In addition, recent instruments such as Resolution 00295 of 2025 have strengthened the formal recognition of bio-inputs within agricultural input public policy, promoting their production and use as sustainable alternatives. There is also a technical and regulatory protocol for bio-inputs and biological control agents published by the National Environmental Licensing Authority (ANLA) in coordination with ICA and AGROSAVIA, which guides the environmental introduction and management of these products. Nevertheless, the implementation and enforcement of regulatory provisions face practical limitations in rural contexts, where small-scale producers often lack access to specialized technical services and sufficient knowledge of responsible management practices. These barriers hinder the adoption of appropriate processes for the collection, treatment, and final disposal of agrochemical waste, perpetuating practices that pose risks to both the environment and the health of local communities.

The objective of this thesis was to identify the challenges and opportunities associated with agrochemical waste management in the Colombian agricultural sector. To this end, a literature review was conducted to identify the main trends, issues, and strategies documented at both national and international levels. The analysis of the reviewed studies revealed persistent gaps related to infrastructure, institutional coordination, regulation, training, and environmental culture, as well as emerging opportunities linked to the adoption of good practices, the strengthening of post-consumer systems, improvements in collection and treatment schemes, and the promotion of more sustainable productive alternatives such as bio-inputs. These aspects represent key

opportunities for the development of new research lines and for the design of more comprehensive and innovative strategies in the Colombian context.

As a result, a strategic proposal for the integrated management of agrochemical waste in Colombia is presented, structured around axes aimed at strengthening governance and the accountability of involved stakeholders, optimizing logistics and economic mechanisms, integrating digital tools, fostering community participation with a sociocultural approach, and promoting the transition toward bio-inputs and agroecological practices. This proposal articulates the current regulatory framework with operational mechanisms and priority research lines and is presented as a guiding instrument for public policy design, territorial decision-making, and progress toward a more sustainable agricultural model.

Key words: *Agrochemicals, Hazardous waste, POPs - Persistent Organic Pollutants, Bioaccumulation, Final disposal.*

1. Problema

A nivel mundial, el sector agrícola lidera el consumo de plaguicidas. Estos productos químicos se han vuelto indispensables para proteger los cultivos contra plagas, enfermedades y malezas que amenazan la producción agrícola (FAO, 2025). Sin embargo, existe una paradoja preocupante: aunque su función es controlar organismos específicos, apenas el 0,1 % del ingrediente activo llega realmente al objetivo deseado. El resto termina dispersándose en el ambiente, afectando especies que no son el blanco del control y alterando procesos ecológicos esenciales (Kumar & Maanju, 2022). Esta baja efectividad y alta dispersión ha colocado a los plaguicidas en el centro del debate sobre sostenibilidad agrícola y gestión del riesgo químico (Lykogianni et al., 2021).

De acuerdo con los datos globales reportados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en 2023, a nivel mundial, se usaron cerca de 3,73 millones de toneladas de ingredientes activos en agricultura. Si bien esta cifra es un poco menor que la de 2022, la tendencia sigue siendo ascendente: el uso global se ha duplicado desde 1990 y ha crecido de forma considerable en la última década (FAO, 2025).

Colombia no es ajena a esta realidad. La agricultura aporta el 9,7% al Producto Interno Bruto (PIB) nacional (Ministerio de Agricultura, 2024) y representa el sustento de miles de familias rurales. Para mantener esos niveles de producción, el sector depende intensamente de agroquímicos (Alfonso & Toro, 2010). Pero ese incremento en la productividad tiene un costo: más uso de químicos significa más residuos peligrosos, especialmente envases contaminados.

El manejo de estos envases vacíos se ha convertido en un problema ambiental y sanitario de escala global. Por eso, organismos como FAO y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio

Ambiente (PNUMA) han desarrollado lineamientos para su gestión segura. La FAO, a través del Código internacional de conducta para la gestión de plaguicidas, elaborado con la Organización Mundial De La Salud (OMS), ofrece un marco que cubre todo el ciclo de vida de estos productos: desde la fabricación hasta la disposición final de envases y residuos. El objetivo es aprovechar los beneficios de los plaguicidas sin comprometer la salud humana ni el ambiente (FAO, 2021).

Por su parte, el PNUMA ha emitido directrices técnicas para el manejo de desechos peligrosos derivados de plaguicidas, incluyendo contaminantes orgánicos persistentes. Estas guías abordan desde el envasado y etiquetado hasta el transporte, uso y eliminación segura, con especial atención a la prevención de riesgos laborales (PNUMA, 2023).

La mayoría de los residuos agrícolas se clasifican como peligrosos debido al uso intensivo de agroquímicos, lo que genera grandes cantidades de envases contaminados que ponen en riesgo tanto al ambiente como a las comunidades rurales (Gallego & Portilla, 2020). Estos compuestos no solo son tóxicos: muchos presentan otras características de la clasificación CRETIB(E), como corrosividad, reactividad, explosividad o inflamabilidad. Esta combinación de propiedades hace que su manejo sea particularmente complejo y requiera protocolos especializados (FAO, 2021).

Estremadoyro (2021) señala que una gestión inadecuada de los envases de plaguicidas puede generar procesos de contaminación del suelo, el agua y el aire, particularmente en contextos donde no existen sistemas adecuados de recolección, tratamiento y disposición final. Estos procesos pueden tener efectos directos sobre la salud humana y los ecosistemas, al afectar organismos esenciales para el mantenimiento de la calidad y funcionalidad del suelo. Asimismo, la liberación y persistencia de sustancias tóxicas, junto con su potencial de bioacumulación a lo largo de la cadena alimentaria, contribuyen a generar desequilibrios ecológicos. Diversos estudios han

demostrado que los organismos acuáticos tienden a acumular estos compuestos o sus residuos en sus tejidos grasos. Este proceso puede darse de forma activa, mediante la ingesta de alimentos contaminados, o de manera pasiva, a través de la absorción por la piel y las branquias (Estremadoyro, 2021).

Cabe mencionar que, el recurso hídrico es el segundo recurso más afectado por el mal manejo de residuos agroquímicos. Además, la OMS calcula que cerca de 900.000 personas mueren cada año por intoxicaciones relacionadas con la disposición inadecuada de estos residuos (Gallego & Portilla, 2020).

Aunque en algunos países las prácticas han mejorado, en muchas zonas rurales todavía se recurre a métodos como la quema a cielo abierto, la incineración sin control o el enterramiento inadecuado. Estas prácticas pueden liberar contaminantes atmosféricos como dioxinas y furanos, degradar la fertilidad del suelo y contaminar fuentes de agua superficiales y subterráneas. Incluso con programas de recolección posconsumo, la falta de infraestructura y apoyo técnico sigue favoreciendo la disposición informal (Muñoz-Bautista et al., 2025).

Aunque la regulación colombiana sobre residuos peligrosos, establecida en el Decreto 1076 de 2015, Título VI, que compila el régimen del Decreto 4741 de 2005, define obligaciones claras para los generadores de residuos peligrosos, su aplicación presenta limitaciones estructurales en el contexto del sector agrícola. En particular, la normativa no contempla de manera suficiente las condiciones operativas, territoriales y socioeconómicas de los pequeños productores rurales, quienes enfrentan barreras significativas para acceder a gestores autorizados, infraestructura de recolección y sistemas formales de disposición final. Esta brecha entre el marco normativo y las condiciones reales del territorio dificulta el cumplimiento regulatorio y contribuye a la persistencia

de prácticas informales de manejo de residuos peligrosos (Gallego & Portilla, 2020). Esta situación impacta de manera desproporcionada a los pequeños productores rurales, quienes enfrentan serias dificultades para cumplir con las obligaciones normativas en materia de residuos peligrosos. Cuando no cuentan con capacidad económica para asumir los costos asociados al transporte, tratamiento y disposición final a través de gestores autorizados ubicados en otros departamentos, los residuos suelen ser manejados mediante prácticas informales, tales como la quema a cielo abierto, el enterramiento inadecuado o el almacenamiento sin control técnico en predios agrícolas, incrementando los riesgos ambientales y sanitarios. A nivel global, estudios recientes muestran que, en ausencia de áreas designadas para la disposición segura, agricultores a menudo recurren a prácticas como enterrar o quemar envases vacíos, lo que puede afectar suelos y cuerpos de agua (Guzmán-Bejarano et al., 2020).

Si bien algunas Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) han implementado acciones puntuales de apoyo para mejorar la gestión de envases vacíos de agroquímicos en Colombia, estas iniciativas presentan cobertura territorial limitada y carácter no permanente. Por ejemplo, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) ha desarrollado jornadas de recolección y campañas de sensibilización dirigidas a productores rurales, promoviendo la correcta disposición de estos residuos peligrosos en articulación con gestores autorizados (CVC, 2022). De manera similar, la Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima) impulsa el programa *Campolimpio*, orientado a la recolección selectiva de envases en algunos municipios del departamento (Cortolima, 2025). No obstante, el alcance de estas experiencias depende en gran medida de la disponibilidad de recursos institucionales y del apoyo local, lo que limita su consolidación como soluciones estructurales a nivel nacional.

En este contexto, resulta fundamental situar la problemática de los residuos agroquímicos dentro de una tendencia global de uso creciente de plaguicidas, que condiciona tanto la generación de residuos peligrosos como los desafíos asociados a su gestión. En la ilustración 1 se presenta la evolución del uso mundial de plaguicidas con fines agrícolas entre 2010 y 2023, a partir de los datos consolidados en la Base de datos estadísticos corporativos de la FAO (FAOSTAT).

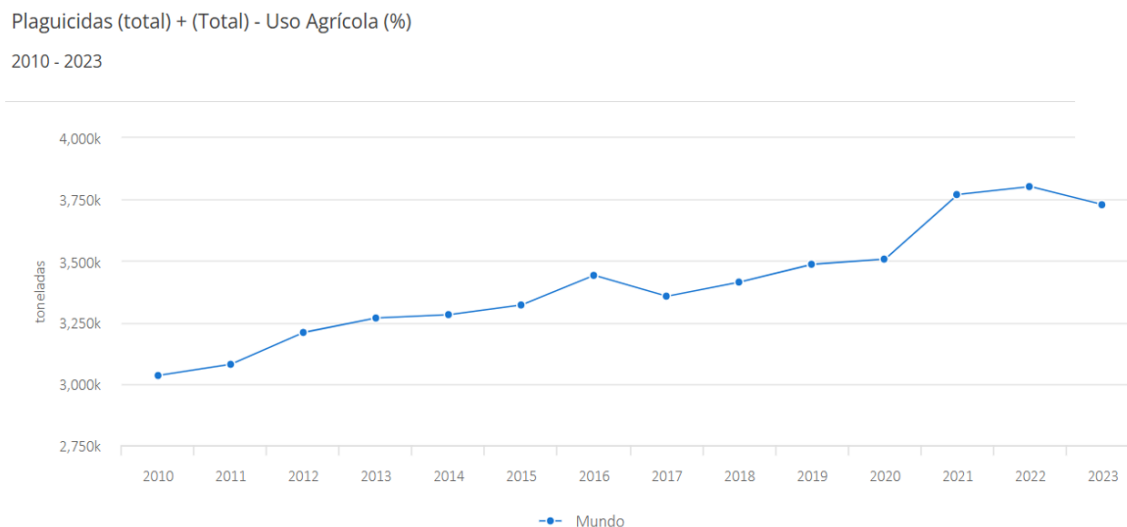


Ilustración 1. Variación temporal del uso global de plaguicidas, 2010-2023. Fuente

FAOSTAT

El comportamiento observado evidencia una tendencia ascendente sostenida en el uso de plaguicidas durante el periodo analizado. En el año 2010, el consumo global apenas superaba los 3 millones de toneladas. No obstante, durante la década siguiente se evidenció una tendencia de crecimiento progresivo, alcanzando aproximadamente 3,75 millones de toneladas en 2023. Este aumento neto superior a las 700 mil toneladas refleja una intensificación significativa de los sistemas agro-productivos, asociada a la expansión de monocultivos, la presión por mayores rendimientos y la persistencia de modelos de manejo fuertemente dependientes de insumos químicos.

Aunque la tendencia general es creciente, se evidencian fluctuaciones. Entre 2016 y 2017, por ejemplo, se presentó una leve reducción, posiblemente por cambios en la demanda agrícola, el clima o ajustes regulatorios en ciertos países. Pero estas caídas no cambian el patrón general: el uso retomó su crecimiento a partir de 2018, alcanzó su máximo en 2022 y tuvo una reducción moderada en 2023. Aun así, el nivel actual sigue siendo mucho mayor que el de inicios de la serie.

La Ilustración 2 muestra la distribución porcentual del uso mundial de plaguicidas por continente evidenciando una marcada concentración en la región de las Américas, que representa el 49,3 % del consumo global. Esta cifra se explica por la presencia de sistemas agrícolas altamente tecnificados en países como Estados Unidos, Brasil y Argentina, donde predominan monocultivos de soya, maíz y caña de azúcar. Colombia, como parte de esta región, comparte muchas de las características de estos modelos productivos intensivos.

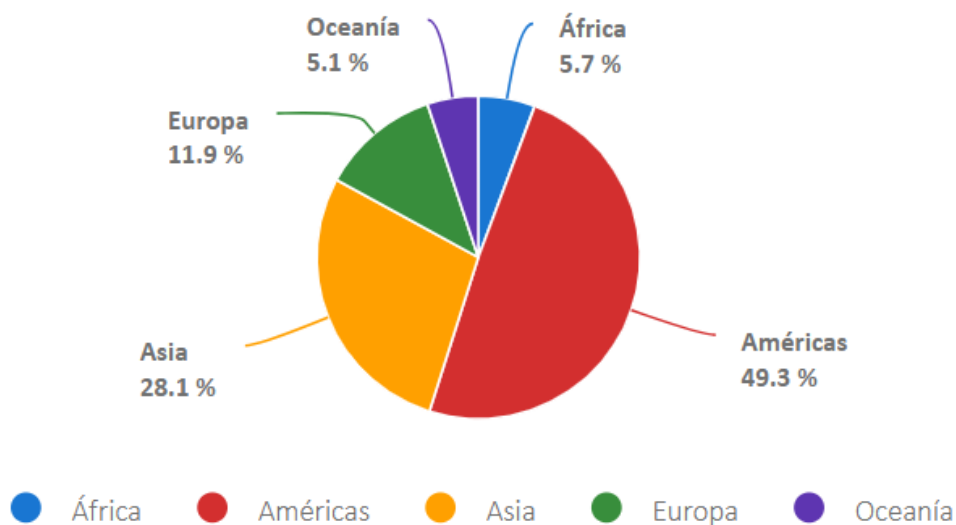


Ilustración 2. Distribución porcentual del uso mundial de plaguicidas por continente. Fuente

FAOSTAT

La región de Asia concentra el 28,1 % del uso global, reflejando tanto la extensión de su

frontera agrícola como la necesidad de sostener altos niveles de productividad para garantizar la seguridad alimentaria de una población creciente. En este contexto, el uso de plaguicidas responde a una combinación de agricultura intensiva, diversidad climática y presión sobre los recursos naturales, mientras que Europa muestra una participación menor (11,9 %), asociada a políticas más estrictas de regulación y manejo de plaguicidas. África y Oceanía presentan las participaciones más bajas, con 5,7 % y 5,1 %, respectivamente, lo que responde tanto a menores niveles de intensificación agrícola como a limitaciones en el acceso a insumos químicos y a diferencias estructurales en los sistemas productivos.

De acuerdo con lo anterior, este estudio de caso, basado en una revisión de literatura aplicada al contexto colombiano, aborda la problemática de los residuos agroquímicos no únicamente como un desafío técnico, sino como un problema complejo de sostenibilidad y gobernanza ambiental. A través de una revisión de literatura, se identificaron brechas entre el marco normativo vigente y su aplicación en el territorio, así como limitaciones institucionales y socioeconómicas. El estudio busca aportar una visión integral que articula los aspectos ambientales, regulatorios, institucionales y socioeconómicos que condicionan el manejo de estos residuos, con el fin de proponer estrategias orientadas a fortalecer una gestión más eficaz y adaptada a las realidades del contexto rural colombiano.

2. Justificación

Mediante una revisión bibliográfica, se identificó y analizó de manera detallada la gestión de los residuos peligrosos provenientes de la industria agrícola en Colombia, con un enfoque específico en los envases de agroquímicos, tales como fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, fungicidas, insecticidas, entre otros.

Además, se buscó comprender los impactos negativos que genera la disposición inadecuada de estos residuos, así como los diversos factores socioeconómicos, culturales y ambientales que contribuyen a la magnitud de esta problemática. Igualmente, se identificaron prácticas adecuadas en la gestión de estos residuos, así como estrategias y herramientas de gestión que permiten abordar este desafío de forma eficaz y sostenible, mejorando la gestión de residuos y reduciendo los riesgos asociados.

Ante la creciente problemática de la contaminación ocasionada por el uso excesivo de agroquímicos en la agricultura, diversos organismos internacionales, han promovido la exploración de alternativas más sostenibles y eco-amigables para el control de plagas, insectos, enfermedades e incluso para mejorar la productividad de los cultivos. Estas alternativas incluyen la implementación de prácticas agrícolas libres de químicos y compuestos tóxicos, las cuales buscan no solo proteger el ambiente y el recurso hídrico, sino también preservar la salud de las comunidades y de los agricultores, mediante la implementación de prácticas de regeneración del suelo y agricultura sostenible.

En este contexto, resulta fundamental el desarrollo de tecnologías agrícolas que además de ser efectivas en el control de plagas y enfermedades, también sean accesibles y económicamente

viables para los pequeños y medianos agricultores, especialmente en zonas rurales donde las comunidades cuentan con recursos económicos limitados.

No obstante, la adopción de estas alternativas se ve restringida por debilidades institucionales, como la falta de una supervisión efectiva y la aplicación rigurosa del régimen sancionatorio, lo que permite que gran cantidad de residuos peligrosos no sean tratados ni dispuestos de forma adecuada, poniendo en riesgo tanto la salud humana como el medio ambiente (Salcedo, 2005).

En este sentido, la coordinación entre las autoridades locales y nacionales se vuelve crucial para fortalecer la gestión de estos residuos, a través de programas de educación ambiental y procesos de capacitación dirigidos a comunidades rurales, enfocados en prácticas seguras para su manejo y disposición final adecuada.

La logística de recolección y transporte de residuos peligrosos es crucial para mejorar esta situación; sin embargo, enfrenta desafíos asociados a la limitada infraestructura disponible, inadecuada coordinación entre los generadores y los prestadores del servicio, y las dificultades de desplazamiento en zonas rurales alejadas. En estos territorios, caracterizados por la dispersión geográfica de los predios agrícolas, las largas distancias hasta los puntos de acopio o instalaciones autorizadas, y las deficiencias en la red vial, el traslado de residuos peligrosos se ve condicionado por mayores costos, tiempos de operación prolongados y riesgos adicionales. En este contexto, se requiere una mayor inversión en infraestructura logística, tecnologías adaptadas a la ruralidad y esquemas de coordinación territorial que garanticen que los residuos peligrosos sean recolectados y transportados de manera segura hasta instalaciones autorizadas para su tratamiento o disposición final (Silva, 2017).

El estudio de la gestión de residuos peligrosos en el sector agrícola colombiano es primordial

para identificar las falencias existentes y proponer soluciones integrales que garanticen una gestión eficiente, sostenible y responsable de estos desechos provenientes del uso de agroquímicos. Cabe mencionar que se requiere un esfuerzo conjunto que articule al gobierno, las comunidades y el sector privado, con el fin de desarrollar estrategias que mitiguen los riesgos asociados a la inadecuada gestión de estos residuos y que, a su vez, promuevan la transición hacia prácticas más sostenibles y responsables en el uso de agroquímicos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Identificar los desafíos y oportunidades en la gestión de residuos agroquímicos en el sector agrícola colombiano, mediante la consolidación de estrategias para su gestión eficaz.

3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información sobre las prácticas existentes en la gestión de residuos de agroquímicos a nivel nacional e internacional, incluyendo enfoques técnicos, normativos y de gestión, así como las estrategias implementadas por los agricultores y su efectividad en términos de sostenibilidad ambiental.
- Analizar los resultados de investigaciones previas, tanto a nivel nacional como internacional, relacionadas con la gestión de residuos de agroquímicos, con el propósito de identificar soluciones, desafíos y vacíos existentes que contribuyan a la mejora del sector agrícola colombiano.
- Formular estrategias para mejorar la gestión de residuos de agroquímicos en zonas rurales, considerando enfoques sostenibles y prácticas exitosas implementadas en otros contextos.

4. Marco referencial

4.1 Marco conceptual

De acuerdo con la legislación colombiana, los residuos peligrosos comprenden no sólo los envases de agroquímicos, como fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, fungicidas, insecticidas, entre otros, sino también cualquier material o elemento que haya estado en contacto con estos productos. Esto incluye ropa de protección, equipos de aplicación, subproductos derivados de su fabricación y otros elementos contaminados, los cuales representan un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

El Código Internacional de Conducta para la Distribución y Utilización de Plaguicidas, establecido por la FAO, sirve como guía para autoridades reguladoras, el sector privado, comunidades y otras partes interesadas sobre el manejo adecuado de plaguicidas durante todo su ciclo de vida. Este código define un plaguicida como toda sustancia o mezcla utilizada para eliminar, prevenir o controlar plagas, incluyendo vectores que transmiten enfermedades a humanos o animales. Esta definición abarca sustancias destinadas a regular el crecimiento vegetal, así como desecantes, defoliantes y otros productos de uso agrícola (FAO, 2021).

La OMS define "agroquímico" como cualquier sustancia utilizada para mejorar el rendimiento de los cultivos, previniendo o erradicando plagas que afectan la calidad de estos (Pacheco & Barbona, 2017). Según el Decreto 1443 de 2004, los plaguicidas son sustancias o mezclas destinadas a prevenir, destruir o controlar plagas y especies no deseadas que afectan la producción agrícola y la comercialización de alimentos y madera. Además, incluyen reguladores del crecimiento vegetal, así como defoliantes y desecantes utilizados para el manejo de cultivos y agentes aplicados para su protección durante el almacenamiento y transporte.

