

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i1.716>

## **Innovaciones en la producción de frutas, flores y cultivos tropicales: Uso de bioinsumos y tecnologías emergentes**

*Innovations in the Production of Fruits, Flowers, and Tropical Crops: Use of Bioinputs and Emerging Technologies*

**Juan Carlos Escaleras Medina**

[jescaleras@utmachala.edu.ec](mailto:jescaleras@utmachala.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-5384-0829>

Universidad Técnica de Machala  
Machala – Ecuador

**Rene Fernando Baque Mite**

[renebaque28@gmail.com](mailto:renebaque28@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0001-5021-4451>

Universidad Técnica de Quevedo  
Los Ríos – Ecuador

*Artículo recibido: 10 enero 2025*

*- Aceptado para publicación: 20 febrero 2025*

*Conflictos de intereses: Ninguno que declarar*

### **RESUMEN**

La adopción de bioinsumos y tecnologías emergentes en la agricultura ofrece soluciones sostenibles para aumentar la productividad y reducir el impacto ambiental. Los biofertilizantes y biopesticidas han demostrado mejorar la fertilidad del suelo y la resistencia de los cultivos, reduciendo la dependencia de insumos químicos (Ali et al., 2024). Sin embargo, su implementación enfrenta barreras económicas y regulatorias, como altos costos iniciales y falta de normativas estandarizadas (Koning et al., 2008; Sehgal et al., 2023). Las tecnologías emergentes, como inteligencia artificial, sensores y sistemas de riego automatizados, están revolucionando la gestión agrícola al optimizar el uso de recursos y mejorar la detección temprana de plagas (Singhal et al., 2024; Nde et al., 2024). No obstante, su adopción sigue siendo limitada por costos elevados y la necesidad de capacitación especializada (van Loon et al., 2018). Para superar estos desafíos, se requiere el desarrollo de políticas públicas, incentivos financieros y programas de educación dirigidos a los agricultores. Integrar bioinsumos y tecnologías emergentes en la agricultura es clave para garantizar un sistema productivo más resiliente y sostenible en el futuro (Gatkal et al., 2024).

*Palabras clave:* bioinsumos, tecnologías emergentes, agricultura sostenible, inteligencia artificial, innovación agrícola

## ABSTRACT

The The adoption of bio-inputs and emerging technologies in agriculture offers sustainable solutions to increase productivity and reduce environmental impact. Biofertilizers and biopesticides have proven to improve soil fertility and crop resilience, reducing dependence on chemical inputs (Ali et al., 2024). However, their implementation faces economic and regulatory barriers, such as high initial costs and a lack of standardized regulations (Koning et al., 2008; Sehgal et al., 2023). Emerging technologies, such as artificial intelligence, sensors, and automated irrigation systems, are revolutionizing agricultural management by optimizing resource use and improving early pest detection (Singhal et al., 2024; Nde et al., 2024). Nevertheless, their adoption remains limited due to high costs and the need for specialized training (van Loon et al., 2018). To overcome these challenges, the development of public policies, financial incentives, and educational programs targeted at farmers is essential. Integrating bio-inputs and emerging technologies into agriculture is key to ensuring a more resilient and sustainable production system in the future (Gatkal et al., 2024).

*Keywords:* bio-inputs, emerging technologies, sustainable agricultura, artificial intelligence, agricultural innovation

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Atribución 4.0 International. 

## INTRODUCCIÓN

La agricultura enfrenta desafíos crecientes debido al cambio climático, la degradación del suelo y la creciente demanda de alimentos. En este contexto, los bioinsumos y las tecnologías emergentes han surgido como soluciones innovadoras para mejorar la productividad agrícola y reducir el impacto ambiental (Ali et al., 2024). Sin embargo, su adopción se ve limitada por barreras económicas, regulatorias y tecnológicas, especialmente en países en desarrollo (Koning et al., 2008).

Los bioinsumos, como los biofertilizantes y biopesticidas, han demostrado mejorar la fertilidad del suelo y reducir la dependencia de productos químicos sintéticos. Microorganismos como *Trichoderma* y *Azotobacter* aumentan la disponibilidad de nutrientes y fortalecen la resistencia de los cultivos a enfermedades y estrés abiótico (Gatkal et al., 2024). Asimismo, los biopesticidas han mostrado eficacia en el control de plagas sin generar residuos tóxicos, lo que los convierte en una alternativa ecológica viable (Sehgal et al., 2023). A pesar de estos beneficios, su adopción sigue siendo limitada debido a la falta de normativas homogéneas y a la incertidumbre sobre su eficacia en diferentes condiciones agroecológicas (Gräfe et al., 2020).