Los agroquímicos se pueden categorizar de acuerdo con los siguientes criterios:

- Según el tipo de organismos que combaten: Insecticidas (controlan insectos), acaricidas (controlan ácaros), fungicidas (controlan hongos), herbicidas (controlan plantas o hierbas malas), y rodenticidas (controlan roedores).
- Según su composición química: Organoclorados, organofosforados, carbamatos, piretroides y otros (insecticidas); dinitrofenoles, triazinas, ácidos tricloroacéticos y otros (herbicidas), y compuestos de cobre y/o azufre, fenoles y otros (fungicidas).
- Según su forma de actuar sobre los organismos objetivo: de contacto, repelentes, de ingestión, defoliantes y fumigantes.
- Según su estado físico: sólidos (incluyen polvos, gránulos y otras formulaciones), líquidos (comprenden emulsiones, suspensiones y soluciones) y gaseosos.

En la agricultura actual, los agroquímicos juegan un papel fundamental. Estos productos químicos protegen a las plantas de elementos dañinos y les dan los nutrientes que necesitan para un desarrollo óptimo (Shen, 2023). Gracias a los agroquímicos, los agricultores pueden trabajar de manera más eficiente y obtener mejores resultados en sus cosechas. Estos productos químicos ayudan a mantener los cultivos sanos y protegidos, lo que se traduce en un mayor rendimiento y calidad de los alimentos. Al prevenir la disminución de cosechas ocasionada por plagas y enfermedades, los agroquímicos juegan un papel crucial en la consolidación de un suministro alimentario seguro y abundante, lo que a su vez previene la escasez de alimentos y la desnutrición (Salamanca, 2020).

Sin embargo, la utilización de agroquímicos en la agricultura conlleva la producción de residuos peligrosos. El uso desmedido de fertilizantes, ya sean de origen natural o químico, puede

generar un exceso de nutrientes con posibles efectos perjudiciales en los recursos naturales y la salud, dado que los nitratos se disuelven fácilmente y pueden contaminar rápidamente las aguas. En consecuencia, es fundamental gestionar de manera adecuada estos residuos para evitar problemas ambientales y sociales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Los insecticidas, especialmente los organofosforados, son los pesticidas más comunes en la agricultura. Estos productos pueden permanecer en el ambiente hasta un año, dependiendo de las condiciones. Debido a su baja solubilidad, tienden a acumularse en el suelo. En el agua, su persistencia puede superar los dos meses, lo que representa un riesgo tóxico significativo para la vida acuática (Shen, 2023).

Los agroquímicos, como fertilizantes, pesticidas, herbicidas y estiércol animal, contienen nutrientes químicos y sustancias tóxicas que con frecuencia son las principales fuentes de contaminación en la agricultura (Campoverde et al., 2022).

En Colombia, la gestión de residuos de agroquímicos se lleva a cabo principalmente mediante planes posconsumo diseñados por los productores. Estos planes incluyen sistemas de recolección a través de centros de acopio y puntos fijos, centrados en el manejo de envases generados por el uso de agroquímicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). Según Guzmán-Bejarano et al. (2020), aunque la agricultura es un sector clave en Colombia, persisten brechas significativas en la gestión adecuada de los residuos de envases de agroquímicos.

Dentro de la gestión de residuos de agroquímicos, la logística inversa se ocupa de la cadena de suministro para el traslado de envases desde el usuario o consumidor hacia el fabricante o los puntos de recolección, para su reutilización, reciclaje o, en su caso, eliminación (Campoverde et

al., 2022).

La logística inversa puede generar diversas ventajas, como estrechar la relación entre distribuidores y clientes, mejorar la reputación de la empresa al reducir su impacto en el medio ambiente, disminuir los costos de embalaje industrial a través de una gestión eficiente, y minimizar el impacto ambiental (Montes & Rodríguez, 2021).

La devolución de envases vacíos de plaguicidas, gestionada a través de la logística inversa, es una práctica que beneficia al medio ambiente, principalmente mediante el reciclaje cuando es viable, y a través de la incineración para aquellos residuos que pertenecen al canal de distribución abierta (Marques et al. 2017).

Como se ha mencionado anteriormente, en el marco de estos esfuerzos, uno de los mecanismos importantes para el manejo de residuos de agroquímicos en Colombia es el programa Campo Limpio, una iniciativa que promueve la gestión adecuada de los envases de agroquímicos utilizados en la agricultura. Este programa, busca reducir los problemas ambientales y de salud pública causados por la disposición inadecuada de estos envases, mediante el uso de la técnica del "triple lavado". Este proceso consiste en limpiar de manera adecuada los envases vacíos de agroquímicos para su posterior reciclaje o disposición, minimizando así la contaminación. A través de este proceso, los envases pueden ser gestionados por empresas autorizadas que los transforman en productos reciclados, como piezas de madera plástica, contribuyendo a la economía circular y promoviendo un manejo más sostenible de los residuos (Campolimpo, sf).

Por otro lado, los Compuestos Orgánicos Persistentes (COP), definidos en la Ley 1196 de 2008 que aprueba el Convenio de Estocolmo, son sustancias químicas que poseen características

particulares que los hacen altamente peligrosos. Estos compuestos son tóxicos, lo que significa que pueden causar daño a la salud humana y al medio ambiente, incluso en pequeñas cantidades. Además, son persistentes, lo que implica que tardan mucho tiempo en degradarse en el ambiente, acumulándose y representando un riesgo a largo plazo. Otra característica clave es su capacidad de bioacumulación, es decir, pueden acumularse en los tejidos grasos de los organismos vivos y aumentar su concentración a medida que se transfieren a través de la cadena alimentaria, alcanzando niveles peligrosos en los organismos superiores, incluidos los humanos. Finalmente, los COP tienen la capacidad de transportarse a larga distancia, a través del aire, el agua o las especies migratorias, lo que significa que pueden dispersarse y contaminar áreas geográficas alejadas de su punto de origen (Castro & Castillo, 2024).

En relación con esto, en el ámbito de la gestión de residuos peligrosos, los COP representan una preocupación particular debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación. Estas sustancias químicas, como los bifenilos policlorados (PCB), los pesticidas organoclorados (DDT) y las dioxinas, pueden tener efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente, incluso en bajas concentraciones (Castro & Castillo, 2024).

Los bioinsumos son productos de origen biológico utilizados en la agricultura con el objetivo de mejorar la productividad, la salud de las plantas y la calidad del suelo, reduciendo la dependencia de insumos químicos sintéticos. Estos pueden incluir biofertilizantes, biopesticidas, inoculantes microbianos, biostimulantes y otros compuestos naturales derivados de microorganismos, extractos vegetales u otros agentes biológicos. Los bioinsumos promueven procesos ecológicos que favorecen la absorción de nutrientes, la resistencia al estrés abiótico y biótico, y la conservación de la biodiversidad del agroecosistema, lo que los sitúa como

alternativas clave para la sostenibilidad de los sistemas productivos (Da Silva et al., 2025).

4.2 Marco normativo

Ante la creciente preocupación por los efectos que los residuos peligrosos tienen sobre la salud humana y el medio ambiente, en el año 1991 Colombia expide el Decreto 1843, con el propósito de reglamentar parcialmente varios títulos de la Ley 09 de 1979 (también conocida como el Código Sanitario Nacional), específicamente aquellos relacionados con el control de los riesgos derivados del uso y manejo de estas sustancias.

Posteriormente, en el año 2005, el Gobierno Nacional estableció la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos, mediante la expedición del Decreto 4741.

En este sentido, con el fin de tener un mejor control sobre la generación de residuos peligrosos, en el año 2007 Colombia implementó un registro nacional a través de la Resolución 1362, exigiendo a todos los generadores inscribirse y presentar informes anuales al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Al mismo tiempo, en ese mismo año, se desarrollaron protocolos de laboratorio para caracterizar los residuos peligrosos, sentando las bases para una gestión más eficiente. Desde ese año hasta 2009, se pusieron en marcha los primeros planes de posconsumo para abordar el manejo de residuos como medicamentos, baterías y plaguicidas.

En 2010, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) emitió la Resolución 1167, cuyo propósito principal fue definir los requisitos para el registro y control de personas naturales y jurídicas dedicadas a la comercialización, distribución y almacenamiento de insumos agropecuarios y/o semillas para siembra, ya sea mediante establecimientos comerciales físicos o electrónicos. Esta resolución tiene como objetivo regular y supervisar a los participantes en la

cadena de suministro de estos productos esenciales para el sector agropecuario, garantizando su calidad, seguridad y uso adecuado.

Con el objetivo de prevenir y controlar la contaminación ambiental, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible emitió la Resolución 1675 de 2013, la cual regula la gestión de los residuos posconsumo de plaguicidas. Esta Resolución estableció los elementos que deben incluir los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Plaguicidas para garantizar su adecuada recolección, tratamiento y disposición final.

El Decreto 1076 de 2015, compiló la normatividad ambiental hasta ese año. Este es conocido como el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y regula a través del título VI, específicamente la gestión de residuos peligrosos, con el objetivo de promover su manejo adecuado y la reducción de los riesgos asociados a su generación y disposición. Este decreto incluye tres anexos clave: el Anexo I, que clasifica los residuos peligrosos según procesos o actividades (Y1 a Y45), abarcando desde tratamientos médicos hasta actividades mineras; el Anexo II, que lista las corrientes específicas del Convenio de Basilea, con 60 categorías detalladas para identificar y gestionar adecuadamente estos materiales y el Anexo III, características de peligrosidad que incluyen: explosividad, inflamabilidad, toxicidad aguda, toxicidad crónica, ecotoxicidad, corrosividad, reactividad, infecciosidad y radiactividad.

Adicionalmente, se considera residuo tóxico aquel que, al realizarle una prueba de lixiviación para característica de toxicidad contiene una o más de las siguientes sustancias: Arsénico, Bario, Benceno, Cadmio, Tetracloruro de Carbono, Clordano, Clorobenceno, Cloroformo, Cromo, o-Cresol, m-Cresol, p-Cresol, Cresol, 2,4-D, 1,4-Diclorobenceno, 1,2 Dicloroetano, 1,1-Dicloroetileno, 2,4-Dinitrorolueno, Heptacloro, Hexaclorobenceno, Hexaclorobenceno,

Hexaclorobutadieno, Hexacloroetano, Lindano, Mercurio, Metoxiclor, metil etil cetona, Nitrobenzeno, Pentaclorofenol, Piridina, Plata, tetracloroetileno, Toxafeno, Tricloroetileno, 2,4,5-Triclorofenol, 2,4,6-Triclorofenol, 2,4,5-TP y Cloruro de vinilo. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

La implementación efectiva del Decreto 1076 de 2015 busca minimizar riesgos ambientales mediante acciones de prevención en la fuente, reducción en cantidad y peligrosidad y el fortalecimiento de los sistemas de registro y control ante las autoridades ambientales competentes.

En el año 2018 se expide el Decreto 2501, el cual complementa al Decreto 1843 de 1991, al asegurar la vigencia del reglamento técnico que regula el uso de plaguicidas en Colombia. Ambos decretos tienen como base la Ley 09 de 1979, la cual establece lineamientos generales en materia de salud pública.

La Resolución 1580 de 2022 regula y controla las actividades relacionadas con la fabricación, formulación, envasado, distribución, importación y exportación de plaguicidas químicos de uso agrícola en Colombia, estableciendo los requisitos y procedimientos que deben cumplir las personas naturales o jurídicas para obtener el registro correspondiente ante el ICA. Esta normativa garantiza la calidad, seguridad y manejo adecuado de estos productos a lo largo de toda la cadena productiva y comercial.

En este contexto, la política de gestión de Residuos Peligrosos (RESPEL) fue actualizada con la expedición de la Resolución 063 de 2024 por parte del IDEAM, la cual derogó la Resolución 0062 de 2007 y adoptó métodos de muestreo y ensayo más robustos para determinar las características de peligrosidad de los residuos. Esta actualización fortalece los criterios técnicos

para la clasificación de los RESPEL, incorpora estándares internacionales y mejora los procesos de identificación, manejo y control de residuos que representan riesgos significativos para los ecosistemas y las comunidades.

En resumen, la Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos (RESPEL) en Colombia ha evolucionado de manera progresiva, incorporando enfoques preventivos, instrumentos de control y principios de sostenibilidad. Desde su inicio en 2005, se han implementado estrategias para minimizar riesgos a la salud humana y al ambiente. En 2022, se actualizó esta política con un plan de acción hasta 2030, que incluye líneas estratégicas como la eliminación de equipos contaminados con PCB y la implementación de sistemas de trazabilidad nacional para los RESPEL. No obstante, persisten desafíos asociados a la implementación efectiva de estas disposiciones, lo que ha motivado el fortalecimiento de estrategias orientadas a la trazabilidad, la internalización de costos ambientales, la participación de los actores involucrados y la transición hacia esquemas de economía circular que prioricen el aprovechamiento sobre la disposición final.

En este proceso de evolución de la política ambiental en Colombia, los instrumentos de información y control adquieren un papel fundamental para materializar los lineamientos estratégicos definidos a nivel normativo. Particularmente, la declaración y el registro de los residuos peligrosos mediante el Registro Único Ambiental (RUA) se consolidan como mecanismos clave para garantizar la trazabilidad, el seguimiento y la toma de decisiones informadas en torno a la gestión de los RESPEL.

La declaración de residuos peligrosos (RESPEL) en Colombia presentó una actualización normativa relevante con la expedición de la Resolución 0839 de 2023, la cual marca un cambio

importante en la modernización de los instrumentos de reporte ambiental al establecer el RUA como el sistema unificado para la declaración de información ambiental. Esta resolución define los lineamientos para el diligenciamiento del RUA como instrumento oficial para el reporte estandarizado de los datos asociados a la generación, manejo y disposición de RESPEL, fortaleciendo la trazabilidad, el control y la capacidad de seguimiento por parte de las autoridades ambientales. Esta actualización responde a la necesidad de mejorar el reporte, la administración y las salidas de información, adoptando como línea base la evolución de herramienta informáticas existentes hacia una plataforma única del RUA, utilizable por los distintos sectores productivos, para el reporte de información relacionada con las emisiones y transferencias de contaminantes, entre otros registros de carácter ambiental.

5. Estado del arte

La creciente demanda de alimentos y la constante necesidad de optimizar la producción agrícola ha impulsado un cambio significativo en las prácticas productivas, por lo que se ha pasado de métodos naturales a la adopción de tecnologías y el uso de productos químicos y tóxicos como insecticidas, plaguicidas, fertilizantes, entre otros. En el siglo XX comenzó esta transición, la cual permitió una producción agroalimentaria a gran escala; el uso de fertilizantes se destacó como uno de los avances más importantes, ya que las plantas mostraron una respuesta notablemente positiva a los estímulos químicos. Sin embargo, a medida que aumentaba el uso de fertilizantes y otros productos químicos para mejorar la producción, también comenzaron a aparecer nuevos problemas, como el crecimiento de malas hierbas, lo cual llevó a la necesidad de crear e implementar herbicidas (Cuayla, 2021).

Como resultado, ha crecido de manera progresiva la generación de residuos derivados de la actividad agrícola, los cuales se caracterizan por su elevada peligrosidad. El embalaje de los agroquímicos, elaborado en su mayoría en polietileno de alta densidad (PEAD), tiende a retener compuestos tóxicos provenientes de los productos formulados, lo que convierte estos materiales en residuos peligrosos (Michemberg & Miguens, 2017). Esta condición representa un riesgo relevante para la salud pública y la integridad de los ecosistemas, especialmente cuando los residuos son gestionados de manera inadecuada.

No obstante, Michemberg y Miguens (2017), señalan que estos embalajes pueden ser aprovechados en la producción de materiales destinados a usos que no impliquen contacto directo con personas ni con componentes ambientales sensibles. Asimismo, los autores indican que, mediante la aplicación de tratamientos adecuados, es posible remover los residuos de

agroquímicos retenidos en el PEAD, reduciendo así su nivel de peligrosidad y ampliando sus posibilidades de aprovechamiento.

Un estudio realizado por Marques et al. (2017), indica que en la región de Alta Paulista, en São Paulo, Brasil, donde la agricultura es una actividad importante y se utilizan gran cantidad de sustancias agrícolas químicas, con 178 productores rurales, de los cuales se tomó una muestra de 36, reveló que la mayoría de los productores (53,1%) queman los envases de plaguicidas, el 9,4% los guarda para devolverlos o tirarlos en el monte, y solo el 37,5% tiene la intención de devolver los envases vacíos al establecimiento donde los compró. Esta investigación evidencia una problemática relevante en la gestión de los residuos de envases de plaguicidas en la región, debido a que la quema y el abandono de estos envases representan un riesgo significativo.

La gestión de residuos agroquímicos ha sido abordada a nivel internacional, desde enfoques que trascienden la dimensión meramente técnica, incorporando variables sociales y psicológicas que condicionan la conducta de los agricultores. Yan et al. (2022) analizaron el comportamiento de reciclaje de envases de plaguicidas en agricultores frutícolas en China bajo el marco de la Theory of Planned Behavior (TPB). Los autores evidencian que la decisión de participar en programas de reciclaje está influenciada principalmente por la actitud hacia la práctica (percepción de utilidad y beneficios ambientales), la norma subjetiva (presión o aprobación social) y el control percibido sobre la conducta. Aunque este último no afecta directamente la intención de reciclar, sí repercute de forma significativa en la ejecución real de la conducta, mostrando que los agricultores que perciben mayor capacidad o facilidad para realizar el reciclaje tienden a involucrarse más activamente. Estas conclusiones resaltan que el manejo de envases de pesticidas no depende únicamente de la existencia de infraestructura o regulaciones, sino de elementos culturales,

cognitivos y sociales que modelan el comportamiento de los productores.

Investigaciones centradas en la economía circular han establecido que el tratamiento de residuos agroquímicos puede convertirse en una oportunidad para la valorización de materiales y el fortalecimiento de cadenas productivas sostenibles. Raza et al. (2022), en un estudio aplicado al caso de Pakistán, evalúan la relación entre la gestión de envases de plaguicidas y el desarrollo de prácticas circulares que involucran reciclaje, aprovechamiento y reincorporación de materiales en procesos industriales. El análisis muestra que los sistemas de gestión funcionan de manera más efectiva cuando combinan tres elementos: programas coordinados de recolección, infraestructura logística operativa y articulación con actores locales (agricultores, centros de acopio y empresas recicladoras). A diferencia de enfoques restrictivos centrados únicamente en la eliminación del residuo, el estudio propone integrar estrategias de circularidad que reduzcan los impactos ambientales y generen beneficios económicos derivados de materiales recuperados, especialmente plásticos de alta densidad provenientes de envases de agroquímicos.

De acuerdo con el estudio realizado por Marnasidis (2018), cuyo objetivo principal fue recopilar información para diseñar un programa efectivo de manejo de envases vacíos de agroquímicos generados en la agricultura en Grecia, se evaluó la cantidad de estos residuos producidos en cultivos de frutas y verduras. Para ello, se recopilaron datos de diversas fuentes, incluyendo agrónomos, tiendas de suministros agrícolas, empresas del sector y entrevistas directas con agricultores. Con esta información, se estimó la cantidad de envases vacíos generados por hectárea y por agricultor al año, proporcionando una valiosa perspectiva sobre el estado y la dinámica de los ecosistemas agrícolas.

Los resultados del estudio indicaron que, en promedio, se generaban 18,7 envases vacíos por

hectárea en cultivos de vegetales, 18,8 en patatas, 21,4 en tomates y pimientos, y 35,3 en pepinos y cohombros. Esta elevada producción de residuos se explica por la alta sensibilidad de estos cultivos a hongos e insectos, lo que requiere un uso intensivo de agroquímicos.

La disponibilidad de datos sobre la presencia y concentración de sustancias químicas agrícolas en matrices ambientales como el suelo y el agua en América Latina es limitada y presenta una distribución espacial heterogénea. Esta carencia de información, combinada con la amplitud geográfica de la región y la diversidad de sus sistemas agrícolas, constituye una barrera significativa para la caracterización y cuantificación precisa de los riesgos ambientales asociados (Casallanovo et al., 2021).

En el contexto latinoamericano, la formulación de políticas y decisiones regulatorias sobre agroquímicos se sustenta, en la mayoría de los casos, en la clasificación por peligrosidad intrínseca de las sustancias, sin incorporar de manera sistemática evaluaciones cuantitativas de riesgo que consideren la probabilidad y magnitud de la exposición (Casallanovo et al., 2021). Esta aproximación limita la capacidad de establecer medidas de gestión diferenciadas y ajustadas a escenarios específicos.

Otro aporte relevante al debate sobre la gestión de residuos agroquímicos es proporcionado por *Reverse logistics of empty pesticide containers: solution or a problem* (Braga et al., 2021), el cual examina el sistema de logística inversa para envases vacíos de plaguicidas bajo el esquema Campo Limpo en Brasil. El estudio identifica los factores que habilitan y también los que obstaculizan una recolección eficiente de envases vacíos (Empty Pesticide Containers, EPCs). Entre los obstáculos más significativos destacan: la baja concienciación de pequeños y medianos productores, dificultades de acceso a centros de recolección, costos de transporte y la falta de

transparencia en los datos del sistema. Los autores advierten que, aunque la logística inversa representa una solución potencial para mitigar los impactos ambientales de los residuos de agroquímicos, su eficacia depende en gran medida de la participación activa de los productores y de un sistema institucional robusto que facilite la recogida y garantice condiciones accesibles de retorno.

La problemática asociada a la generación y manejo de residuos agroquímicos no solo es evidente a nivel global, sino que también refleja una realidad particular en el contexto colombiano. La producción intensiva y el uso extendido de productos químicos en la agricultura han incrementado la cantidad de residuos peligrosos, cuyos efectos nocivos sobre la salud y el ambiente requieren atención urgente (Braga et al., 2021). En este sentido, la gestión de estos residuos peligrosos provenientes de la industria agrícola se presenta como un desafío crítico en Colombia, dada la necesidad de minimizar su impacto negativo en los ecosistemas y las comunidades rurales.

Aunque los agroquímicos son esenciales para mantener la productividad agrícola, su manejo inadecuado puede comprometer recursos naturales vitales, como el agua y el suelo. Por lo tanto, resulta fundamental identificar tanto los avances como las dificultades en la gestión de estos residuos, al tiempo que se promueve una transición hacia alternativas más sostenibles y menos contaminantes, orientadas a la reducción de riesgos para la población y los ecosistemas.

En Colombia los residuos peligrosos están sujetos al plan de gestión de devolución de productos posconsumo, el cual permite definir las responsabilidades y obligaciones de los generadores de estos residuos. Por esta razón existen programas de difusión, educación y sensibilización de los procedimientos para la correcta devolución de los envases vacíos de plaguicidas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2022). También, es importante

denotar que el usuario final de la cadena de consumo de agroquímicos tiene una responsabilidad para la correcta manipulación y devolución de estos envases; este usuario debe realizar de manera obligatoria el triple lavado, separación y clasificación para la entrega apropiada, así mismo el transportador tiene la obligación de cumplir la normativa establecida en su camino hasta el centro de acopio para que sea aprovechado como insumo o dispuesto con carácter definitivo y de forma adecuada. Sin embargo, aún falta incentivar el cumplimiento de las normas e implementar más alternativas para el aprovechamiento de los envases de plaguicidas, debido a que este sigue siendo bajo en comparación con otros países que llevan el mismo tiempo de implementación.

Múltiples autores han encontrado prácticas inadecuadas en la gestión de residuos de agroquímicos en Colombia, particularmente, se resalta la disposición en los suelos o áreas cultivadas, ya sea de forma superficial o mediante enterramiento, lo que provoca la alteración de propiedades del suelo como la densidad aparente, afectando la disponibilidad de nutrientes para ser absorbidos por las plantas y la capacidad de retención de agua. Dichos cambios afectan la dinámica del movimiento de nutrientes y alteran la presencia, diversidad y actividad microbiana del suelo. Además, el plástico no se biodegrada, sino que se fragmenta en macroplásticos y microplásticos, lo cual puede deteriorar la estructura del suelo, reduciendo la estabilidad de los agregados. Estas alteraciones tienen impactos negativos no solo a nivel físico, sino también químico y biológico, comprometiendo la sostenibilidad y funcionalidad del suelo (Guzmán-Bejarano et al., 2020).

En Colombia, el uso de plaguicidas es una práctica común en la agricultura para el control de plagas. En la región cafetera, investigaciones sobre la calidad del agua han detectado residuos de plaguicidas organoclorados y organofosforados en los ríos que irrigan los cultivos (Londoño et al.,

2018). Además, existe evidencia sólida que establece un vínculo entre la exposición a plaguicidas y alteraciones en la glándula tiroides, tanto en humanos como en animales. Diversos estudios han mostrado que ciertos insecticidas, herbicidas y fungicidas pueden actuar como disruptores endocrinos, afectando específicamente el funcionamiento tiroideo (Londoño et al., 2018).

A partir de esta evidencia, diversas investigaciones han destacado la necesidad de implementar políticas y prácticas efectivas para la gestión de residuos de agroquímicos, con el fin de mitigar sus efectos negativos y promover un entorno más seguro tanto para el medio ambiente como para la población.

Siendo un país en desarrollo con una economía basada en gran medida en la agricultura y un sector comercial informal, Colombia se enfrenta a desafíos significativos en la gestión de residuos peligrosos, debido a la limitada capacidad técnica y recursos humanos para manejar estos desechos de manera adecuada (López Vargas et al., 2025). La problemática de los residuos peligrosos no cuenta con una solución integral, ya que se enfoca únicamente en las etapas finales de su gestión, dejando al campesino como último eslabón de una cadena que genera impactos negativos en el medio ambiente.

La gestión inadecuada de los residuos peligrosos es un problema generalizado, y las comunidades con menos recursos económicos son las más expuestas a sus riesgos, debido a la falta de acceso a servicios básicos y a información sobre cómo protegerse. Se ha evidenciado que un alto porcentaje de las comunidades han adoptado prácticas inadecuadas para la gestión de estos residuos, como lo es la quema a cielo abierto de envases de agroquímicos; además la mayoría de estos envases se encuentran conformados por polímeros orgánicos, que generan gases tóxicos al ser incinerados, por lo que se evidencia la necesidad de plantear alternativas que ofrezcan una

manera adecuada para su gestión (Ariza & Díaz, 2021). Para lograr comunidades informadas y participativas que puedan influir en la creación de políticas públicas efectivas, es fundamental garantizar el acceso a la información y fomentar la comunicación entre los diferentes actores sociales (Lozada, 2011).

Londoño (2018) realizó un estudio exhaustivo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP) en Colombia a partir de la revisión de 41 publicaciones, incluyendo artículos científicos y trabajos de grado. El autor destaca que la mayoría de estas investigaciones se enfocan en plaguicidas organoclorados, debido a su uso extendido en el sector agrícola del país. Londoño señala que Colombia ha logrado avances significativos impulsados por la normativa vigente. Sin embargo, es necesario implementar estrategias efectivas para su manejo, ya que estos compuestos son resistentes a la degradación natural y pueden causar impactos negativos tanto en la salud humana como en el equilibrio de los ecosistemas. En el contexto de la investigación, este autor destaca que las universidades son las principales fuentes de conocimiento sobre los COP en el país. Estas instituciones desempeñan un papel crucial en la generación de información y avances científicos relacionados con estos contaminantes (Londoño, 2018).

Con relación a las iniciativas para el tratamiento de los residuos peligrosos, se encuentran las actividades de aprovechamiento, un ejemplo de ello se encuentra en Antioquia, quien ha sido pionera en la transformación de residuos agroindustriales en recursos productivos, a través de una alianza entre Campo Limpio, CORNARE, el Ministerio de Ambiente y la Gobernación de Antioquia, se ha implementado un proceso de aprovechamiento de envases de agroquímicos. Estos envases, mediante un tratamiento fisicoquímico, se convierten en ecotutores, estructuras plásticas que favorecen el crecimiento de las plantas y aumentan los rendimientos agrícolas. Esta iniciativa

multifacética aborda de manera integral problemáticas como la salud pública, la degradación ambiental y la deforestación, promoviendo la economía circular y la conservación de los ecosistemas (Moreno, 2020).

De acuerdo con Ortega Riascos & Castaño Gaviria (2023) y Campoverde et al., (2022), la adopción de programas de logística inversa y modelos de responsabilidad extendida del productor se consideran una solución potencialmente efectiva. Sin embargo, su éxito está condicionado a un conocimiento más profundo de las realidades locales y a la participación activa de todos los actores implicados.

Silva (2017), analiza un modelo de logística inversa para la gestión de envases vacíos de plaguicidas en el departamento de Boyacá, evidenciando que el sistema de recolección existente operaba de manera rudimentaria, sin el uso de herramientas tecnológicas ni modelos cuantitativos que permitieran evaluar su eficiencia y desempeño. El autor identifica deficiencias críticas en el proceso, entre ellas una divulgación insuficiente del programa de recolección, que no alcanzaba a más del 50 % de la población involucrada y una baja participación de los productores, ya que en la fase de recolección menos del 20 % de las fincas entregaban los envases debidamente clasificados.

Con el fin de superar estas limitaciones, el estudio propone un modelo matemático basado en Programación Lineal, orientado a optimizar la red de logística inversa. El modelo define como variables de decisión, la cantidad de envases recolectados por punto de generación, la asignación de rutas de transporte, la localización de centros de acopio y los flujos de envases hacia los puntos de tratamiento o disposición final. La función objetivo se enfoca en la minimización de los costos totales del sistema, considerando costos de transporte, recolección y operación de los centros de

acopio, bajo restricciones asociadas a la capacidad de almacenamiento, cobertura geográfica, demanda de recolección y cumplimiento de criterios ambientales y operativos. Los resultados del modelo permitieron identificar configuraciones óptimas de la red logística, evidenciando mejoras significativas en la eficiencia del sistema, tanto en términos de reducción de costos como en el aumento de la cobertura y la tasa de recuperación de envases. De esta manera, el estudio demuestra que la aplicación de herramientas de optimización matemática constituye un soporte técnico clave para la toma de decisiones en la gestión integral de envases vacíos de plaguicidas, superando los enfoques meramente descriptivos o basados únicamente en la recolección de información (Silva, 2017).

De acuerdo con Jaller (2019), resulta fundamental incorporar iniciativas de educación ambiental orientadas a la gestión responsable de los agroquímicos, considerando que este tipo de residuos están siendo reutilizados en labores domésticas, lo que incrementa de manera significativa los niveles de exposición y riesgo para las comunidades. Asimismo, el autor destaca la importancia de realizar un mapeo exhaustivo de los lugares donde estas sustancias son utilizadas, almacenadas, comercializadas o dispuestas, incluyendo las áreas destinadas a su aplicación, con el fin de identificar los riesgos asociados a su manejo y a las condiciones del entorno en las que se desarrollan estas prácticas (Jaller, 2019).

Guerra (2020), identificó una solución que se adapta a diferentes escalas de producción y condiciones climáticas, se presenta la tecnología de las biocamas, como estructuras diseñadas para capturar y neutralizar los derrames accidentales de plaguicidas y otros residuos líquidos provenientes de la agricultura, estas unidades actúan como barreras de contención, reteniendo los líquidos contaminados y promoviendo su degradación biológica, estas funcionan como reactores

naturales donde microorganismos especializados descomponen los plaguicidas.

En los últimos años, la gestión de agroquímicos y la transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles han sido abordadas por diversas entidades nacionales e internacionales, con énfasis en la regulación del uso de plaguicidas, la promoción de bioinsumos y el fortalecimiento de capacidades técnicas en productores rurales (IICA, 2022; MADR, 2023).

El ICA cumple un rol clave en la regulación, control y vigilancia de insumos agrícolas, incluyendo plaguicidas y bioinsumos. Sus avances se reflejan en la actualización de los requisitos de registro y en la promoción del manejo integrado de plagas (MIP) como estrategia para reducir riesgos ambientales y sanitarios (ICA, 2024). No obstante, la evidencia institucional indica que estas acciones se concentran principalmente en las etapas de uso y comercialización, sin abordar de forma integral la gestión de los residuos peligrosos generados, en particular los envases vacíos contaminados.

Por su parte, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) ha incorporado la sostenibilidad ambiental como eje transversal de la política sectorial, impulsando la reducción de la dependencia de agroquímicos y el fomento de bioinsumos, especialmente en el marco de la agricultura familiar (MADR, 2023). Sin embargo, estudios recientes señalan que la implementación de estas políticas enfrenta limitaciones en zonas rurales dispersas, donde persisten brechas de infraestructura, asistencia técnica y acceso a sistemas formales de gestión de residuos (FAO, 2022).

A nivel internacional, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) promueve enfoques como la bioeconomía y la agricultura sostenible para disminuir los impactos

ambientales del uso intensivo de plaguicidas en América Latina y el Caribe (IICA, 2022). Pese a estos avances, la literatura evidencia una débil articulación entre las políticas de sostenibilidad productiva y los esquemas de gestión posconsumo de residuos agroquímicos.

En conjunto, los avances institucionales reflejan un cambio progresivo hacia prácticas agrícolas más sostenibles; sin embargo, persiste una fragmentación entre la regulación de insumos, la promoción de alternativas sostenibles y la gestión de los residuos peligrosos derivados del uso de agroquímicos, lo que justifica la pertinencia de la presente investigación.

6. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se empleó una metodología basada en revisión bibliográfica sistemática, con el propósito de analizar las principales aproximaciones teóricas, resultados empíricos y avances tecnológicos relacionados con la gestión de residuos agroquímicos en el sector agrícola. Este enfoque permitió integrar información proveniente de fuentes científicas nacionales e internacionales, con el fin de construir un estado del conocimiento sólido, actualizado y fundamentado, que contribuya a la identificación de desafíos, oportunidades y vías de mejora en el contexto colombiano (Gómez, Galeano y Jaramillo, 2015). La revisión se orientó a reconocer los patrones de producción académica, enfoques metodológicos predominantes, vacíos presentes en la literatura y tendencias emergentes vinculadas con la sostenibilidad y la circularidad en el manejo de residuos agroquímicos.

En coherencia con los objetivos del estudio, se aplicó una estrategia de revisión de literatura que permitió explorar, identificar, seleccionar y sistematizar fuentes científicas relevantes. Para ello, se recopilaron documentos que abordan el uso de agroquímicos en actividades agrícolas, los impactos ambientales derivados de los residuos de sustancias químicas agrícolas, así como los mecanismos de gestión, tratamiento y disposición aplicados internacionalmente. Esta fase permitió asegurar la trazabilidad de la información, fortalecer la robustez analítica y garantizar la validez de los hallazgos obtenidos.

Posteriormente, se realizó una depuración inicial de la producción científica recopilada, priorizando documentos publicados en los últimos 15 años, con el fin de incorporar avances recientes en investigación, innovación técnica y políticas públicas asociadas al manejo de residuos agroquímicos. La selección final consideró únicamente fuentes verificables y con respaldo académico, como artículos indexados, informes institucionales y literatura especializada. A partir

de estas fuentes documentales seleccionadas, se ejecutó un análisis sistemático de la información que permitió sintetizar resultados y generar una interpretación crítica alineada con los objetivos centrales de la investigación.

6.1. Fase 1: Revisión bibliográfica - vigilancia tecnológica

En esta fase se desarrolló un proceso de revisión bibliográfica sistemática y vigilancia tecnológica orientado a la identificación, caracterización y análisis preliminar de la producción científica relacionada con la gestión de residuos de agroquímicos y envases vacíos de insumos químicos agrícolas. Para ello, se definieron ecuaciones de búsqueda específicas, las cuales fueron aplicadas en bases de datos científicas como Scopus y Google Scholar, con el fin de identificar tendencias bibliográficas globales asociadas a residuos agroquímicos, gestión de envases posconsumo, economía circular y políticas ambientales aplicadas al sector agrícola.

La recopilación de la información se realizó mediante la herramienta Publish or Perish, que permitió obtener indicadores cuantitativos tales como número de publicaciones, citas, autores, relevancia temática y año de publicación. Inicialmente, la búsqueda se efectuó en Google Scholar con el propósito de obtener un panorama amplio de la literatura disponible, y posteriormente se replicó en Scopus, lo que permitió contrastar los resultados y fortalecer la inclusión de documentos con altos estándares de calidad científica.

Como resultado de esta fase, se consolidó una base de datos bibliográfica que permitió identificar los períodos de mayor producción académica y las tendencias de publicación a lo largo del tiempo.

Para la selección de los documentos incluidos en el análisis se establecieron los siguientes

criterios:

- **Relevancia temática:** se priorizaron estudios que abordaran de forma directa la problemática de los residuos agroquímicos, incluyendo impactos ambientales, gestión técnica y normativa e implicaciones socioeconómicas en sectores agrícolas.
- **Vigencia temporal:** se consideraron preferentemente publicaciones realizadas en los últimos 15 años, con el objetivo de incorporar hallazgos recientes y enfoques acordes con la evolución de las dinámicas agro-productivas y los avances tecnológicos.
- **Países de referencia:** se dio especial atención a investigaciones desarrolladas en contextos con similitudes estructurales frente a Colombia, cuya experiencia resulta relevante para la extrapolación de buenas prácticas y políticas públicas.
- **Tipo de documento:** la revisión incluyó artículos científicos indexados, informes técnicos de organismos multilaterales (FAO, PNUMA) y tesis de posgrado con aportes empíricos y metodológicos pertinentes al campo de estudio.

6.2. Fase 2: Análisis de contenido y procesamiento de la información

En esta fase se desarrolló un análisis cualitativo y cuantitativo de los documentos seleccionados durante la revisión bibliográfica aplicada en la Fase 1, con el objetivo de sistematizar la información, identificar enfoques predominantes, patrones temáticos y vacíos de investigación, así como establecer comparaciones entre experiencias internacionales y la situación colombiana en materia de gestión de residuos agroquímicos.

Para el procesamiento de la información, los archivos exportados desde Publish or Perish

fueron analizados mediante la herramienta VOSviewer, lo que permitió generar mapas de co-ocurrencia de palabras clave, redes de coautoría y patrones de citación. Estas visualizaciones facilitaron la identificación de las temáticas predominantes, los autores con mayor relevancia en el área y los nodos estratégicos de investigación, así como las interrelaciones entre ellos, evidenciando tanto líneas de investigación consolidadas como áreas emergentes.

6.2.1 Análisis temático de la literatura

A partir de los patrones identificados, el contenido de los documentos fue organizado en cuatro ejes analíticos principales:

- Ambiental: persistencia de residuos agroquímicos y efectos sobre el suelo, el agua, el aire y la biodiversidad.
- Regulatorio: marcos normativos, límites máximos de residuos, esquemas de fiscalización y programas de posconsumo.
- Tecnológico: técnicas de detección, tratamiento, reciclaje, valorización y aplicaciones de economía circular en la gestión de envases.
- Socioeconómico: percepciones de los agricultores, costos de implementación, condiciones laborales y efectos en la salud pública.

Esta categorización permitió identificar convergencias y divergencias entre los contextos internacionales analizados y la realidad colombiana, proporcionando una base sólida para el análisis comparativo y la construcción de recomendaciones estratégicas.

6.2.2 Identificación de vacíos de investigación

El análisis de contenido permitió identificar vacíos relevantes en la literatura, particularmente en aspectos relacionados con la trazabilidad de envases vacíos, la integración de plataformas

digitales en los sistemas de monitoreo, la participación comunitaria en la gestión posconsumo y la evaluación de la efectividad de los sistemas de logística inversa en contextos rurales. Estos vacíos constituyen insumos clave para la formulación de las estrategias planteadas en la Fase 3.

6.3. Fase 3: Propuesta de estrategias para el manejo de envases vacíos de agroquímicos

Con base en los resultados de la revisión bibliográfica sistemática y el análisis comparativo internacional desarrollados en las fases anteriores, se formularon estrategias orientadas a fortalecer la gestión de los residuos agroquímicos en Colombia, particularmente en lo relacionado con los envases posconsumo. Para ello, los hallazgos del análisis bibliométrico, la codificación temática y la caracterización comparativa por país fueron organizados y sintetizados mediante tablas analíticas, que permitieron relacionar los tipos de residuos abordados, las matrices ambientales y productivas analizadas, las acciones de gestión implementadas y los enfoques predominantes identificados en la literatura.

A partir de esta lectura comparativa, se identificaron los principales vacíos y desafíos del contexto colombiano, especialmente en materia de regulación, cobertura y eficiencia de los sistemas de gestión posconsumo, operación de la logística inversa de envases vacíos, educación ambiental, articulación institucional y participación comunitaria. Estos vacíos constituyeron el punto de partida para la formulación de estrategias de gestión que integran enfoques de economía circular, gobernanza ambiental, apropiación social del conocimiento y fortalecimiento de capacidades locales.

Las estrategias propuestas reconocen la importancia del cambio de comportamientos y de la corresponsabilidad entre los distintos actores de la cadena productiva, incluyendo productores, comercializadores, gestores autorizados, autoridades ambientales y comunidades rurales.

Asimismo, se analizan buenas prácticas internacionales asociadas a la responsabilidad extendida del productor, los sistemas de devolución y recolección de envases, los incentivos para la participación en la logística inversa y los mecanismos de trazabilidad y control, adaptándolas a las condiciones socioeconómicas, territoriales y culturales del sector agrícola colombiano.

De este modo, la Fase 3 traduce los hallazgos teóricos y comparativos de la revisión bibliográfica en propuestas estratégicas contextualizadas, orientadas a promover una transición progresiva hacia esquemas de manejo de envases vacíos de agroquímicos más sostenibles, eficientes y socialmente apropiados, alineados con los principios de la sostenibilidad y la gestión integral de residuos peligrosos en el país.

7. Resultados

7.1. Revisión bibliográfica - vigilancia tecnológica

La Fase 1 tuvo como propósito realizar una vigilancia tecnológica y científica sistemática, orientada a identificar, caracterizar y analizar las tendencias globales de investigación relacionadas con la gestión de residuos agroquímicos, con especial énfasis en los envases posconsumo, los impactos ambientales y los enfoques de sostenibilidad aplicados al sector agrícola. Esta fase permitió construir un panorama general del estado del conocimiento, identificar los principales países, autores y líneas de investigación, y establecer una base para el posterior análisis de contenido desarrollado en la Fase 2.

Desde un enfoque metodológico, la vigilancia tecnológica se concibió como una herramienta estratégica para reconocer patrones de producción científica, evolución temporal de las publicaciones y distribución geográfica del conocimiento, facilitando la identificación de referentes internacionales y la detección preliminar de brechas de investigación relevantes para el contexto colombiano.

7.1.1 Estrategia de búsqueda y formulación de ecuaciones

En el marco de la Fase 1, se estableció un conjunto de ecuaciones de búsqueda diseñadas específicamente para la recuperación sistemática de literatura científica relevante en bases de datos especializadas. La estrategia metodológica contempló la combinación de descriptores y términos clave, integrados mediante operadores booleanos (AND, OR, NOT), así como sinónimos y vocabulario controlado relacionado con el objeto de estudio, con el propósito de maximizar la pertinencia y exhaustividad de los resultados.

La ecuación aplicada fue la siguiente:

("Agrochemical waste" OR "pesticide residue") AND ("management" OR "disposal") AND ("Colombia" OR "agricultural sector").

Esta formulación permitió identificar estudios enfocados tanto en la problemática de los residuos derivados del uso de agroquímicos, sus procesos de manejo, regulación y disposición final, así como investigaciones desarrolladas en Colombia y en contextos internacionales con características productivas y regulatorias comparables.

7.1.2 Fuentes de información y herramientas de análisis

La ecuación de búsqueda se aplicó inicialmente en Google Scholar, dada su amplia cobertura multidisciplinar y la inclusión de diversos tipos de documentos académicos, como artículos científicos, informes técnicos, tesis de posgrado y documentos institucionales. Posteriormente, el mismo procedimiento se replicó en la base de datos Scopus, con el fin de contrastar resultados y asegurar la inclusión de literatura indexada con altos estándares de calidad científica y editorial.