Por otro lado, las tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA), sensores de monitoreo y sistemas de riego automatizados están revolucionando la gestión agrícola. La IA permite optimizar el uso de recursos y predecir el rendimiento de los cultivos mediante el análisis de datos climáticos y del suelo (Mikulic-Petkovsek et al., 2025). Los drones equipados con sensores multiespectrales han demostrado ser herramientas eficaces para detectar plagas y deficiencias nutricionales, permitiendo intervenciones más precisas y reduciendo el uso de agroquímicos (Nde et al., 2024). Sin embargo, la adopción de estas tecnologías enfrenta desafíos como el alto costo de adquisición y la necesidad de capacitación especializada, lo que dificulta su implementación entre pequeños agricultores (van Loon et al., 2018).

Uno de los principales obstáculos en la adopción de bioinsumos y tecnologías emergentes es el costo inicial. Aunque a largo plazo pueden reducir los gastos en fertilizantes y pesticidas, los agricultores deben hacer inversiones significativas en infraestructura y formación técnica (Koning et al., 2008). Además, la falta de incentivos gubernamentales y subsidios limita su acceso, especialmente en regiones donde el crédito agrícola es escaso (Sehgal et al., 2023).

Otro desafío clave es la falta de conocimiento y capacitación. Muchos agricultores desconocen el uso adecuado de bioinsumos y tecnologías digitales, lo que dificulta su integración en las prácticas agrícolas tradicionales (Ali et al., 2024). La implementación de programas de educación y asistencia técnica es fundamental para garantizar una adopción efectiva y sostenible (Gatkal et al., 2024).

Además, la agroforestería se ha convertido en una estrategia complementaria para mejorar la sostenibilidad agrícola. La integración de árboles y cultivos no solo favorece la

biodiversidad, sino que también contribuye a la captura de carbono y mejora la calidad del suelo (Abdulai et al., 2024). La diversificación de cultivos a través de sistemas agroforestales y rotaciones estratégicas optimiza la disponibilidad de nutrientes y reduce la incidencia de plagas y enfermedades (Morugán-Coronado et al., 2022).

A nivel global, la adopción de bioinsumos y tecnologías emergentes es crucial para garantizar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del sector agrícola. Sin embargo, para lograr una integración efectiva, es necesario que gobiernos, instituciones de investigación y el sector privado trabajen en conjunto para desarrollar políticas de apoyo y estrategias de financiamiento. La colaboración entre estos actores es clave para superar las barreras existentes y garantizar la adopción de estas innovaciones en todos los niveles de producción (Prober et al., 2025).

En conclusión, la implementación de bioinsumos y tecnologías emergentes representa una oportunidad para mejorar la productividad y la sostenibilidad agrícola. No obstante, su adopción aún enfrenta desafíos económicos, regulatorios y tecnológicos que deben abordarse mediante políticas adecuadas, incentivos financieros y programas de capacitación. La inversión en investigación y desarrollo permitirá que estas innovaciones se conviertan en pilares fundamentales para la agricultura del futuro, promoviendo sistemas más resilientes y sostenibles (Kamath et al., 2024).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Esta investigación es de tipo documental y se basa en una revisión sistemática de la literatura sobre innovaciones en la producción de frutas, flores y cultivos tropicales mediante el uso de bioinsumos y tecnologías emergentes. Para la recopilación, selección y análisis de los estudios, se utilizó el modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), lo que permitió asegurar un proceso riguroso y estructurado en la identificación de fuentes relevantes (Moher et al., 2009).