Para la recopilación, organización y análisis preliminar de los resultados se utilizó la herramienta Publish or Perish, la cual permitió extraer indicadores bibliométricos clave, tales como número de publicaciones, citas, autores, años de publicación y fuentes. Durante este proceso se realizaron ajustes iterativos en los parámetros de búsqueda, incluyendo palabras clave, operadores booleanos y el periodo temporal de análisis, delimitado entre los años 2010 y 2025, con el objetivo de focalizar la revisión en literatura reciente y relevante para la evolución del campo de estudio.

7.1.3 Organización y depuración del corpus documental

El conjunto inicial de registros fue sometido a un proceso de depuración orientado a eliminar

duplicados, documentos irrelevantes y publicaciones que no guardaban una relación directa con el objeto de investigación. Este proceso permitió consolidar un corpus documental coherente, adecuado para el análisis de tendencias bibliométricas y la posterior profundización temática.

Como resultado de esta fase preliminar se obtuvo un total de 452 registros, los cuales constituyeron la base inicial para el análisis posterior.

7.1.4 Análisis de tendencias temporales de publicación

El análisis de la distribución temporal de las publicaciones evidenció una evolución progresiva en la producción científica relacionada con los residuos agroquímicos y su gestión. Durante los primeros años del periodo analizado (2010–2013), el número de publicaciones fue relativamente bajo, lo que refleja una fase inicial de exploración conceptual y una menor visibilidad del problema en la agenda científica global. En este periodo, las investigaciones se enfocaron principalmente en aspectos técnicos, tales como la presencia de residuos en matrices ambientales (suelo y agua) y la toxicidad asociada a pesticidas específicos

A medida que avanza la década, se observa un incremento sostenido en la producción académica, coincidente con el fortalecimiento de agendas internacionales orientadas a la sostenibilidad agrícola, la gestión integral de residuos peligrosos y la promoción de modelos de economía circular. En esta etapa, la literatura comienza a incorporar enfoques más integrales, incorporando temas como economía circular, estrategias de tratamiento, planes de posconsumo, análisis de ciclo de vida y gobernanza ambiental.

En los años más recientes del periodo analizado se consolida una tendencia hacia investigaciones multidisciplinarias, que articulan dimensiones ambientales, regulatorias, tecnológicas y socioeconómicas, evidenciando una maduración del campo y una creciente

preocupación por los impactos sistémicos del uso de agroquímicos.

El análisis de la distribución temporal de los documentos que conforman la base de datos (ver Ilustración 3) permitió identificar una tendencia clara de crecimiento en la producción científica relacionada con la gestión de residuos agroquímicos, la sostenibilidad ambiental y las prácticas agrícolas responsables. Aunque el corpus incluye publicaciones correspondientes a años anteriores, los resultados muestran que la mayor concentración de estudios se presenta a partir de 2021, evidenciando un incremento sostenido en el interés académico por esta temática durante el periodo más reciente.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el aumento en la producción científica puede interpretarse como una respuesta académica a los desafíos derivados del uso intensivo de agroquímicos y de sus implicaciones sobre los sistemas socioecológicos. Diversos organismos internacionales han señalado que la gestión inadecuada de residuos agroquímicos constituye un factor crítico en la degradación ambiental, lo que ha impulsado el desarrollo de investigaciones orientadas a la mitigación de impactos y a la promoción de prácticas más sostenibles.

Asimismo, el aumento de publicaciones en los años recientes coincide con el fortalecimiento de marcos globales de política pública, como la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que reconoce la importancia de avanzar hacia modelos de producción y consumo responsables, así como de reducir la liberación de sustancias peligrosas al ambiente. En este contexto, la literatura científica ha comenzado a abordar de manera más sistemática la gestión integral de residuos agroquímicos, integrando enfoques que combinan prevención, manejo adecuado de envases, recuperación de materiales y responsabilidad compartida entre los diferentes actores de la cadena productiva.

Adicionalmente, la concentración temporal de estudios en el periodo más reciente, evidenciada en la Ilustración 3, sugiere una mayor articulación interdisciplinaria, en la que convergen aportes desde las ciencias ambientales, la ingeniería, la agronomía y los estudios de sostenibilidad. Si bien el análisis temporal no permite identificar de forma directa los enfoques metodológicos de cada publicación, la tendencia observada es coherente con lo reportado en la literatura, que señala un tránsito desde estudios predominantemente descriptivos hacia investigaciones orientadas a la gestión, la evaluación de impactos y el diseño de estrategias sostenibles para el manejo de residuos peligrosos en el sector agrícola.

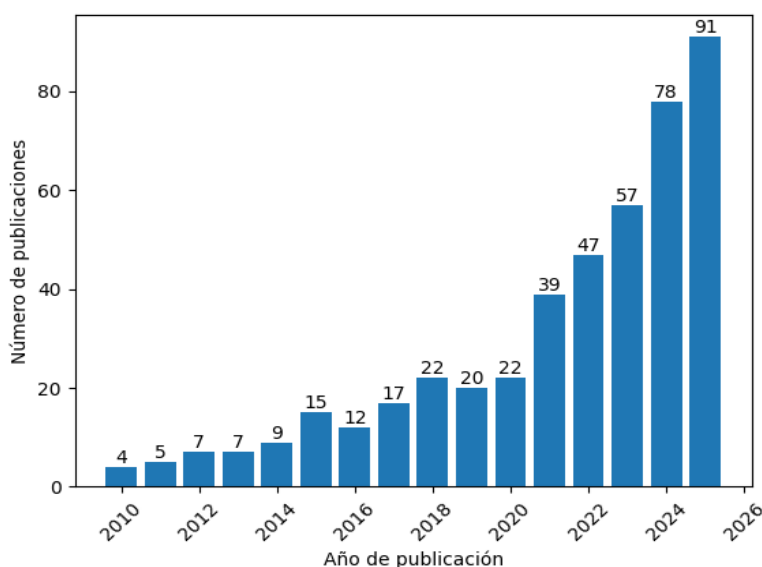


Ilustración 3. Distribución temporal de la producción científica sobre residuos de agroquímicos

7.1.5 Concentración del impacto académico

En este sentido, el análisis del impacto académico de los documentos, medido a través del número de citaciones, permite identificar aquellas contribuciones que han desempeñado un rol estructurante en la evolución del campo. Si bien varias de las publicaciones más citadas

corresponden a años anteriores al periodo de mayor crecimiento identificado, su permanencia como referentes en la literatura reciente indica que han aportado marcos conceptuales, metodológicos y analíticos que siguen siendo ampliamente utilizados. Estos trabajos han orientado la discusión científica en torno a los efectos ambientales y en la salud humana derivados del uso de agroquímicos, así como al desarrollo de estrategias de gestión más sostenibles y alineadas con principios de prevención, mitigación y responsabilidad extendida.

En consecuencia, la lectura conjunta de la distribución temporal y del análisis de citas revela que el crecimiento reciente de la producción científica no se ha dado de manera aislada, sino que se sustenta en un conjunto de aportes fundamentales que han guiado la consolidación del campo de estudio. En este contexto, la Tabla 1 presenta las publicaciones más citadas del corpus analizado, las cuales han tenido una influencia significativa en la orientación temática y metodológica de las investigaciones desarrolladas durante el periodo de mayor dinamismo científico.

Tabla 1. Publicaciones con mayor impacto académico según número de citas

Autor(es)	Año	Título de la publicación	Revista / Fuente	Número de citas
Damalas y Eleftherohorinos.	2011	<i>Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators</i>	International Journal of Environmental Research and Public Health	3325
Sharma et al.	2019	<i>Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem</i>	SN Applied Sciences	2088
Chandler et al.	2011	<i>The development, regulation and use of biopesticides for integrated pest management</i>	Philosophical Transactions of the Royal Society B	1192
Mittal et al.	2020	<i>Insights into pesticide contamination and human health risks</i>	Frontiers in Environmental Science	801

Autor(es)	Año	Título de la publicación	Revista / Fuente	Número de citaciones
Bahrulolum et al.	2021	<i>Green synthesis of nanoparticles and their application in environmental remediation</i>	Journal of Environmental Management	669
Finger et al.	2019	<i>Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment</i>	Annual Review of Resource Economics	663
Hasan et al.	2019	<i>Water pollution in Bangladesh and its impact on public health</i>	Heliyon	602
Bai y Ogbourne	2016	<i>Glyphosate: environmental contamination, toxicity and potential risks</i>	Environmental Science and Pollution Research	495
Zhang et al.	2021	<i>Nanotechnology and artificial intelligence to improve sustainability in agriculture</i>	Nature Plants	449
Hikal et al.	2017	<i>Botanical insecticides as simple extractives for pest control</i>	Cogent Biology	437
Ahmad et al.	2024	<i>Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures</i>	Heliyon	310

7.2 Análisis de contenido y extracción de información relevante

La Fase 2 tuvo como objetivo profundizar en el análisis cualitativo y cuantitativo del corpus documental consolidado en la Fase 1, con el propósito de identificar los enfoques predominantes, patrones temáticos, relaciones estructurales entre autores y líneas de investigación, así como los principales vacíos de conocimiento en torno a la gestión de residuos agroquímicos y, de manera específica, al manejo de envases posconsumo.

7.2.1. Procesamiento de información y análisis relacional

Con el fin de analizar las interrelaciones estructurales del campo de estudio, los registros depurados obtenidos en la Fase 1 fueron exportados desde la herramienta Publish or Perish en

formatos compatibles (CSV o RIS) e incorporados en el software VOSviewer, especializado en análisis bibliométrico y visualización de redes científicas.

Lo anterior permitió generar representaciones visuales de co-ocurrencia de palabras clave, redes de coautoría y patrones de citación. A partir de estos resultados fue posible identificar los tópicos predominantes en la literatura, los autores con mayor influencia y los nodos centrales de investigación, así como las interconexiones entre ellos. La visualización obtenida posibilitó el reconocimiento de agrupaciones temáticas (clústeres), evidenciando tanto áreas de investigación consolidadas como líneas emergentes dentro del campo analizado. Este enfoque permitió enriquecer la revisión documental y aportar una perspectiva estructural sobre la organización y evolución del conocimiento relacionado con la sostenibilidad. En la ilustración 4 se muestra el mapa de co-ocurrencia obtenido.

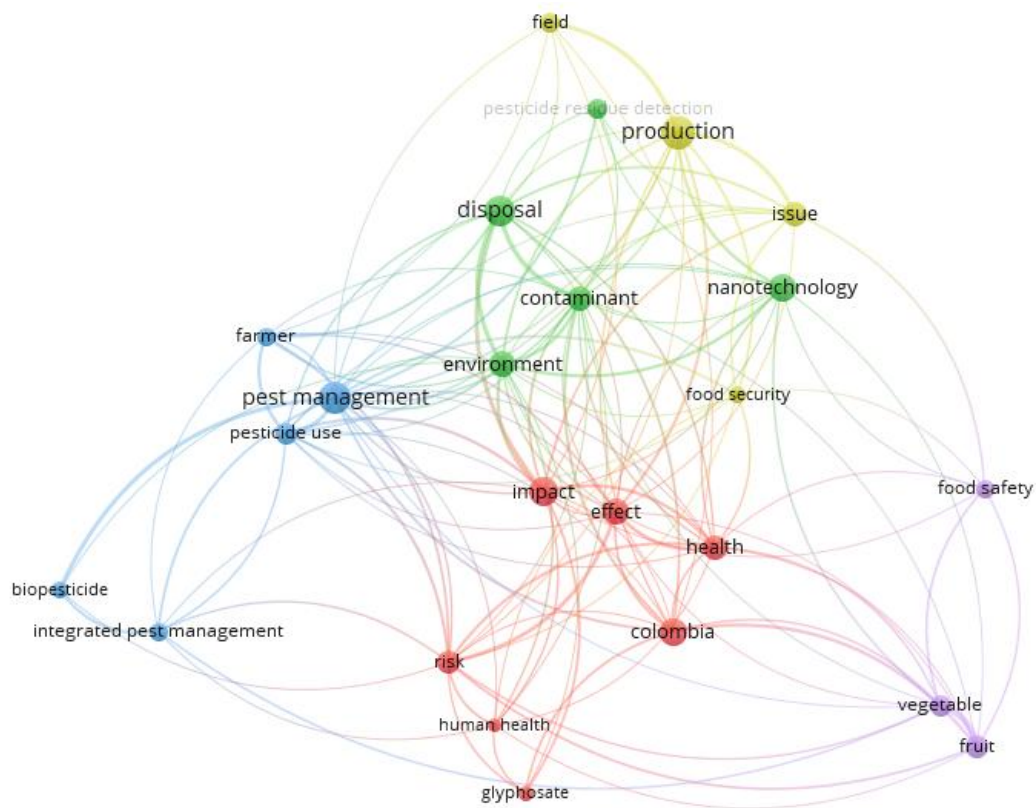


Ilustración 4. Análisis de co-ocurrencia de palabras clave en publicaciones sobre residuos agroquímicos

El análisis bibliométrico realizado con 452 publicaciones recuperadas de Scopus entre 2010 y 2025 permitió observar cómo ha evolucionado la investigación sobre residuos de agroquímicos y cuáles son hoy los temas que más conectan a la comunidad científica. Al construir el mapa de co-ocurrencia (Ilustración 4) de palabras clave en VOSviewer, con un umbral de diez ocurrencias y la opción de full counting, se hizo evidente que la conversación científica alrededor de este tema se ha organizado principalmente en torno a la contaminación ambiental, los riesgos para la salud humana y la búsqueda de prácticas agrícolas más sostenibles, lo cual expone un interés creciente en la implementación de estrategias que reduzcan la dependencia de agroquímicos, incorporen bioinsumos y fomenten sistemas productivos agroecológicos, que minimicen la generación de

residuos y promuevan la economía circular. Estas tendencias muestran que, si bien los problemas ambientales y de salud están claramente identificados, el componente operativo del manejo de residuos aún recibe menor atención.

A lo largo del mapa se identifican varios grupos temáticos que dialogan entre sí. Uno de ellos está compuesto por estudios que exploran cómo los residuos de pesticidas se comportan en el ambiente, abordando aspectos como la persistencia, la movilidad, la degradación y la bioacumulación, temas que han tenido un desarrollo notable en la literatura científica. En este contexto, según Masís et al. (2008), se realizó un estudio en tres ríos localizados en un área de producción de ornamentales en el cantón de Poás, Alajuela, Costa Rica, con el fin de analizar la presencia de agroquímicos organofosforados y organoclorados en sedimentos durante distintas épocas climáticas. Los autores reportaron la detección de residuos de agroquímicos en la mayoría de las estaciones de muestreo, destacándose la presencia de compuestos organoclorados persistentes como el PCNB y el endosulfán. Estos hallazgos indican que ciertos agroquímicos pueden permanecer en los sedimentos por periodos prolongados, incluso después de la reducción de su uso, evidenciando riesgos ambientales persistentes.

Abundan las investigaciones que cuantifican los residuos de agroquímicos en diversas matrices ambientales y productivas, lo que refleja un interés consolidado por comprender los procesos de contaminación asociados al uso intensivo de estos insumos. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se detienen en la descripción del problema y no profundizan en estrategias para reducir o gestionar los residuos generados, lo que refuerza la importancia de abordar el manejo de residuos agroquímicos desde una perspectiva aplicada y preventiva.

Otro grupo importante reúne estudios sobre los efectos que estas sustancias pueden tener en la salud humana. Aquí aparecen palabras clave relacionadas con toxicidad, exposición crónica y riesgos ocupacionales, varias de ellas con alta frecuencia en el mapa. Aunque hay una base sólida de investigación en esta línea, gran parte proviene de contextos distintos a América Latina. Esto sugiere un vacío en estudios que aborden la realidad específica de territorios agrícolas de países como Colombia, donde la exposición a agroquímicos suele estar influenciada por factores socioeconómicos, limitaciones tecnológicas y vacíos en la regulación.

El área que se refiere directamente al manejo y disposición de residuos agroquímicos también aparece representada en la red, aunque con menor densidad. Allí se representan estudios que mencionan no solo marcos normativos, sino también acciones concretas de gestión, como la implementación de sistemas de logística inversa para envases vacíos, la operación de programas posconsumo estructurados y redes de recolección, así como estrategias de reciclaje o valorización de materiales plásticos. Por ejemplo, se encuentran experiencias de modelos colaborativos como Campo Limpio en Colombia, que articulan a productores, distribuidores y autoridades para operar rutas de recolección, sensibilización y reciclaje de envases posconsumo, lo cual fortalece la gestión sostenible de estos residuos y la responsabilidad compartida de los actores involucrados (Campo limpio, s.f). Aunque estas acciones representan avances importantes en la gestión de residuos de agroquímicos, su presencia temática es más débil en comparación con las líneas de impacto ambiental y salud.

También se distinguen palabras clave relacionadas con agricultura sostenible, manejo integrado de plagas y alternativas a los productos químicos tradicionales. Esta línea de investigación parece ir en crecimiento y muestra un interés cada vez mayor por replantear las

prácticas agrícolas. No obstante, al revisar el mapa, se observa que estas propuestas no siempre se enlazan directamente con la gestión de residuos, sino que suelen abordarse desde enfoques conceptuales o preventivos, dejando de lado el análisis del problema una vez los residuos ya han sido generados.

En conclusión, el mapa evidencia que la literatura científica ha logrado avanzar de manera sólida en la identificación de impactos y riesgos, mientras que la gestión de los residuos continúa siendo un campo menos desarrollado y con múltiples oportunidades de investigación. Esta lectura resulta especialmente relevante para el contexto colombiano, donde los desafíos asociados a las prácticas de manejo, la falta de acceso a servicios de recolección y las debilidades en la formación de los agricultores siguen siendo barreras significativas. De esta manera, el análisis bibliométrico no solo permite visualizar cómo se organiza el conocimiento a nivel global, sino que también ayuda a identificar los vacíos que justifican la necesidad de proponer estrategias más efectivas, contextualizadas y sostenibles para el manejo de residuos agroquímicos en zonas rurales del país.

7.2.2. Identificación de enfoques temáticos predominantes

El análisis sistemático de la literatura científica y técnica sobre residuos agroquímicos permitió identificar cuatro enfoques analíticos predominantes: ambiental, tecnológico, regulatorio y socioeconómico. Esta clasificación temática, sintetizada en la Tabla 2 titulada *“Enfoques predominantes en la literatura sobre residuos agroquímicos: fuentes, acciones, estrategias y aportes para la gestión”*, evidencia la naturaleza multidimensional del problema y la diversidad de aproximaciones empleadas para su estudio.

Cada enfoque se caracteriza por objetivos, metodologías y alcances específicos. El enfoque ambiental se centra en el análisis de la presencia, persistencia y efectos de los residuos agroquímicos en distintos componentes de los sistemas productivos y ecológicos, con énfasis en los procesos de dispersión, acumulación y riesgo. El enfoque tecnológico aborda el desarrollo y la evaluación de soluciones técnicas orientadas a la detección, tratamiento y reducción de residuos, incorporando avances en métodos analíticos, biorremediación y tecnologías emergentes. Por su parte, el enfoque regulatorio examina el marco normativo que orienta el uso y manejo de agroquímicos, evaluando la efectividad de las políticas públicas, los mecanismos de control y los estándares establecidos a nivel nacional e internacional. Finalmente, el enfoque socioeconómico analiza las implicaciones sociales, culturales e institucionales asociadas al uso y manejo de agroquímicos en contextos rurales, considerando factores como percepciones comunitarias, capacidades locales y barreras para la adopción de prácticas sostenibles.

Esta tipificación no solo facilita una comprensión integrada de la complejidad del fenómeno en el contexto agrícola colombiano, sino que también constituye una base metodológica para el diseño de estrategias de gestión y mitigación diferenciadas, alineadas con las particularidades de cada dimensión analizada. En este sentido, la Tabla 2 permite visualizar de manera comparativa los aportes de cada enfoque y su potencial contribución al fortalecimiento de una gestión más integral y sostenible de los residuos agroquímicos.

Tabla 2. Enfoques predominantes en la literatura sobre residuos agroquímicos: fuentes, acciones, estrategias y aportes para la gestión

Enfoque predominante	Fuente(s)	Tipo de residuos y matrices abordadas	Acciones implementadas o analizadas	Estrategias propuestas o evaluadas	Aportes concretos
Ambiental	Damalas & Eleftherohorinos (2011); Bai & Ogbourne (2016); Hasan et al. (2019)	Residuos de pesticidas en suelo, agua superficial y subterránea, alimentos	Monitoreo ambiental, evaluación de toxicidad, análisis de rutas de exposición y persistencia	Priorización de matrices críticas, evaluación de riesgos ambientales y para la salud	Permite definir zonas prioritarias de intervención, criterios de riesgo y mecanismos de control ambiental
Tecnológico	Sharma et al. (2019); Bahrulolum et al. (2021); Zhang et al. (2021)	Residuos químicos persistentes y contaminantes emergentes asociados a la agricultura intensiva	Desarrollo y validación de métodos analíticos (QuEChERS, cromatografía), biorremediación, nanotecnología	Incorporación de tecnologías limpias, agricultura de precisión y soluciones basadas en biotecnología	Sustenta la adopción de herramientas técnicas para detección temprana, tratamiento y prevención de residuos
Regulatorio	Chandler et al. (2011); Finger et al. (2019)	Uso y manejo de plaguicidas, envases vacíos, límites máximos de residuos	Análisis normativo, evaluación de políticas públicas, revisión de estándares internacionales	Responsabilidad extendida del productor, enfoques preventivos, economía circular	Aporta insumos para fortalecer marcos normativos y articular regulación con prácticas de gestión sostenible
Socioeconómico	Mittal et al. (2020); Hasan et al. (2019)	Impactos del uso de agroquímicos en salud pública y comunidades rurales	Estudios de exposición humana, análisis de percepciones sociales y barreras institucionales	Integración del componente social, educación ambiental y fortalecimiento institucional	Justifica la inclusión de la dimensión social y de salud en estrategias integrales de gestión

De acuerdo con la síntesis presentada en la Tabla 2, la literatura científica sobre residuos agroquímicos evidencia una marcada predominancia de los enfoques ambiental y tecnológico, los cuales se concentran principalmente en la identificación y caracterización de residuos, la evaluación de riesgos y el desarrollo de soluciones técnicas orientadas a su detección, control y tratamiento. Estos enfoques han contribuido de manera significativa al fortalecimiento del conocimiento sobre los procesos de contaminación asociados al uso de agroquímicos, así como a la validación de metodologías analíticas y estrategias de remediación aplicables a distintos sistemas productivos.

No obstante, el análisis también revela que los enfoques regulatorio y socioeconómico presentan un desarrollo comparativamente menor, pese a su papel fundamental en la viabilidad y sostenibilidad de las soluciones propuestas. En particular, se identifica una limitada articulación entre los avances técnicos, los marcos normativos vigentes y las dinámicas sociales e institucionales del sector agrícola, lo cual constituye una brecha relevante en el corpus analizado y refuerza la necesidad de aproximaciones integrales que incorporen de manera explícita la gobernanza, la logística de gestión y los contextos territoriales.

7.2.3 Distribución geográfica de la producción científica

A nivel global, la producción científica analizada evidencia una concentración significativa de investigaciones provenientes de países con elevada intensidad agrícola y un uso extensivo de agroquímicos entre los que se destacan Brasil, Estados Unidos, China y algunos países de la Unión Europea. En estos contextos, los estudios se han orientado predominantemente a la caracterización, evaluación y control de residuos de plaguicidas en matrices ambientales como suelo, agua y

alimentos, así como al desarrollo de alternativas tecnológicas destinadas a la mitigación de impactos asociados. Dichas alternativas incluyen estrategias de biorremediación, metodologías analíticas avanzadas para el monitoreo de contaminantes y enfoques de producción agrícola alineados con principios de sostenibilidad.

No obstante, el presente trabajo prioriza el análisis de aquellos países que comparten desafíos estructurales con Colombia, en particular en América Latina y otras regiones en desarrollo, donde la agricultura intensiva coexiste con limitaciones institucionales, técnicas, logísticas y regulatorias para la gestión adecuada de residuos agroquímicos. En este contexto, Brasil se posiciona como un referente clave dentro del corpus analizado. La literatura científica evidencia que las investigaciones desarrolladas en este país se concentran en la gestión integral de residuos de plaguicidas, con énfasis en el manejo de envases vacíos, la persistencia de residuos en suelos agrícolas y la contaminación de cuerpos de agua superficiales, asociadas al uso intensivo de agroquímicos (Aragos et al., 2021; Marques et al., 2017; Marsola et al., 2022; Padilha et al., 2025; Rodrigues et al., 2022). Asimismo, se documentan iniciativas orientadas a la implementación de esquemas de recolección, el análisis de escenarios de riesgo vinculados a la exposición y el desarrollo de propuestas de valorización bajo enfoques de economía circular, lo que confiere a estos estudios un elevado potencial de transferencia al contexto colombiano.

Adicionalmente, la revisión bibliográfica incluye investigaciones realizadas en otros países en desarrollo, como Nepal y algunos países africanos (por ejemplo, Kenia), donde la problemática se centra en la presencia de residuos de plaguicidas en alimentos, suelos y fuentes hídricas, asociada a prácticas de manejo inadecuadas y a una limitada capacidad institucional y técnica para el monitoreo ambiental (Chaka et al., 2023; Thapa & Pandey, 2025). En estos contextos, los estudios

analizados enfatizan el fortalecimiento de capacidades analíticas y la evaluación de riesgos, más que la implementación de sistemas formales de gestión de residuos, lo que refleja un estadio similar al de muchos territorios rurales en Colombia.

En el caso de países con marcos regulatorios más consolidados, como Francia y otros miembros de la Unión Europea, las investigaciones incluidas en el corpus no se enfocan exclusivamente en la generación de residuos, sino en la optimización de su gestión. Estos estudios abordan la presencia de residuos de plaguicidas en suelos agrícolas y en las cadenas agroalimentarias, así como el análisis de acciones regulatorias orientadas al control del uso de sustancias peligrosas, el manejo adecuado de envases y la adopción de estrategias preventivas alineadas con los principios de la economía circular y la responsabilidad extendida del productor (Cabrera et al., 2025; Galimberti et al., 2025).

Por su parte, Argentina aparece representada en el corpus mediante estudios orientados principalmente a la evaluación de residuos de plaguicidas en sistemas agrícolas extensivos, con énfasis en suelos, cuerpos de agua asociados a agroecosistemas y productos agrícolas destinados al consumo humano. Estas investigaciones destacan la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo y control, así como de mejorar la articulación entre las políticas públicas y las prácticas productivas, en un contexto caracterizado por el uso intensivo de agroquímicos, lo que refuerza su relevancia como país comparable al contexto colombiano (Mac Loughlin et al., 2018; Vera-Candiotti et al., 2021).

En conjunto, la distribución geográfica de los estudios analizados evidencia que, aunque las problemáticas asociadas a los residuos agroquímicos son globales, los tipos de residuos evaluados, las acciones implementadas y el grado de avance en su gestión varían significativamente según el

contexto territorial.

Con el propósito de profundizar en el análisis de la distribución geográfica de la producción científica y responder a las diferencias contextuales en la gestión de residuos agroquímicos, se realizó una caracterización comparativa de los estudios incluidos en el corpus según el tipo de residuos abordados, las matrices ambientales y productivas analizadas, y las acciones de gestión reportadas. Este enfoque permite identificar no solo la localización geográfica de la investigación, sino también el grado de avance en las estrategias implementadas por cada país o región, así como su nivel de pertinencia para contextos con desafíos estructurales similares al colombiano. En este sentido, la Tabla 3 sintetiza los principales aportes internacionales, facilitando una lectura comparativa que evidencia contrastes entre países con marcos regulatorios consolidados y aquellos en etapas incipientes de gestión, y aportando insumos relevantes para la formulación de estrategias adaptadas al contexto nacional.

Tabla 3. Distribución geográfica de los estudios analizados según región, tipo de residuos agroquímicos, matrices evaluadas, acciones de gestión y fuentes bibliográficas.

País / Región	Tipo de residuos agroquímicos abordados	Matrices ambientales / productivas analizadas	Acciones y estrategias identificadas en la literatura	Fuentes representativas
Brasil	Envases vacíos de plaguicidas, residuos persistentes de pesticidas	Suelo agrícola, cuerpos de agua superficiales, productos agrícolas	Implementación de esquemas de gestión integral de residuos agroquímicos, con énfasis en sistemas de recolección posconsumo, articulación entre actores de la cadena productiva y evaluación de riesgos asociados al manejo inadecuado. Se destacan propuestas de valorización de envases mediante reciclaje controlado, enmarcadas en principios de economía	Marsola et al., (2022); Padilha Neto et al., (2024); Rodrigues et al. (2022); Aragos et al., (2021)

País / Región	Tipo de residuos agroquímicos abordados	Matrices ambientales / productivas analizadas	Acciones y estrategias identificadas en la literatura	Fuentes representativas
			circular y responsabilidad compartida.	
Estados Unidos	Residuos de pesticidas convencionales y emergentes	Suelo, agua, alimentos	Desarrollo y validación de metodologías analíticas avanzadas, estudios de exposición y riesgo, e innovación tecnológica aplicada al monitoreo. Estas acciones contribuyen al fortalecimiento de los sistemas de control y a la toma de decisiones regulatorias basadas en evidencia científica.	Fenner et al., (2013); Bexfield et al., (2020)
China	Residuos agroquímicos y contaminantes asociados a agricultura intensiva	Suelo, agua, sistemas agrícolas	Aplicación de herramientas de nanotecnología e inteligencia artificial para el monitoreo y la remediación de residuos, junto con la implementación de enfoques de agricultura de precisión orientados a la optimización del uso de insumos químicos. Las estrategias se centran en la reducción en la fuente, el control de la dispersión de contaminantes y la integración de soluciones tecnológicas en los sistemas productivos.	Sorichetti et al., (2024); Lee et al., (2025); Chen et al., (2024)
Francia / Unión Europea	Residuos de plaguicidas en suelos agrícolas y cadenas agroalimentarias	Suelo, alimentos	Desarrollo de marcos regulatorios estrictos y estrategias preventivas enfocadas en la reducción del uso de plaguicidas, aplicación de esquemas de responsabilidad extendida del productor y fortalecimiento de sistemas de logística inversa para envases. Se	Galimberti et al., (2025); Cabrera et al., (2025)

País / Región	Tipo de residuos agroquímicos abordados	Matrices ambientales / productivas analizadas	Acciones y estrategias identificadas en la literatura	Fuentes representativas
			promueve la economía circular mediante el reciclaje controlado y la incorporación de criterios de ciclo de vida en la gestión de residuos agroquímicos.	
Argentina	Residuos de plaguicidas en sistemas agrícolas extensivos	Suelo, productos agrícolas	Evaluación sistemática de residuos, implementación de programas de monitoreo y análisis normativo e institucional orientado a mejorar los mecanismos de gestión y control. Las investigaciones destacan la necesidad de fortalecer la articulación interinstitucional y de adaptar las estrategias de gestión a las particularidades de los sistemas productivos extensivos.	Mac Loughlin et al., (2018); Vera-Candioti et al., (2021)
Kenia / África	Residuos de plaguicidas asociados a agricultura intensiva	Agua, alimentos, suelo	Estudios de contaminación y evaluación de riesgos asociados al uso intensivo de plaguicidas, acompañados del fortalecimiento de capacidades técnicas y analíticas. Las estrategias se orientan a mejorar los sistemas de gestión mediante formación, transferencia de conocimiento y adecuación de marcos regulatorios a contextos con limitaciones institucionales.	Obar et al., (2025); Chaka et al., (2023)
Nepal	Residuos de pesticidas en alimentos y suelos	Alimentos, suelo	Aplicación de métodos analíticos estandarizados, como QuEChERS, junto con evaluaciones de exposición asociadas al uso de plaguicidas. Las acciones se enfocan en mejorar el control de residuos en	Chaikasem & Roi-Et, (2020); Thapa & Pandey, (2025)

País / Región	Tipo de residuos agroquímicos abordados	Matrices ambientales / productivas analizadas	Acciones y estrategias identificadas en la literatura	Fuentes representativas
			la producción agrícola y generar información técnica para apoyar procesos de gestión y regulación.	

7.2.4 Análisis comparativo internacional y contexto colombiano

La revisión preliminar muestra que una parte significativa de la literatura se ha concentrado en la evaluación de los efectos del uso de agroquímicos sobre distintos sistemas ambientales y sociales, así como en la caracterización de los riesgos asociados a la exposición prolongada. En el caso particular de Colombia, la literatura se ha focalizado en la toxicidad de los pesticidas, los niveles y vías de exposición en poblaciones agrícolas, y la contaminación asociada a zonas de cultivos específicos, entre los que destacan los de flores y hortalizas.

La literatura más reciente, correspondiente al período 2010-2025, evidencia una marcada tendencia hacia enfoques basados en los principios de la economía circular y la sostenibilidad, orientados no solo a mitigar los impactos ambientales derivados de la contaminación por agroquímicos, sino también a promover la valorización y el aprovechamiento de residuos agrícolas como insumos para nuevos procesos productivos (Del Rio Osorio et al., 2021). A nivel internacional, se reportan estrategias como el reciclaje y la reutilización de envases plásticos de pesticidas, implementados a través de sistemas de retorno y gestión extendida del productor (Zhou & Rao, 2025; Huang & Elahi, 2022), la recuperación de biomasa residual para la producción de biogás y biofertilizantes (Pérez-Lucas et al., 2025), y la transformación de residuos de cultivos tratados en biomateriales o compuestos de alto valor agregado (Kumar, 2025).

En países como China, Brasil y España, se han implementado programas de devolución voluntaria de envases vacíos y prácticas de agricultura de precisión que optimizan la dosificación de insumos químicos, reduciendo la generación de residuos y mejorando la eficiencia de uso (Zhou & Rao, 2025; Huang & Elahi, 2022). Sin embargo, estas experiencias suelen estar limitadas a proyectos piloto o estudios de caso, con restricciones claras en cuanto a su escalabilidad, replicabilidad y adaptación a diferentes contextos agroecológicos y socioeconómicos (Del Rio Osorio et al., 2021).

En el caso colombiano, la literatura muestra un enfoque fragmentado y poco sistemático en materia de economía circular aplicada al sector agroquímico, con escasez de estudios que evalúen de manera integral la eficacia técnica, la viabilidad económica y los impactos sociales de las estrategias de valorización de residuos (Pérez-Lucas et al., 2025). Además, se identifican vacíos en el análisis de los posibles riesgos de transferencia de contaminantes cuando los subproductos se reintroducen en procesos productivos (Kumar, 2025) y en la normativa específica que regule estas actividades en Colombia.

7.2.5 Líneas de investigación

El análisis temático de los títulos de las publicaciones incluidas en la base de datos permitió identificar diversas líneas de investigación relacionadas con la gestión de residuos agroquímicos.

- **Economía circular y gestión de envases:** Una de las líneas de investigación más recurrentes en la literatura analizada corresponde al enfoque de economía circular aplicado a la gestión de residuos agroquímicos, con especial énfasis en los envases posconsumo. Los estudios agrupados en esta línea abordan estrategias orientadas a la valorización de subproductos, el reciclaje y reúso

de envases, y la implementación de sistemas de logística inversa como mecanismos para cerrar los ciclos de materiales dentro de la cadena productiva agrícola.

El análisis de los títulos evidencia que estas investigaciones se concentran en evaluar alternativas para reducir la disposición inadecuada de envases contaminados, promover su reincorporación controlada a procesos productivos y minimizar los impactos ambientales asociados. Asimismo, varios trabajos analizan experiencias de gestión implementadas en distintos países, lo que pone de manifiesto la diversidad de enfoques adoptados en función del contexto normativo, institucional y productivo.

- Políticas públicas, regulación y gobernanza: Otra línea de investigación ampliamente representada en el corpus corresponde al análisis de políticas públicas y marcos regulatorios relacionados con la gestión de residuos agroquímicos. En esta línea se agrupan estudios que evalúan la efectividad de distintos instrumentos normativos, tales como esquemas de responsabilidad extendida del productor, programas de gestión posconsumo, mecanismos de control y seguimiento, y modelos de gobernanza ambiental aplicados al sector agrícola.

Los títulos analizados reflejan un interés creciente por comprender el papel de la regulación en la reducción de riesgos ambientales y en la mejora de las prácticas de manejo de residuos peligrosos. En particular, varios estudios examinan el impacto de los marcos regulatorios en términos de recolección de envases, prevención de la contaminación y fortalecimiento de la responsabilidad de los actores involucrados.

Además de las líneas priorizadas, el análisis temático permitió identificar otros enfoques relevantes presentes en la literatura, entre ellos se encuentran estudios orientados a la evaluación

de impactos biofísicos y escenarios de riesgo asociados al uso de agroquímicos; las investigaciones centradas en la caracterización de procesos de exposición y vulnerabilidad en contextos productivos y poblacionales; y los trabajos dirigidos al desarrollo de tecnologías y soluciones técnicas para el manejo, tratamiento y disposición de los residuos generados.

7.2.6 Identificación de vacíos de investigación

El análisis integral del corpus bibliográfico permitió identificar una serie de vacíos de investigación que limitan la comprensión y la gestión efectiva de los residuos agroquímicos, particularmente en contextos agrícolas de países en desarrollo como Colombia. Si bien la literatura científica evidencia un crecimiento sostenido de estudios de carácter ambiental y tecnológico, persisten desequilibrios de tipo temático, geográfico y metodológico que ponen de manifiesto la necesidad de orientar futuras investigaciones hacia enfoques más integrados, contextuales y aplicados.

En este contexto, el presente apartado tiene como propósito desarrollar y contextualizar los principales vacíos de investigación identificados en el corpus analizado, destacando aquellas áreas en las que la evidencia científica resulta aún incipiente, fragmentada o insuficiente. Este análisis permitirá no solo delimitar los alcances y limitaciones del conocimiento existente, sino también orientar la formulación de futuras líneas de investigación y sustentar la pertinencia del enfoque adoptado en este estudio, en coherencia con las necesidades actuales de la gestión sostenible de residuos agroquímicos en el sector agrícola.

(a) Trazabilidad y posconsumo de envases vacíos

Si bien una parte considerable de la literatura científica sobre agroquímicos se ha orientado al análisis de su uso y a la evaluación de los impactos asociados en distintos componentes de los

sistemas productivos y ambientales, se identifica un vacío significativo en relación con la gestión posconsumo de los envases vacíos y su trazabilidad a lo largo de la cadena productiva. Diversos estudios han señalado que el destino final de estos residuos ha sido abordado de manera limitada, sin profundizar en los mecanismos de seguimiento que permitan rastrear su manejo desde el punto de generación hasta su disposición final o aprovechamiento bajo esquemas de gestión sostenible (Padilha Neto et al., 2025).

En particular, la literatura presenta un desarrollo incipiente en el análisis de la operación logística asociada a la gestión posconsumo de residuos agroquímicos a escala local, entendida como el conjunto de procesos que involucran la recolección, el transporte, el almacenamiento temporal y la entrega a gestores autorizados. Son escasos los estudios que abordan de manera sistemática aspectos como las tipologías de recolección, el diseño de rutas en contextos rurales dispersos, el funcionamiento operativo de los centros de acopio y las condiciones de acceso para pequeños productores. Investigaciones recientes destacan que estas limitaciones son especialmente críticas en territorios con agricultura familiar y alta fragmentación predial, donde los costos logísticos y las brechas institucionales reducen la efectividad de los sistemas posconsumo (Jaller, 2019; Vera-Candioti et al., 2021).

Asimismo, se identifican vacíos en los estudios que incorporan de manera explícita las dimensiones sociales y culturales que influyen en la devolución de envases, incluyendo percepciones de riesgo, prácticas productivas arraigadas, niveles de conocimiento normativo y barreras económicas o territoriales. Diversos autores han señalado que la falta de integración de estos factores limita la comprensión integral de los comportamientos asociados al manejo de residuos agroquímicos y reduce la efectividad de las estrategias de gestión implementadas

(Galimberti et al., 2025).

Aunque a nivel internacional existen modelos consolidados de gestión posconsumo como Campo Limpio en América Latina, SIGRE en Europa o esquemas de responsabilidad extendida del productor, la literatura carece de evaluaciones sistemáticas y comparativas sobre su eficacia real, costos operativos, gobernanza y replicabilidad en contextos rurales con alta dispersión geográfica y predominio de agricultura familiar, como el colombiano (Mac Loughlin et al., 2018). En el caso de Colombia, pese a la existencia de iniciativas y programas de recolección, no se identifican estudios que evalúen de manera integral su desempeño por tipo de cultivo, región o escala productiva, ni que analicen las barreras reales para su adopción. Esta ausencia de evidencia ha llevado a que la problemática sea abordada predominantemente desde una perspectiva técnica, sin integrar de forma suficiente sus dimensiones socioeconómicas, culturales y territoriales.

(b) Integración de herramientas digitales para monitoreo

Otro vacío relevante identificado en el corpus analizado se relaciona con la limitada integración de herramientas digitales en los procesos de monitoreo y gestión de residuos agroquímicos. Si bien la literatura se ha concentrado predominantemente en métodos analíticos convencionales y evaluaciones puntuales de laboratorio, se identifican algunos estudios recientes que exploran el potencial de la agricultura digital y de herramientas computacionales avanzadas para fortalecer el seguimiento y la toma de decisiones asociadas al uso de agroquímicos (Finger et al., 2019; Zhang et al., 2021)..

En particular, algunos trabajos incorporan el uso de sensores, plataformas de agricultura de precisión y sistemas de adquisición de datos que permiten el monitoreo de variables ambientales

y productivas con mayor resolución espacial y temporal. Estos enfoques facilitan la identificación de patrones de uso de agroquímicos y de posibles escenarios de riesgo ambiental, contribuyendo a una gestión más preventiva y basada en información. De manera complementaria, se han desarrollado modelos predictivos apoyados en técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático, los cuales permiten analizar de forma integrada información relacionada con el uso de plaguicidas, las condiciones climáticas y los procesos de degradación de las sustancias, mostrando resultados prometedores en la estimación de riesgos y en la optimización de prácticas de manejo (Lee et al., 2025; Zhang et al., 2021).

No obstante, la evidencia disponible indica que estos avances aún presentan un carácter incipiente y limitado. La mayoría de las herramientas digitales identificadas en la literatura corresponden a desarrollos piloto o a aplicaciones en contextos con altos niveles de tecnificación agrícola, lo que restringe su escalabilidad y transferencia a territorios con condiciones productivas y socioeconómicas distintas. Asimismo, se observa una débil articulación entre estas herramientas digitales y los sistemas regulatorios, los mecanismos de control y los esquemas de trazabilidad posconsumo, lo que limita su contribución a una gestión integral de los residuos agroquímicos (Galimberti et al., 2025).

En el caso de países en desarrollo, y particularmente en Colombia, la literatura científica evidencia una ausencia significativa de estudios que evalúen de manera sistemática la viabilidad técnica, económica y social de la implementación de herramientas digitales para el monitoreo de residuos agroquímicos. Esta brecha pone de manifiesto la necesidad de desarrollar investigaciones orientadas a adaptar y validar soluciones digitales en contextos rurales heterogéneos, considerando factores como la conectividad, la escala productiva, las capacidades técnicas locales y la

articulación con los sistemas de gestión y control existentes. En este sentido, los estudios identificados constituyen un punto de partida relevante, pero aún insuficiente, para la consolidación de estrategias de monitoreo digital que contribuyan de manera efectiva a la gestión sostenible de los residuos agroquímicos.

(c) Participación comunitaria y enfoques socioculturales

Aunque la gestión de residuos agroquímicos ha sido abordada predominantemente desde enfoques normativos, técnicos y tecnológicos, el análisis del corpus evidencia que los enfoques socioculturales y participativos han comenzado a adquirir una relevancia creciente en la literatura reciente. Estos enfoques se manifiestan principalmente a través de acciones orientadas a la apropiación social del conocimiento, el trabajo con actores locales y el desarrollo de procesos de educación ambiental en contextos rurales, reconociendo el papel central de los agricultores y comunidades en la adopción de prácticas de manejo responsable de los residuos agroquímicos (FAO, 2021).

En este sentido, diversos estudios destacan el impacto positivo de programas de capacitación dirigidos a productores agrícolas, iniciativas de extensión rural y esquemas participativos en la mejora de las prácticas asociadas al uso, manejo y disposición de residuos agroquímicos. La literatura resalta como principales aportes las experiencias relacionadas con procesos formativos comunitarios, el fortalecimiento de asociaciones de productores y la integración de actores locales en estrategias de manejo responsable de insumos agrícolas, particularmente en el marco de modelos de agricultura sostenible, agricultura regenerativa y buenas prácticas agrícolas (Finger et al., 2019; Padilha Neto et al., 2025).

No obstante, estos avances se presentan de manera fragmentada y con un bajo nivel de sistematización, lo que limita la generación de evidencia comparable y la evaluación de impactos a mediano y largo plazo. Son escasos los estudios que profundizan en experiencias comunitarias específicas, tales como esquemas de gestión colectiva de envases vacíos, redes locales de cooperación para la recolección y el almacenamiento seguro, o procesos participativos liderados por cooperativas campesinas y asociaciones rurales. Asimismo, la literatura aborda de manera incipiente variables socioculturales clave, como el enfoque de género, las dinámicas familiares y las economías campesinas, a pesar de su influencia directa en la toma de decisiones relacionadas con el manejo de residuos agroquímicos (FAO, 2021).

En consecuencia, resulta necesario profundizar y documentar de forma sistemática experiencias de participación comunitaria, como programas de apropiación social del conocimiento, estrategias de educación ambiental territorializadas y modelos de gestión participativa de residuos agroquímicos, que permitan evaluar su efectividad, replicabilidad y pertinencia para el contexto colombiano. Este énfasis resulta fundamental para el diseño de una hoja de ruta integral, al reconocer que la sostenibilidad de las estrategias propuestas depende no solo de los marcos normativos y las soluciones tecnológicas, sino también de la apropiación social, cultural y organizativa por parte de los actores locales.

(d) Articulación interinstitucional y gobernanza

El análisis del corpus bibliográfico evidencia que, si bien existe un marco normativo amplio y relativamente consolidado en torno al uso de agroquímicos y la gestión de sus residuos, la literatura ofrece una limitada evidencia empírica sobre su implementación efectiva, particularmente en contextos rurales y territorios con restricciones institucionales. Diversos autores coinciden en

señalar que la existencia de normas no garantiza, por sí misma, una gestión efectiva, especialmente cuando existen debilidades en las capacidades institucionales y en los mecanismos de coordinación territorial (Lozada, 2011; Ortega Riascos & Castaño Gaviria, 2023).

Los principales vacíos identificados se relacionan con la ausencia de estudios que analicen de manera sistemática los modelos de articulación interinstitucional y la coordinación entre los niveles municipal, departamental y nacional, así como la interacción entre autoridades ambientales, agrícolas y sanitarias. En este sentido, estudios sobre gestión de residuos peligrosos en contextos latinoamericanos evidencian fragmentación institucional, superposición de competencias y limitaciones en los procesos de control y seguimiento, lo que reduce la efectividad de la acción pública (Lozada, 2011).

Desde esta perspectiva, los vacíos identificados constituyen puntos de partida estratégicos para la formulación de nuevas líneas de investigación, entre las que se destacan:

(i) Estudios orientados a evaluar la implementación efectiva del marco normativo relacionado con el uso de agroquímicos y la gestión de sus residuos en los distintos niveles territoriales y tipos de sistemas productivos, con énfasis en la identificación de las brechas entre la estructuración normativa y su aplicación efectiva en contextos rurales (Ortega Riascos & Castaño Gaviria, 2023).

(ii) Análisis comparativos de modelos de gobernanza multinivel aplicados a la gestión de residuos agroquímicos, que permitan identificar buenas prácticas, lecciones transferibles, priorizando el estudio de los mecanismos de articulación entre los actores municipales, departamentales y nacionales, así como su incidencia en la coherencia y efectividad de la acción pública (Lozada, 2011; García, 2018).

(iii) Investigaciones orientadas a analizar los mecanismos de coordinación interinstitucional entre autoridades ambientales, agrícolas y sanitarias, evaluando su impacto en la eficiencia y coherencia de las acciones de control, seguimiento y gestión de los residuos agroquímicos, particularmente en territorios con limitaciones económicas, técnicas y administrativas (Vásquez, 2014; Gallego & Portilla, 2020).

(iv) Evaluaciones integrales de los instrumentos de política pública asociados a la gestión de residuos agroquímicos, incluidos incentivos económicos, esquemas de corresponsabilidad y mecanismos de control y fiscalización, con énfasis en su efectividad real, viabilidad operativa y capacidad de adaptación a las condiciones socioeconómicas, productivas y territoriales de los contextos rurales colombianos (Lozada, 2011; Ortega Riascos & Castaño Gaviria, 2023).

En conjunto, estas líneas de investigación resultan fundamentales para avanzar desde un enfoque predominantemente normativo hacia una gestión efectiva e integrada, que articule el marco regulatorio con capacidades institucionales, dinámicas territoriales y participación de los actores locales. Los hallazgos derivados de estas investigaciones aportan insumos clave para la construcción de una hoja de ruta que fortalezca la gobernanza de los residuos agroquímicos en Colombia, alineando la normativa existente con procesos de implementación, seguimiento y mejora continua.

La Tabla 4 tiene como propósito sistematizar y sintetizar los principales vacíos de investigación identificados en la literatura científica sobre la gestión de residuos agroquímicos, con el fin de ofrecer una visión comparativa y estructurada de las brechas existentes. A través de esta síntesis, la tabla permite evidenciar que dichos vacíos no se limitan al ámbito técnico, sino

que abarcan de manera transversal dimensiones logísticas, digitales, socioculturales e institucionales, las cuales han sido abordadas de forma fragmentada en los estudios analizados. Asimismo, constituye un instrumento analítico que facilita la identificación de patrones, convergencias y áreas críticas donde la evidencia científica resulta aún incipiente o insuficiente. El análisis derivado de esta sistematización muestra que, si bien existen avances puntuales en cada una de las dimensiones consideradas, la ausencia de enfoques integradores y de evaluaciones aplicadas restringe la formulación de estrategias efectivas y territorialmente pertinentes.

En este sentido, los vacíos consignados en la tabla 4 se interpretan como oportunidades estratégicas de investigación e intervención, orientadas a fortalecer la trazabilidad posconsumo, la incorporación de herramientas digitales para el monitoreo, la participación comunitaria y la articulación interinstitucional. Estos elementos constituyen insumos clave para el diseño de una hoja de ruta que no solo dé respuesta al marco normativo vigente, sino que promueva una gestión integral, sostenible y contextualizada de los residuos agroquímicos en Colombia, articulando el conocimiento científico con las dinámicas productivas, sociales e institucionales del territorio.

Tabla 4. Algunos vacíos de investigación y líneas estratégicas para la gestión integral de residuos agroquímicos

Dimensión analizada	Vacío identificado	Evidencia existente (limitada)	Líneas de investigación derivadas	Enfoque estratégico
Trazabilidad y posconsumo de envases	Escaso seguimiento de envases vacíos a lo largo de la cadena productiva y ausencia de evaluaciones comparativas de modelos posconsumo	Estudios puntuales sobre programas como Campo Limpio o esquemas de responsabilidad extendida del productor, sin	Desarrollo y evaluación de sistemas de trazabilidad de envases agroquímicos diferenciados por tipo de cultivo y región,	Diseño e implementación de sistemas de trazabilidad de envases agroquímicos adaptados al contexto rural colombiano, que

Dimensión analizada	Vacío identificado	Evidencia existente (limitada)	Líneas de investigación derivadas	Enfoque estratégico
	en contextos rurales.	análisis territorial profundo.	incorporando esquemas de valorización de residuos; identificación y análisis de barreras logísticas, sociales e institucionales en contextos rurales; y estudios comparativos de modelos posconsumo con énfasis en su eficiencia operativa, sostenibilidad económica y potencial de valorización.	fortalezcan la gestión posconsumo y promuevan la valorización de los residuos como parte de un enfoque de economía circular.
Integración de herramientas digitales	Baja implementación de sistemas digitales integrados para monitoreo continuo y trazabilidad regulatoria.	Experiencias piloto con sensores, IoT, plataformas digitales y modelos predictivos en contextos altamente tecnificados.	Evaluación de viabilidad de sistemas digitales en agricultura familiar; integración de IA para gestión de riesgos; interoperabilidad con sistemas regulatorios.	Incorporación de herramientas digitales como eje transversal de monitoreo, control y transparencia.
Participación comunitaria y enfoques socioculturales	Escasa sistematización de experiencias comunitarias y limitada integración de variables socioculturales.	Acciones de apropiación social del conocimiento, educación ambiental y trabajo con asociaciones de productores.	Sistematización de experiencias participativas; análisis de género y dinámicas familiares; estudios sobre economías campesinas e informalidad.	Fortalecimiento de la apropiación social del conocimiento y de la corresponsabilidad comunitaria en la gestión integral de los residuos agroquímicos, a través de procesos participativos de diálogo de saberes, formación y aprendizaje colectivo,

Dimensión analizada	Vacío identificado	Evidencia existente (limitada)	Líneas de investigación derivadas	Enfoque estratégico
				y co-creación de estrategias contextualizadas que reconozcan las prácticas, percepciones y dinámicas socioculturales de los territorios rurales. (Universidad Pontificia Bolivariana [UPB], s. f.)
Articulación interinstitucional y gobernanza	Poca evidencia empírica sobre la implementación real de la normativa y la coordinación interinstitucional.	Estudios institucionales aislados y evaluaciones parciales de programas específicos.	Análisis de gobernanza multinivel; evaluación de fiscalización, incentivos y sanciones; estudios de coordinación entre sectores agrícola, ambiental y sanitario.	Consolidación de un modelo de gobernanza articulado y operativo para la gestión integral de residuos agroquímicos.
Enfoque socioeconómico y territorial	Predominio de estudios técnicos con limitada consideración de realidades territoriales.	Estudios descriptivos sobre impactos en salud y ambiente en países en desarrollo.	Evaluaciones socioeconómicas de adopción de prácticas sostenibles; análisis territorial diferenciado.	Diseño y ajuste de estrategias de gestión de residuos agroquímicos diferenciadas según la tipología productiva, la escala de los productores y las condiciones socioeconómicas y territoriales, con el fin de garantizar su viabilidad técnica, económica y social en los distintos contextos regionales del país.

7.3 Propuesta de estrategias para el manejo de envases vacíos de agroquímicos

Con base en los resultados del análisis bibliográfico, la revisión comparativa internacional y la identificación de vacíos de investigación, se formuló una propuesta de estrategias orientada al fortalecimiento de la gestión integral de los envases vacíos de agroquímicos en Colombia. A partir del reconocimiento de la problemática asociada a estos residuos, se evidencia que esta no puede ser abordada desde soluciones técnicas aisladas, sino y como se ha mencionado en este documento se requiere un enfoque sistémico que integre dimensiones normativas, logísticas, tecnológicas, económicas y socioculturales, en coherencia con las particularidades productivas, institucionales y territoriales del país.

La revisión de la literatura y de los modelos de gestión implementados en contextos internacionales muestra que los sistemas con mayores tasas de retorno y mejor desempeño ambiental se concentran principalmente en países europeos, Estados Unidos y algunas experiencias latinoamericanas, caracterizados por la existencia de marcos regulatorios robustos, esquemas consolidados de responsabilidad extendida del productor, sistemas de trazabilidad y logística posconsumo eficientes, mecanismos de incentivo económico, valorización de los envases dentro de esquemas de economía circular y una participación activa y corresponsable de los actores de la cadena agrícola. Tomando en consideración estas experiencias y las brechas identificadas para el contexto colombiano, se proponen estrategias orientadas a fortalecer la gobernanza del sistema, optimizar la recolección, el transporte y el tratamiento de los envases, e incorporar herramientas tecnológicas y sociales que favorezcan un manejo ambientalmente responsable de los residuos plásticos derivados de los agroquímicos.

Con el propósito de sintetizar y operacionalizar las estrategias formuladas, se elaboró un

diagrama integrador que permite visualizar de manera estructurada la relación entre los ejes estratégicos, los actores involucrados y las acciones prioritarias requeridas para la gestión integral de los envases vacíos de agroquímicos en Colombia. La Ilustración 5 se construyó a partir de la correlación entre los vacíos identificados en la revisión bibliográfica, las experiencias internacionales analizadas y las necesidades específicas del contexto nacional, organizando las estrategias en componentes interdependientes que reflejan un esquema de corresponsabilidad entre los diferentes eslabones de la cadena productiva. Asimismo, el diagrama evidencia cómo las acciones asociadas a la gobernanza ambiental, la logística inversa, el sistema posconsumo, el soporte tecnológico, los incentivos económicos y la educación ambiental se integran de forma sistémica para fortalecer la gestión de estos residuos y favorecer la transición hacia modelos de economía circular y sostenibilidad ambiental.

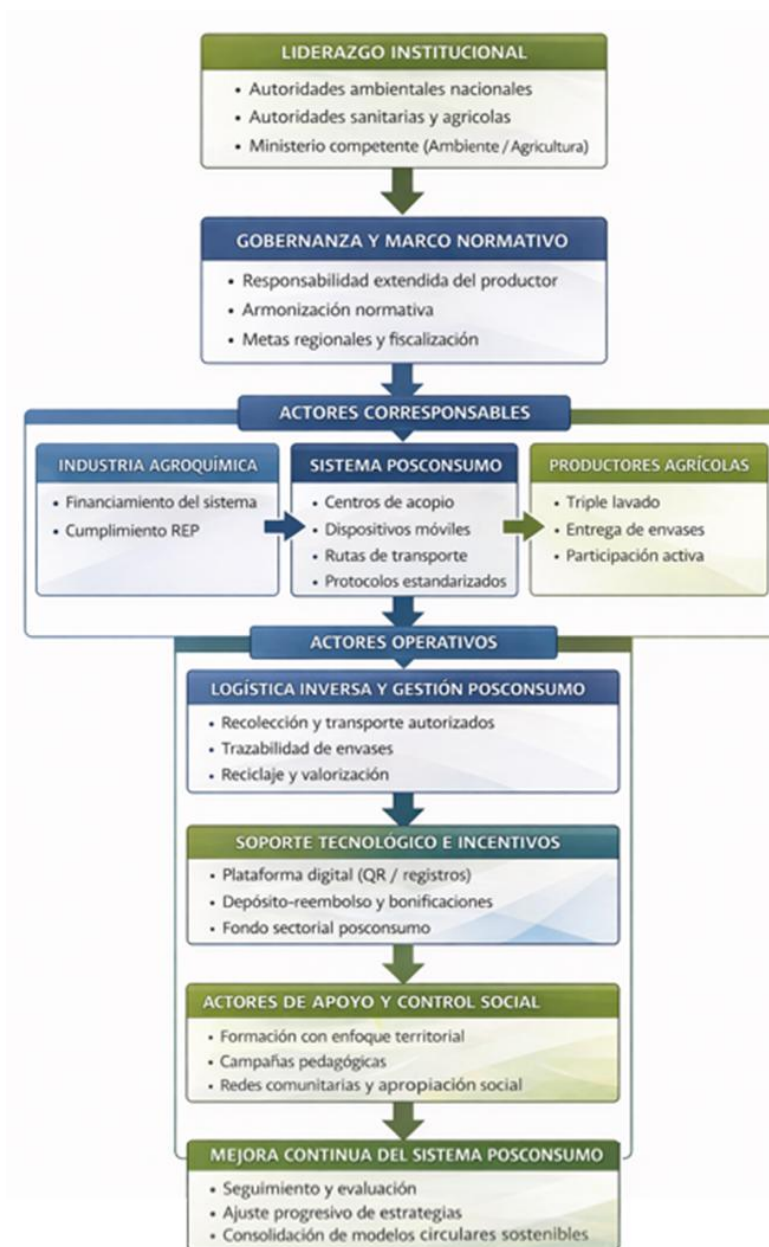


Ilustración 5. Diagrama de corresponsabilidad y estrategias para la gestión integral de envases vacíos de agroquímicos

En primer lugar, la propuesta plantea el fortalecimiento del marco de gobernanza mediante la consolidación de la responsabilidad extendida del productor como eje rector del sistema de gestión posconsumo. Este enfoque se sustenta en un liderazgo institucional ejercido por las autoridades

ambientales, agrícolas y sanitarias del orden nacional, en articulación con los niveles departamental y municipal, responsables de la formulación normativa, la definición de lineamientos técnicos y el seguimiento al cumplimiento de las obligaciones establecidas. Lo anterior implica avanzar hacia una mayor armonización entre la normativa ambiental, agrícola y sanitaria, definiendo responsabilidades claras y verificables para fabricantes, importadores y distribuidores a lo largo del ciclo de vida del producto, así como el establecimiento de metas de recolección diferenciadas por región y tipo de cultivo. De igual manera, se resalta la necesidad de robustecer los mecanismos de fiscalización, seguimiento y rendición de cuentas, garantizando la operación de gestores autorizados, la transparencia en el uso de los recursos y la supervisión periódica de centros de acopio y rutas de transporte, superando la fragmentación institucional que limita actualmente la intervención territorial.

En este marco de gobernanza, se reconoce la importancia de incorporar lineamientos que promuevan la transición progresiva hacia el uso de bioinsumos y alternativas de menor impacto ambiental, integrando criterios de sostenibilidad en la regulación del mercado de insumos agrícolas. Esta articulación no solo contribuye a la reducción futura de envases asociados a agroquímicos de alta peligrosidad, sino que fortalece estrategias preventivas dentro del enfoque de gestión integral de residuos, ampliando el alcance del sistema más allá de la etapa posconsumo.

En segundo lugar, se propone el diseño de un sistema logístico integral que facilite la recolección accesible y oportuna de los envases vacíos tanto en contextos urbanos como rurales. La estrategia contempla la instalación de centros de acopio fijos, definidos a partir de criterios territoriales como la concentración productiva, los volúmenes estimados de generación de envases y la accesibilidad vial, operados por los programas posconsumo en articulación con autoridades

ambientales y actores locales. Estos centros funcionarían como nodos logísticos permanentes para la recepción, clasificación y almacenamiento temporal de los envases, integrados a rutas de transporte autorizadas hacia plantas de tratamiento, aprovechamiento o disposición final.

De manera complementaria, se plantea la implementación de dispositivos móviles de recolección, entendidos como mecanismos logísticos flexibles tales como unidades móviles, jornadas programadas de recolección o puntos temporales habilitados en coordinación con asociaciones de productores, cooperativas y autoridades locales. Estos dispositivos estarían especialmente orientados a zonas rurales dispersas o de difícil acceso, donde la instalación de infraestructura permanente no resulta viable. Su operación requiere una planificación logística que articule cronogramas de recolección, rutas optimizadas, medios de transporte adecuados y estrategias de comunicación con los productores, con el fin de garantizar una cobertura territorial efectiva y reducir barreras de acceso al sistema posconsumo. Tanto los centros fijos como los dispositivos móviles deberán operar bajo protocolos estandarizados que aseguren el adecuado acondicionamiento de los envases, incluyendo prácticas como el triple lavado, la perforación y el almacenamiento seguro, minimizando riesgos de reutilización indebida o contaminación ambiental.

Asimismo, la propuesta contempla la optimización de las rutas de transporte mediante la implementación de esquemas segregados para los envases vacíos de agroquímicos, definidos a partir de criterios como la localización de los centros de acopio, los volúmenes recolectados, la accesibilidad territorial y la disponibilidad de infraestructura vial. Esta optimización requiere la planificación de rutas específicas, el uso de vehículos autorizados y acondicionados para el transporte de residuos peligrosos, y la articulación con capacidades logísticas ya existentes en el

sector agrícola, tales como redes de distribución de insumos, asociaciones de productores y operadores regionales. En una fase inicial, estos esquemas podrían implementarse a través de proyectos piloto en territorios priorizados, permitiendo ajustar frecuencias, costos y tiempos operativos antes de su escalamiento.

Dichos procesos deberán ser ejecutados por operadores capacitados, incluyendo gestores posconsumo autorizados, empresas transportadoras habilitadas para el manejo de residuos peligrosos y, cuando sea pertinente, operadores logísticos del sector agrícola que cuenten con formación técnica, licencias y protocolos de seguridad adecuados. La trazabilidad documental desde el punto de recepción hasta el tratamiento final se concibe como un elemento central del sistema, garantizando el control, seguimiento y transparencia de los flujos de residuos. En este contexto, se prioriza el reciclaje y la valorización de los materiales plásticos dentro de esquemas de economía circular, relegando alternativas como la incineración o el coprocesamiento a escenarios en los que el aprovechamiento no resulte técnica o económicamente viable.

Un tercer eje estratégico corresponde a la incorporación de mecanismos económicos que incentiven la participación del sector agrícola, en particular de pequeños y medianos productores que enfrentan mayores barreras financieras y logísticas. Entre las estrategias propuestas se incluyen esquemas de depósito-reembolso, bonificaciones por la entrega de envases y la articulación con sistemas de certificación agrícola que reconozcan las buenas prácticas de manejo posconsumo y el uso de bioinsumos como criterios de valor agregado productivo.

De manera complementaria, se plantea la creación de un fondo sectorial, financiado de manera compartida entre la industria a través de fabricantes, importadores y comercializadores de agroquímicos y el Estado, en coherencia con el principio de responsabilidad extendida del

productor. Este fondo se concibe como un mecanismo de soporte del sistema de gestión posconsumo, destinado a garantizar la sostenibilidad financiera de la red logística, el desarrollo de campañas de educación ambiental, el fortalecimiento de capacidades locales y la incorporación progresiva de mejoras tecnológicas. Su diseño y operación deben considerar criterios de transparencia, claridad en la asignación de responsabilidades, sostenibilidad financiera a largo plazo y priorización de territorios con mayores brechas logísticas.

La propuesta incorpora también, el uso de herramientas digitales como soporte para la trazabilidad y el monitoreo y la planificación territorial del manejo de envases. En este sentido, se plantea la identificación individual de los envases mediante códigos QR o etiquetas únicas, vinculadas a una plataforma digital interoperable que permita registrar su circulación desde el punto de venta hasta su tratamiento final. De manera complementaria, esta plataforma permitiría incorporar información regional sobre compras sostenibles de insumos agrícolas, facilitando la identificación de patrones de consumo, el seguimiento a la adopción de bioinsumos y el diseño de estrategias diferenciadas por región, tipo de cultivo y escala productiva. Este sistema facilitaría la actualización de información en tiempo real, la optimización de rutas de recolección, el seguimiento del cumplimiento regulatorio y la generación de bases de datos útiles para la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas futuras.

Para el diseño e implementación de esta plataforma, se requiere tener en cuenta criterios como la accesibilidad tecnológica para pequeños y medianos productores, la simplicidad en la interfaz de usuario, la posibilidad de operación en contextos con conectividad limitada, la interoperabilidad con sistemas de información de entidades ambientales y agrícolas, y la definición clara de roles y responsabilidades en la gestión de los datos. Asimismo, deben considerarse aspectos relacionados

con la protección de la información, la trazabilidad confiable de los registros y la sostenibilidad operativa del sistema, de manera que la herramienta digital se consolide como un soporte efectivo para la gobernanza, el seguimiento institucional y la mejora continua del sistema posconsumo.

Finalmente, se reconoce la importancia de incorporar estrategias de educación y participación comunitaria como un componente transversal del sistema de gestión, fundamentado en enfoques claros y aplicables de apropiación social del conocimiento. En este sentido, la propuesta retoma el enfoque planteado por la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), que concibe la apropiación social del conocimiento como un proceso intencional y participativo, orientado al diálogo de saberes, la interacción entre actores y la transformación de prácticas sociales a partir del uso social del conocimiento (UPB, sf).

Bajo esta perspectiva, las estrategias educativas no deben limitarse a la transferencia unidireccional de información, sino que deben promover espacios de co-construcción, aprendizaje colectivo y fortalecimiento de capacidades locales. Dado que las prácticas agrícolas en Colombia están fuertemente influenciadas por dinámicas culturales y territoriales, los programas formativos deben diseñarse con enfoque local, incorporando contenidos sobre manejo adecuado de envases, transición hacia bioinsumos, consumo responsable y compras sostenibles, y utilizando metodologías demostrativas y participativas. La participación activa de asociaciones de productores, mujeres rurales y organizaciones territoriales es una pieza clave para promover la apropiación social del conocimiento, fortalecer la corresponsabilidad comunitaria en la gestión de residuos, reducir prácticas inadecuadas como la quema o reutilización de envases y consolidar manejos agrícolas ambientalmente responsables y sostenibles a largo plazo.

En conjunto, se propone un modelo de gestión integral de envases vacíos de agroquímicos que

articula principios ambientales, económicos y sociales, superando enfoques fragmentados o exclusivamente tecnocráticos. Este modelo contempla la participación coordinada de productores, distribuidores, autoridades ambientales y asociaciones de agricultores, estableciendo mecanismos de recolección, transporte y disposición final seguros y eficientes, apoyados en centros de acopio regionales. La implementación se realizará de manera gradual mediante proyectos piloto, acompañados de procesos de seguimiento y evaluación continua que permitan ajustar las estrategias según su desempeño real. De esta forma, se garantiza la sostenibilidad del sistema en el tiempo y su alineación con las mejores prácticas internacionales de economía circular y gestión de residuos peligrosos.

Es importante señalar que, si bien la hoja de ruta se centra de manera prioritaria en la gestión integral de los envases vacíos de agroquímicos, incorpora de forma deliberada la transición hacia bioinsumos y alternativas sostenibles como un eje estratégico de carácter preventivo y de largo plazo. Este componente no se orienta directamente a la operación logística del sistema posconsumo, sino a la reducción estructural de la presión futura sobre dicho sistema, mediante la disminución progresiva del uso de agroquímicos sintéticos de alta peligrosidad y, por ende, de los envases asociados a estos insumos.

Desde esta perspectiva, la transición hacia bioinsumos se concibe como una estrategia complementaria e integrada a la gestión de envases, alineada con los principios de economía circular, prevención en la generación de residuos y sostenibilidad ambiental. Su inclusión en la hoja de ruta responde a la necesidad de superar un enfoque exclusivamente correctivo o terminal del residuo, incorporando acciones que incidan en las etapas previas del ciclo de vida del producto y en los patrones de consumo de insumos agrícolas. En consecuencia, este eje estratégico articula

la gestión posconsumo con políticas de bioeconomía, innovación productiva y desarrollo rural, contribuyendo a la coherencia y viabilidad del sistema en el mediano y largo plazo.

Bajo este enfoque, la hoja de ruta integra estrategias de gobernanza, logística, incentivos, trazabilidad, participación comunitaria y transición productiva, reconociendo que la sostenibilidad del sistema de gestión de envases vacíos no depende únicamente de su eficiencia operativa, sino también de la evolución de los modelos productivos agrícolas hacia esquemas de menor impacto ambiental.

A partir del análisis de los enfoques predominantes, la distribución geográfica de los estudios y la identificación de vacíos de investigación, se consolidó una hoja de ruta para la gestión integral de residuos agroquímicos y sus envases en Colombia, priorizando aquellos que representan mayor riesgo para la salud humana y el medio ambiente, así como brechas significativas en su manejo. Esta propuesta articula la evidencia científica internacional con el marco normativo nacional vigente y las particularidades socioproductivas del país, permitiendo vincular estrategias de gobernanza, logística, innovación tecnológica, participación comunitaria y transición hacia alternativas de menor impacto ambiental.

La hoja de ruta no solo sistematiza acciones operativas y actores responsables, sino que integra criterios de viabilidad financiera, capacidades técnicas y logísticas, indicadores de seguimiento y una planificación temporal diferenciada, orientada a su implementación progresiva en el corto, mediano y largo plazo. En este sentido, la Tabla 5 se constituye en un instrumento integrador y operativo que orienta la formulación de políticas, programas y proyectos piloto, bajo un enfoque de economía circular, responsabilidad extendida del productor, sostenibilidad territorial y prevención en la generación de residuos peligrosos.

Tabla 5. Hoja de ruta estratégica para la gestión integral de envases vacíos de agroquímicos en Colombia

Eje estratégico	Problema identificado / vacío	Estrategias y acciones prioritarias	Articulación normativa vigente (Colombia)	Mecanismos operativos	Entidades y actores clave	Líneas de investigación prioritarias	Resultados esperados
Gobernanza y responsabilidad extendida del productor (REP)	Fragmentación institucional y débil implementación de la normativa posconsumo	Fortalecer la REP como eje rector; armonizar normas ambientales, agrícolas y sanitarias; definir roles claros entre niveles nacional, departamental y municipal	Decreto 1076 de 2015; Resolución 1407 de 2018; políticas de economía circular	Mesas interinstitucionales; planes territoriales de gestión; sistemas de reporte obligatorio	Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, Ministerio de Agricultura, ICA, ANLA, Corporaciones Autónomas Regionales, autoridades ambientales regionales, industria agrícola, pequeños y medianos productores, gestores de residuos peligrosos, programas posconsumo y comercializadores de agroquímicos	Evaluación de eficacia real de la REP por región y tipo de cultivo; análisis de barreras institucionales	Mayor coherencia normativa, mejora en cumplimiento y control territorial

Eje estratégico	Problema identificado / vacío	Estrategias y acciones prioritarias	Articulación normativa vigente (Colombia)	Mecanismos operativos	Entidades y actores clave	Líneas de investigación prioritarias	Resultados esperados
Logística de recolección y tratamiento	Baja cobertura rural y dificultades de acceso para pequeños productores	Implementar centros de acopio municipales y puntos móviles rurales; rutas segregadas; protocolos estandarizados de manejo	Resolución 1407 de 2018; planes de gestión integral de residuos	Centros fijos y móviles; operadores logísticos capacitados; trazabilidad documental	Municipios, gestores autorizados, asociaciones de productores	Modelos logísticos adaptados a ruralidad dispersa; análisis costo-beneficio por región	Incremento de tasas de retorno y reducción de disposición inadecuada
Incentivos económicos y sostenibilidad financiera	Escasos incentivos para la devolución de envases y altos costos operativos	Sistemas depósito-reembolso; bonificaciones; fondos sectoriales compartidos	Instrumentos económicos ambientales; lineamientos de economía circular	Incentivos monetarios y no monetarios; acuerdos con recicladores	Industria, Estado, recicladores, productores	Impacto de incentivos económicos en la participación de pequeños productores	Mayor participación y sostenibilidad del sistema
Trazabilidad e integración de herramientas digitales	Limitada trazabilidad posconsumo y baja digitalización	Implementar identificación de envases (QR/RFID); plataformas interoperables	Estrategias de gobierno digital; control y seguimiento ambiental	Plataformas digitales; monitoreo en tiempo real; bases de datos integradas	Autoridades ambientales, industria, desarrolladores tecnológicos	Evaluación de sistemas digitales en contextos rurales; interoperabilidad de datos	Transparencia, control y mejor toma de decisiones
Participación comunitaria y enfoque sociocultural	Escasa incorporación de factores culturales y sociales	Programas de educación ambiental territorializados; fortalecimiento de organizaciones	Política Nacional de Educación Ambiental; enfoque de participación social	Escuelas de campo; redes comunitarias; apropiación social del conocimiento	Comunidades rurales, asociaciones, mujeres rurales, ONG, el Estado	Estudios sobre percepciones de riesgo y prácticas culturales; impacto	Cambio de comportamientos y apropiación social del sistema

Eje estratégico	Problema identificado / vacío	Estrategias y acciones prioritarias	Articulación normativa vigente (Colombia)	Mecanismos operativos	Entidades y actores clave	Líneas de investigación prioritarias	Resultados esperados
		locales				de género	
Transición hacia bioinsumos y alternativas sostenibles	Persistencia de dependencia de agroquímicos sintéticos	Promover bioinsumos y prácticas agroecológicas; articulación con gestión de envases	Política de bioeconomía; lineamientos ICA sobre bioinsumos	Programas piloto; incentivos a bioinsumos; certificaciones	ICA, MinAgricultura, productores, centros de investigación	Evaluación ambiental y socioeconómica de bioinsumos; reducción de residuos peligrosos	Disminución de envases peligrosos y transición productiva sostenible

La hoja de ruta presentada en la Tabla 5, se concibe como un instrumento estratégico de carácter orientador y adaptativo, cuyo propósito no es únicamente sistematizar acciones y actores, sino también facilitar su implementación progresiva en función de las capacidades institucionales, territoriales y productivas del país. En este sentido, su aplicación efectiva requiere ser complementada con la identificación de los recursos financieros, técnicos y logísticos necesarios, así como con la definición de indicadores de seguimiento y una planificación temporal diferenciada que permita organizar las acciones en el corto, mediano y largo plazo.

Desde la perspectiva financiera, la implementación de la hoja de ruta implica la movilización de recursos destinados al fortalecimiento del sistema posconsumo, la operación de la red logística,

la implementación de herramientas digitales, el funcionamiento de centros de acopio, el desarrollo de campañas de educación ambiental y el acompañamiento técnico a los productores. Estos recursos se enmarcan en un esquema de corresponsabilidad, coherente con el principio de responsabilidad extendida del productor, en el que confluyen aportes de fabricantes, importadores y comercializadores de agroquímicos, así como recursos públicos orientados al fortalecimiento ambiental, rural y territorial. La sostenibilidad financiera del sistema exige, además, la evaluación periódica de costos operativos, la eficiencia en el uso de los recursos y la implementación de mecanismos económicos que incentiven la participación de los productores, especialmente de aquellos de pequeña y mediana escala.

En cuanto a los recursos técnicos y logísticos, la hoja de ruta supone la disponibilidad de infraestructura física adecuada, capacidades operativas, talento humano capacitado y sistemas de información que garanticen la trazabilidad, el control y el seguimiento del flujo de envases vacíos desde su generación hasta su tratamiento final. Esto incluye la operación de centros de acopio fijos y dispositivos móviles, la planificación y optimización de rutas de transporte, el uso de vehículos autorizados para el manejo de residuos peligrosos, la estandarización de protocolos técnicos y la articulación con gestores posconsumo habilitados. La suficiencia y calidad de estos recursos condicionan directamente la viabilidad operativa del sistema y su capacidad para alcanzar coberturas territoriales amplias, particularmente en zonas rurales dispersas.

De manera complementaria, la implementación de la hoja de ruta requiere el establecimiento de un conjunto de indicadores de seguimiento y evaluación que permitan monitorear su desempeño y orientar procesos de mejora continua. Estos indicadores deben abarcar dimensiones operativas,

ambientales, económicas e institucionales, tales como tasas de recolección y retorno de envases, cobertura territorial del sistema, cumplimiento de metas por región y tipo de cultivo, eficiencia logística, niveles de participación de los productores, reducción de prácticas inadecuadas de disposición y fortalecimiento de capacidades locales. La definición y medición sistemática de estos indicadores resulta fundamental para la rendición de cuentas, la transparencia del sistema y la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades y los actores involucrados.

Asimismo, la hoja de ruta se estructura bajo un enfoque de implementación gradual, reconociendo que las estrategias propuestas no pueden desplegarse de manera simultánea ni homogénea en todo el territorio nacional. En el corto plazo, se priorizan acciones orientadas al fortalecimiento institucional, la armonización normativa, el diseño e implementación de proyectos piloto, la sensibilización de los actores locales y el establecimiento de mecanismos básicos de seguimiento. En el mediano plazo, se proyecta la consolidación de la infraestructura logística, la ampliación de la cobertura del sistema posconsumo, la integración progresiva de herramientas digitales y el fortalecimiento de los esquemas de incentivos económicos. Finalmente, en el largo plazo, apunta a la maduración del sistema mediante la optimización de los mecanismos de gobernanza, la sostenibilidad financiera, la evaluación integral de impactos ambientales y sociales, y la articulación con procesos de transición hacia modelos productivos de menor dependencia de agroquímicos sintéticos.

Bajo este enfoque, la hoja de ruta no se limita a un listado de acciones, sino que se configura como un marco estratégico flexible, susceptible de ser ajustado y actualizado a partir de los resultados del seguimiento, la evolución del marco normativo y las dinámicas productivas y territoriales. De esta manera, se fortalece su pertinencia como instrumento para orientar políticas públicas, programas sectoriales y proyectos territoriales, asegurando su coherencia con los

principios de economía circular, sostenibilidad ambiental y desarrollo rural en el contexto colombiano.

8. Conclusiones

Este trabajo de grado permitió analizar de manera sistemática los aportes investigativos sobre la gestión de residuos agroquímicos, con especial énfasis en el manejo de envases vacíos. Los resultados evidencian que esta problemática es compleja y multidimensional, y que no puede abordarse únicamente desde perspectivas técnicas o normativas. El análisis bibliográfico también mostró un aumento sostenido de publicaciones en los últimos años, lo que da cuenta de un creciente interés académico y social por los impactos ambientales, sanitarios y productivos asociados al uso intensivo de agroquímicos en los sistemas agrícolas.

La revisión de la literatura permitió identificar cuatro enfoques predominantes: ambiental, tecnológico, regulatorio y socioeconómico que, si bien han contribuido de manera significativa a la comprensión del fenómeno, suelen abordarse de forma fragmentada. En particular, se evidenció que la mayoría de los estudios se centran en la evaluación de la contaminación de suelos y cuerpos de agua, el análisis de riesgos para la salud humana y el desarrollo de métodos de detección, mientras que los aspectos relacionados con la gestión posconsumo, la trazabilidad de envases, la logística rural y la participación comunitaria reciben una atención limitada. Esta desarticulación limita la capacidad de la investigación para generar soluciones integrales y aplicables en contextos territoriales específicos, como el colombiano.

Desde una perspectiva geográfica, los resultados muestran que países con agricultura intensiva y marcos regulatorios consolidados, como Estados Unidos, Brasil, China y varias naciones europeas, lideran la producción científica y el desarrollo de modelos de gestión posconsumo. No obstante, las experiencias más transferibles al contexto colombiano provienen de países que enfrentan desafíos estructurales similares, especialmente en América Latina y otras regiones en

desarrollo, destacando la importancia de adaptar los sistemas de gestión a las condiciones socioprodutivas, institucionales y culturales del territorio, en lugar de replicar de forma directa modelos diseñados para contextos altamente industrializados.

El análisis de vacíos de investigación permitió establecer que, a pesar de la existencia de normativa y programas formales de posconsumo, persiste una escasa evidencia empírica sobre su implementación, eficacia territorial y barreras para la adopción por parte de los productores. En particular, se identificaron vacíos significativos en la trazabilidad de los envases a lo largo de la cadena productiva, la operación logística en zonas rurales, los factores socioculturales que condicionan la devolución de envases y en la medición comparativa del desempeño de los modelos de responsabilidad extendida del productor. Estos vacíos constituyen oportunidades estratégicas para el desarrollo de nuevas líneas de investigación aplicada, que fortalezcan la gestión ambiental en el sector agrícola colombiano.

En relación con la integración de herramientas tecnológicas, se evidencian avances importantes en métodos analíticos y de laboratorio; sin embargo, son aún limitados los estudios que exploran sistemas digitales de monitoreo continuo, plataformas de trazabilidad, modelos predictivos basados en inteligencia artificial o soluciones interoperables que conecten a productores, gestores y autoridades. La incorporación de estas herramientas representa una oportunidad clave para mejorar eficiencia, transparencia y rendición de cuentas en los sistemas de gestión posconsumo, especialmente en contextos rurales con infraestructura limitada.

Asimismo, la investigación permitió concluir que la participación comunitaria y los enfoques socioculturales constituyen un componente esencial pero poco explorado en la gestión de residuos agroquímicos. Si bien existen iniciativas relevantes de educación ambiental, apropiación social del

conocimiento y trabajo con grupos de interés, estas se encuentran fragmentadas, con alcance limitado y sin evaluaciones sistemáticas que permitan medir su impacto real. Este déficit evidencia la necesidad de incorporar de manera estructurada los factores culturales, sociales y de género, así como los mecanismos de cooperación comunitaria y el papel de las economías campesinas, en el diseño e implementación de estrategias de gestión de residuos. Fortalecer este componente no solo aumentaría la efectividad de las políticas y programas, sino que también contribuiría a su legitimidad social y sostenibilidad territorial, asegurando que las acciones respondan a las necesidades y capacidades de las comunidades involucradas.

A partir de los hallazgos, se planteó una hoja de ruta estratégica para el manejo integral de residuos agroquímicos y envases vacíos en Colombia, articulando gobernanza, logística, incentivos económicos, herramientas digitales y participación comunitaria. Esta propuesta reconoce que la problemática no se origina únicamente en la falta de normativa, sino en la debilidad de los mecanismos de implementación, coordinación interinstitucional y apropiación territorial. Asimismo, se destaca que la transición hacia el uso de bioinsumos y alternativas de menor impacto ambiental constituye una oportunidad estratégica para reducir la generación de residuos peligrosos, siempre que se acompañe de investigación aplicada, validación técnica y fortalecimiento institucional.

Finalmente, se concluye que la gestión sostenible de los residuos agroquímicos y envases vacíos en Colombia requiere un abordaje sistémico que integre conocimiento científico, capacidades institucionales y dinámicas sociales del territorio. La investigación aporta una base conceptual y metodológica que puede orientar la formulación de políticas públicas, programas sectoriales y futuras investigaciones, contribuyendo a avanzar hacia modelos de producción

agrícola más sostenibles, responsables y coherentes con los principios de la economía circular y el desarrollo sostenible.

9. Propiedad Intelectual y Confidencialidad

La titularidad de los derechos de propiedad intelectual se determinará de conformidad con el Estatuto de Propiedad Intelectual de la Universidad Pontificia Bolivariana y las leyes vigentes sobre la materia. En todo caso, los derechos morales corresponderán siempre a los creadores del Proyecto de Grado y éstos serán debidamente reconocidos para cualquier uso que se haga de la creación intelectual de que se trate.

Se recomienda guardar reserva de la información confidencial relativa al Proyecto de Grado, pues tal reserva puede ser fundamental para efectos de la protección de las creaciones intelectuales derivadas del mismo, por la vía de la propiedad intelectual.

10. Concepto ético

En el desarrollo del presente trabajo de grado, las investigadoras nos comprometemos a abordar el tema central con la máxima objetividad, evitando cualquier sesgo que pueda influir en la interpretación de los datos o en la presentación de las distintas perspectivas del estudio. Para el equipo, es indispensable respetar los derechos de autor y seguir las normativas de citación correspondientes para garantizar que se dé el crédito adecuado a trabajos de otros autores y de esta manera evitar el plagio.

Además, es fundamental considerar los efectos que nuestras actividades podrían generar tanto en el corto como en el mediano y largo plazo, tanto sobre el ambiente como las personas y comunidades que se puedan ver involucradas con la investigación.

El trabajo de investigación se llevará a cabo observando las normativas éticas y legales relacionadas con la protección de datos personales, la confidencialidad de la información de las personas y entidades involucradas en el estudio.

11. Referencias

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. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29128>

Alfonso, F. L., & Toro, I. (2010). Riesgo ambiental por el uso de agroquímicos. Ministeriom de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/En-el-primer-trimestre-de-2024,-el-agro-jalon%C3%B3-la-econom%C3%ADa,-al-registrar-un-crecimiento-del-5,5.aspx>

Aragos, K. P. C., Filho, L. R. A. G., & Braga, S. S., Junior. (2021). Logística reversa de embalagens vazias de agrotóxicos e as dificuldades para efetiva implantação. *Research Society And Development*, *10*(2), e52210212921. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12921>

Ariza, O., & Díaz, D. (2021). *Plan de gestión para el manejo de envases y empaques de agroquímicos, caso piloto finca Santa María ubicada en la vereda Limoncito, Pacho – Cundinamarca* [Tesis de pregrado, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia]. Repositorio Universidad El Bosque. <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/d419890b-b275-4782-b240-278e254e0594>

Bahrulolum, H., Nooraei, S., Javanshir, N., Tarrahimofrad, H., Mirbagheri, V. S., Easton, A. J., & Ahmadian, G. (2021). Green synthesis of metal nanoparticles using microorganisms and their application in the agrifood sector. *Journal Of Nanobiotechnology*, 19(1), 86. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-00834-3>

Bai, S. H., & Ogbourne, S. M. (2016). Glyphosate: environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination. *Environmental Science And Pollution Research*, 23(19), 18988-19001. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7425-3>

Bexfield, L. M., Belitz, K., Lindsey, B. D., Toccalino, P. L., & Nowell, L. H. (2020). Pesticides and Pesticide Degradates in Groundwater Used for Public Supply across the United States: Occurrence and Human-Health Context. *Environmental Science & Technology*, 55(1), 362-372. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05793>

Braga Marsola, K., Leda Ramos de Oliveira, A., Filassi, M., Elias, AA y Andrade Rodrigues, F. (2021). *Logística inversa de envases vacíos de pesticidas: ¿solución o problema?* Revista Internacional de Ingeniería Sostenible, 14 (6), 1451–1462. <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.2001605>

Cabrera, L. C., Di Piazza, G., Dujardin, B., Marchese, E., & Pastor, P. M. (2025). The 2023 European Union report on pesticide residues in food. *EFSA Journal*, 23(5), e9398. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2025.9398>

Campoverde, J., Carrillo, M., Jiménez, J., Roldán, R., Loyola, D., & Coronel, K. (2022). *Revisión de la literatura sobre logística inversa, sus aplicaciones y tendencias futuras*. Enfoque UTE; Universidad UTE 13(2), 31-47.

<https://doi.org/10.29019/ENFOQUEUTE.782>

Campolimpio. (s.f.). Triple lavado. *Campolimpio*. <https://campolimpio.org/triple-lavado/>

CampoLimpio. (s.f.). Gestión de residuos. <https://campolimpio.org/gestion-de-residuos/>

Casallanovo, F., Simone, D. M., Santos, G. S., Kaminski, T. S. O., Cione, A. P., & Peranginangin, N. (2021). *Estimating pesticide environmental concentrations in Latin America: The importance of developing local scenarios*. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17(5), 901–904. <https://doi.org/10.1002/ieam.4396>

Castro López, C. R., & Castillo Rodríguez, L. M. (2024). Contaminantes orgánicos persistentes: Impactos y medidas de control. *Manglar*, 21(1), 135-148. <https://doi.org/10.57188/manglar.2024.014>

Chandler, D., Bailey, A. S., Tatchell, G. M., Davidson, G., Greaves, J., & Grant, W. P. (2011). The development, regulation and use of biopesticides for integrated pest management. *Philosophical Transactions Of The Royal Society B Biological Sciences*, 366(1573), 1987-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0390>

Chaka, B., Osano, A. M., Wesley, O. N., & Forbes, P. B. C. (2023). Seasonal variation in pesticide residue occurrences in surface waters found in Narok and Bomet Counties, Kenya. *Environmental Monitoring And Assessment*, 195(9), 1050. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11629-4>

Chen, S., Bo, X., & Xu, Z. (2024). Mapping pesticide residues in soil for China: Characteristics and risks. *Journal Of Hazardous Materials*, 479, 135696. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135696>

Congreso de la República. (05 de junio de 2008). Ley 1196 de 2008. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=38387>

Cortolima. (2025). *Compolimpo – Programa de recolección selectiva de envases y empaques de agroquímicos*. Corporación Autónoma Regional del Tolima. <https://cortolima.gov.co/test/4382-compolimpo-programa-de-recoleccion-selectiva-de-envases-y-empaques-de-agroquimicos>

CVC. (2022). *Más de una tonelada de envases de agroquímicos y bolsas de plátano fueron recolectadas en El Águila*. <https://www.cvc.gov.co/boletin-prensa-266-2022>

Cuayla Flores, J. D., & Torres Lizarraga, J. M. (2021). *Diagnóstico del manejo de los residuos sólidos de agroquímicos en la actividad agrícola de la sección D-1 irrigación Majes*. Universidad

<https://agris.fao.org/search/es/records/67659dc0c0e94e3bc291b0b0>

Da Silva, J. M., Dalbon, V. A., Alves, A. C., Ataíde, C. B., Santos, T. M. C. D., Costa, M. E. L., & Montaldo, Y. C. (2025). Bioinputs in Sustainable Agriculture: Benefits, Challenges, and Pathways for Resilient Farming Systems. *Asian Journal Of Research In Crop Science*, 10(2), 85-97. <https://doi.org/10.9734/ajrcs/2025/v10i2354>

Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide Exposure, Safety Issues, and Risk Assessment Indicators. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 8(5), 1402-1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>

Del Puerto Rodríguez, A. M., Suárez Tamayo, S., & Palacio Estrada, D. E. (2014). Efectos de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(3), 372-387. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1561-30032014000300010

Del Rio Osorio, L. L., Flórez-López, E., & Grande-Tovar, C. D. (2021). The Potential of Selected Agri-Food Loss and Waste to Contribute to a Circular Economy: Applications in the Food, Cosmetic and Pharmaceutical Industries. *Molecules*, 26(2), 515. <https://doi.org/10.3390/molecules26020515>

Estremadoyro, J. (2021). Impacto de la toxicidad de los residuos sólidos generados por plaguicidas. *Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 9, 124-139. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202201.006>

Fenner, K., Canonica, S., Wackett, L. P., & Elsner, M. (2013). Evaluating Pesticide Degradation in the Environment: Blind Spots and Emerging Opportunities. *Science*, *341*(6147), 752-758. <https://doi.org/10.1126/science.1236281>

Finger, R., Swinton, S. M., Benni, N. E., & Walter, A. (2019). Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. *Annual Review Of Resource Economics*, *11*(1), 313-335. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *International Code of Conduct on Pesticide Management*. <https://doi.org/10.4060/cb3179en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The future of agriculture and environmental sustainability*. <https://www.fao.org/global-perspectives-studies/fofa/en/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *Pesticides use and trade, 1990–2023*. FAOSTAT Highlights. <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/pesticides-use-and-trade-1990-2023/>

García, J. (2018). Estado del arte de los contaminantes orgánicos persistentes (COP) en Colombia entre los años 2007-2017. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. <https://repository.udistrital.edu.co/items/4d08db5a-aaaa-42d4-8641-b82325791056>

Galimberti, F., Bopp, S., Carletti, A., Catarino, R., Claverie, M., Florio, P., Ippolito, A., Jones, A., Marchetto, F., Olvedy, M., Pistocchi, A., Verhegghen, A., Marijn, V. D. V., Vieira, D., & D'Andrimont, R. (2025). Development of a spatial risk indicator for monitoring residential pesticide exposure in agricultural areas. *Scientific Reports*, *15*(1), 16785. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96928-1>

Gallego, L. A., & Portilla, S. A. (2020). Evaluación del manejo de los residuos peligrosos provenientes de la actividad agrícola de cultivo de papa en el corregimiento de Gabriel López (Totoró - Cauca). *Universidad Autónoma del Caribe*. <https://repositorio.uniautonoma.edu.co/handle/123456789/334>

Gómez, M., Galeano, C., & Jaramillo, D. (2015). El estado del arte: una metodología de investigación. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, *6*(1), 101-120. https://revistas.ucatolicaluisamigo.edu.co/index.php/RCCS/article/view/1469/pdf_26

Guerra, V. (2020). Camas biológicas: una herramienta versátil y proactiva para el uso adecuado de fitosanitarios. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*. https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/7941/RIA_VOLUMEN46_N%20c2%b02_p.140-144.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Guevara Patiño, R. G. (2016). El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? *Revista Folios*, *1*(44), 165- 179. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=345945922011>

Guzmán-Bejarano, D., Figueroa-Del-Castillo, L., & Cabezas, L. (2020). Análisis de los efectos generados en el suelo a causa de la inadecuada disposición de envases de agroquímicos en la vereda Lavadero, Fómeque, Cundinamarca, Colombia. *Gestión Ambiente*, 23(2), 250-272. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.91063>

Hasan, M. K., Shahriar, A., & Jim, K. U. (2019). Water pollution in Bangladesh and its impact on public health. *Heliyon*, 5(8), e02145. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02145>

Hikal, W. M., Baeshen, R. S., & Ahl, H. A. S. (2017). Botanical insecticide as simple extractives for pest control. *Cogent Biology*, 3(1), 1404274. <https://doi.org/10.1080/23312025.2017.1404274>

Huang, S., & Elahi, E. (2022). Farmers' Preferences for Recycling Pesticide Packaging Waste: An Implication of a Discrete Choice Experiment Method. *Sustainability*, 14(21), 14245. <https://doi.org/10.3390/su142114245>

Instituto Colombiano Agropecuario – ICA. (25 de marzo de 2010). Resolución 1167 de 2010. https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/compilacion/docs/resolucion_ica_1167_2010.htm

Instituto Colombiano Agropecuario – ICA. (09 de febrero de 2022) Resolución 1580 de 2022. <https://www.ica.gov.co/getattachment/47f7d0ad-5c7c-4361-b4ad->

c55badb7ee7b/2022R1580.aspx

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2024). *Registro y regulación de bioinsumos agrícolas en Colombia*. <https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/fertilizantes-y-bioinsumos-agricolas>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (18 de enero de 2024). Resolución 063 de 2024. https://ideam.gov.co/sites/default/files/normatividad/resolucion_ndeg_063_del_18_de_enero_de_2024.pdf

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2022). *Bioinsumos y sostenibilidad agrícola en América Latina y el Caribe*

Jaller, E. (2019). Estrategia de educación ambiental para el mejoramiento del buen manejo de envases vacíos de agroquímicos en el corregimiento Las Delicias del municipio de Ayapel-Córdoba. *Universidad Santo Tomás*. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/17614/2019erikajaller.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Kumar, S., & Maanju, S. (2022). *Global scenario of pesticide use pattern*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/381397025_Global_Scenario_of_Pesticide_Use_Pattern

Kumar, D. (2025). Microbe-driven valorisation of bio-waste for biofertilizer production: A comprehensive review. *Sustainable Chemistry For Climate Action*, 7, 100158. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100158>

Lee, H., Lee, E., & Ki, S. (2025). Comprehensive evaluation of pesticide residues in soil and water through monitoring, environmental risk assessment, and AI predictive modeling. *The Science Of The Total Environment*, 1003, 180599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180599>

Londoño, A., Restrepo, B., Sánchez, J., García, A., Bayona, A., & Landázuri, P. (2018). Plaguicidas e hipotiroidismo en agricultores en zonas de cultivo de plátano y café, en Quindío, Colombia. *Revista de Salud Pública*. (s. f.).

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/57694/68314>

López Vargas, L. E., Patiño, M. C., & Samboni, Y. P. (2025). Gestión y conocimiento de los residuos peligrosos en el Departamento de Biología de la Universidad del Cauca, Colombia. *Revista Mutis*, 15(1), 1–22.

Lozada, C. (2011). Evaluación ambiental estratégica de la política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos en Colombia [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8792/Tesis%20de%20Maestri%cc%81a%20en%20Medio%20Ambiente%20y%20Desarrollo.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Lykogianni, M., Bempelou, E., Karamaouna, F. y Aliferis, KA (2021). ¿Los pesticidas promueven o dificultan la sostenibilidad en la agricultura? El desafío del uso sostenible de pesticidas en la agricultura moderna. *The Science of the Total Environment* , 795 (148625), 148625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148625>

Mac Loughlin, T. M., Peluso, M. L., Etchegoyen, M. A., Alonso, L. L., De Castro, M. C., Percudani, M. C., & Marino, D. J. (2018). Pesticide residues in fruits and vegetables of the argentine domestic market: Occurrence and quality. *Food Control*, 93, 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.05.041>

Marnasidis, S., Stamatelatos, K., Verikouki, E., & Kazantzis, K. (2018). Assessment of the generation of empty pesticide containers in agricultural areas. *Journal of Environmental Management*, 224, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.012>

Marques, M. D., Martínez, M. P., Braga, S. S., Junior, Cataneo, P. F., & Da Silva, D. (2017). Logística inversa de envases de plaguicidas: percepción de los pequeños y medianos productores agrícolas. *Exacta*, 15(2), 353-368. <https://doi.org/10.5585/exactaep.v15n2.7170>

Marsola, K. B., De Oliveira, A. L. R., & Neto, B. (2022). Life Cycle Assessment of reverse logistics of empty pesticide containers in Brazil: assessment of current and previous management practices. *Production*, 32. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210105>

Masís, F., Valdez, J., Coto, T., & León, S. (2008). *Residuos de agroquímicos en sedimentos de ríos, Poás, Costa Rica*. *Revista de Biología Tropical*, 56(4), 1687–1696.

<https://www.redalyc.org/pdf/436/43632111.pdf>

Michemberg Conti, E. J. S., & Miguens, J. (2017). *Modelo de logística inversa para la recolección de bidones de agroquímicos: Logística sustentable* [Tesis de maestría, Universidad Católica Argentina]. Repositorio Universidad Católica de Argentina. <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/logisticainversa-recoleccion-bidones.pdf>

Ministerio de Agricultura. (2024). En el primer trimestre de 2024, el agro jalonó la economía. <https://fucn.instructure.com/courses/22381/assignments/296676>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2023). *Política para la transición hacia sistemas agroalimentarios sostenibles*. [https://www.minagricultura.gov.co/planeacion-control-gestion/Gestin/PLANEACION/Plan_de_Accion_\(Plan_Gasto_Publico\)/2023/PLAN_DE_ACCION_INSTITUCIONAL_VIGENCIA_2023_V3.pdf](https://www.minagricultura.gov.co/planeacion-control-gestion/Gestin/PLANEACION/Plan_de_Accion_(Plan_Gasto_Publico)/2023/PLAN_DE_ACCION_INSTITUCIONAL_VIGENCIA_2023_V3.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Envases de plaguicidas. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/envases-de-plaguicidas/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (26 de mayo de 2015). Decreto 1076 de 2015. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (07 de mayo de 2004). Decreto

1443 de 2004. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/decreto-1443-de-2005.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (30 de diciembre de 2005). Decreto 4741 de 2005. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/4741%20-%202005.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (02 de diciembre de 2013). Resolución 1675 de 2013. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-1675-de-2013.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (02 de agosto de 2007). Resolución 1362 de 2007. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=26053>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (30 de marzo de 2007). Resolución 0062 de 2007. https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/7.-Resolucion-0062-de2007_Protocolos-de-muestreo-y-caracterizacion-de-RESPEL.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social. (29 de diciembre de 2018). Decreto 2501 de 2018. https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Decreto%202501%20de%202018.pdf

Mittal, D., Kaur, G., Singh, P., Yadav, K., & Ali, S. A. (2020). Nanoparticle-Based Sustainable Agriculture and Food Science: Recent Advances and Future Outlook. *Frontiers In Nanotechnology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fnano.2020.579954>

Montes, Z., & Rodríguez, M. (2021). *La logística inversa en el manejo de los residuos de empaques y embalajes en el contexto del COVID-19*. *Revista Vértice Universitario*, 23(91), 3–13. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2683-26232021000300003

Moreno, A. (2020). Estudio para la identificación de alternativas para la disposición de los envases vacíos de agroquímicos. [Tesis de pregrado, Universidad de Cundinamarca] Repositorio Universidad de Cundinamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.12558/3927>

Muñoz-Bautista, J. M., Bernal-Mercado, A. T., Martínez-Cruz, O., Burgos-Hernández, A., López-Zavala, A. A., Ruiz-Cruz, S., De Jesús Ornelas-Paz, J., Borboa-Flores, J., Ramos-Enríquez, J. R., & Del-Toro-Sánchez, C. L. (2025). Environmental and Health Impacts of Pesticides and Nanotechnology as an Alternative in Agriculture. *Agronomy*, 15(8), 1878. <https://doi.org/10.3390/agronomy15081878>

Obar, J. A., Kwoba, E., Omosa, E., Ekaya, W., Fevre, E., & Onono, J. (2025). Analysis of alpha-cypermethrin pesticide residues along the value chain of tomato from Laikipia County, Kenya. *Pest Management Science*, 82(1), 552-559. <https://doi.org/10.1002/ps.70215>

Ortega Riascos, C. E., & Castaño Gaviria, L. C. (2023). *Gestión de residuos de agroquímicos en las zonas rurales de Colombia*. [Trabajo de grado especialización Universidad de Antioquia, Colombia] Repositorio Universidad de Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/37880/1/CastañoLauraOrtegaCristian_

2023_ResiduosagroquímicosColombia.pdf

Pacheco, R., & Barbona, E. (2017). Manual de uso seguro y responsable de agroquímicos en cultivos frutihortícolas. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina*.
<http://hdl.handle.net/20.500.12123/992>

Padilha Neto, A. de S., Santos, M. H. L. C., & Pacheco, C. S. G. R. (2025). *O descarte de embalagens plásticas vazias de agrotóxicos no Brasil: uma revisão sistemática da literatura*. *Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental*, 29(3), 1–26.
https://www.researchgate.net/publication/392403009_O_descarte_de_embalagens_plasticas_vazias_de_agrotoxicos_no_Brasil_uma_revisao_sistematica_da_literatura

Pérez-Lucas, G., Martínez-Zapata, A., & Navarro, S. (2025). Valorization of Agro-Industrial Wastes as Organic Amendments to Reduce Herbicide Leaching into Soil. *Journal Of Xenobiotics*, 15(4), 100. <https://doi.org/10.3390/jox15040100>

Raza, A., Naqvi, S. A. A., Mehdi, M. A., Usman, M., Ali, S., Shah, A. A., & Hussain, B. (2022). *An Analysis of the Circular Economy Practices of Pesticide Container Waste in Pakistan*. *Recycling*, 8(1), 4. <https://doi.org/10.3390/recycling8010004>

Rodrigues, A., Lima, M. C., Santos, M. A. D., Santos, D. M., De Lira Freitas, A., De Carvalho Filho, Á. M., De Vasconcelos Freitas Pinto, A., & De Holanda Leite, M. J. (2022). Uso de agrotóxicos e descarte de resíduos agrícolas no Brasil. *Research Society And Development*, 11(7),

e46511730329. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.30329>

Salamanca, G. (2020). *Efecto de los agroquímicos en salud pública y medio ambiente*. Agroquímicos En Salud Pública y Medio Ambiente. <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/54a0246d-d63c-465b-aba2-c3349428c1d5/content>

Salcedo Monsalve, A & Melo Trujillo, O (2005). Evaluación del uso de plaguicida en la actividad agrícola del departamento de Putumayo. *Revista Ciencias de la Salud*, 3(2), 168-185 http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-72732005000200007&script=sci_arttext

Servicio de Información y Noticias Científicas [SINC]. (2022). Los países del mundo que acumulan más residuos peligrosos. *National Geographic España*. https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/paises-mundo-que-acumulan-masresiduos-peligrosos_18100

Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, A. S., Parihar, R. D., Dar, O. I., Singh, K., Jasrotia, S., Bakshi, P., Ramakrishnan, M., Kumar, S., Bhardwaj, R., & Thukral, A. K. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, 1(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1>

Shen, S. (2023). Types and Benefits of Agrochemicals in Enhancement of Agricultural Productivity and Sustainability. *Journal of Agriculture and Allied Sciences*, 12(2), 43–44. <https://doi.org/10.4172/2347-226X.12.2.006>

Silva- Rodriguez, J. D. (2017). Diseño de una red de logística inversa: Caso de estudio Usochicamocha – Boyacá. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26), 91–113. <https://doi.org/10.17230/INGCIENCIA.13.26.4>

Sorichetti, A. E., Prieto, M. G., Savoretti, A. A., Barbosa, S. E., & Bandoni, J. A. (2024). Reverse logistics for empty pesticide containers: optimal design for sustainable management over wide areas. *Environment Development And Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05374-y>

Thapa, S., & Pandey, P. R. (2025). Monitoring Pesticide Residues in Nepal's Fruits and Vegetables : A Review of Practices, Gaps, and Solutions. *Nepalese Horticulture/Nepalese Horticulture*, 19(1), 31-42. <https://doi.org/10.3126/nh.v19i1.86688>

Universidad Pontificia Bolivariana. (s. f.). *Ruta UPB para la apropiación social del conocimiento en investigación*. UPB. <https://www.upb.edu.co/es/documentos/doc-ruta-asc-inv-1464268865487.pdf>

Vásquez, H. E. (2014). Plan de manejo integral de residuos peligrosos RESPEL (envase de agroquímico) generados en el sector agrícola y/o agropecuario del corregimiento de Guabitas, municipio de Guacarí - Valle del Cauca [Tesis de pregrado, Universidad Central del Valle del Cauca]. Repositorio Universidad Central del Valle del Cauca. <https://repositorio.uceva.edu.co/bitstream/handle/20.500.12993/93/T0026577.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Vera-Candiotti, J., Araujo, P. I., Huerga, I. R., Rojas, D. E., Cristos, D. S., & Malmantile, A. D. (2021). Pesticides detected in surface and groundwater from agroecosystems in the Pampas

region of Argentina: occurrence and ecological risk assessment. *Environmental Monitoring And Assessment*, 193(10), 689. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09462-8>

Yan, L., Zhao, X., Zhang, D., Deng, J. y Zhang, Y. (2022). *Factores asociados al comportamiento de reciclaje de residuos de envases de pesticidas basados en la teoría del comportamiento planificado en fruticultores chinos*. *Sustainability*, 14 (17), 10937. <https://doi.org/10.3390/su141710937>

Zhang, P., Guo, Z., Ullah, S., Melagraki, G., Afantitis, A., & Lynch, I. (2021). Nanotechnology and artificial intelligence to enable sustainable and precision agriculture. *Nature Plants*, 7(7), 864-876. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00946-6>

Zhou, Y., & Rao, F. (2025). Sowing the seeds of sustainability: a deep dive into farmers' recycling practices of pesticide packaging waste in China. *Frontiers In Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1453656>