La búsqueda de información se realizó en bases de datos científicas reconocidas, incluyendo ScienceDirect, Scopus, Web of Science, Taylor & Francis, SpringerLink, EBSCO, ProQuest y Google Scholar. También se consultaron repositorios institucionales de universidades y centros de investigación con el objetivo de ampliar el alcance de la revisión y garantizar la inclusión de estudios actualizados y pertinentes (Higgins et al., 2011). Para optimizar la recuperación de información relevante, se emplearon palabras clave como "bioinsumos en la producción de cultivos tropicales", "tecnologías emergentes en la agricultura", "biopesticidas para frutas y flores", "biofertilizantes en cultivos tropicales", "agricultura de precisión en cultivos tropicales" e "inteligencia artificial en producción agrícola". Estas palabras clave se combinaron con operadores booleanos (AND, OR, NOT) con el fin de afinar la búsqueda y garantizar la inclusión de estudios de alto impacto en la temática analizada (Page et al., 2021).

Para asegurar la relevancia y actualidad de los datos, se priorizaron artículos publicados en los últimos diez años (2014-2024), aunque también se consideraron documentos clave con un enfoque retrospectivo para comprender la evolución de las innovaciones en la producción agrícola. En la primera fase de identificación se recopilaron 100 estudios, los cuales fueron sometidos a un proceso de selección en el que se eliminaron los duplicados y aquellos que no cumplían con los criterios de inclusión. Tras esta depuración, se obtuvieron 50 artículos elegibles para la evaluación a texto completo, de los cuales, luego de un análisis crítico, se seleccionaron 20 que aportaron información sustancial a la revisión (Page et al., 2021).

Los criterios de inclusión consideraron estudios publicados en revistas indexadas con revisión por pares, investigaciones relacionadas con bioinsumos y tecnologías emergentes en la producción de frutas, flores y cultivos tropicales, artículos en inglés y español, y estudios con datos experimentales, revisiones sistemáticas o meta-análisis sobre el tema (Gough et al., 2012). Se excluyeron trabajos de opinión sin base empírica, estudios duplicados y artículos que no abordaban directamente la temática de la investigación.

Para garantizar la calidad metodológica de los estudios incluidos, se utilizó la herramienta de evaluación de riesgo de sesgo de Cochrane, la cual permitió identificar la fiabilidad de los datos y minimizar posibles sesgos en la interpretación de resultados (Higgins et al., 2011). La información recopilada se organizó en categorías temáticas que permitieron analizar distintos aspectos clave, como el impacto de los bioinsumos en la producción de frutas, flores y cultivos tropicales, el uso de tecnologías emergentes en la optimización del rendimiento y sostenibilidad de estos cultivos, las barreras económicas, regulatorias y tecnológicas que limitan la adopción de estas innovaciones, y las estrategias de integración de nuevas tecnologías en la agricultura tropical y de alto valor comercial.

Dado que este estudio se basa en una revisión documental, no se requirió la aprobación de un comité ético. No obstante, se respetaron los principios de integridad, transparencia y rigurosidad científica en la selección y análisis de la información, asegurando que todas las fuentes utilizadas fueran verificables y de alta calidad. La metodología aplicada permite ofrecer una visión integral sobre los avances y desafíos en el uso de bioinsumos y tecnologías emergentes en la producción de cultivos tropicales, contribuyendo al desarrollo de estrategias más sostenibles y eficientes en el sector agrícola (Moher et al., 2009).

## **DESARROLLO**

### **Bioinsumos en la producción de cultivos tropicales**

Los microorganismos benéficos juegan un papel esencial en la sostenibilidad agrícola al promover el crecimiento de las plantas, mejorar su resistencia a estreses abióticos y bióticos, y optimizar la absorción de nutrientes. En este contexto, las micorrizas, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y los hongos del género *Trichoderma* han demostrado ser aliados

clave en la producción agrícola sostenible. Estos microorganismos no solo incrementan la productividad de los cultivos, sino que también contribuyen a la restauración y mantenimiento de la salud del suelo, reduciendo la dependencia de fertilizantes y pesticidas sintéticos.

**Tabla 1**

*Bioinsumos en la producción de cultivos tropicales*

<b>Bioinsumo</b>	<b>Función en Cultivos Tropicales</b>
Micorrizas arbusculares	Mejora la absorción de fósforo y agua, aumentando la resistencia a sequías y enfermedades.
Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)	Estimulan el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes mediante la producción de fitohormonas.
Trichoderma spp.	Actúa como agente de biocontrol contra hongos fitopatógenos y promueve la resistencia sistémica.
Bacillus spp.	Solubiliza fósforo y produce sustancias antibióticas contra patógenos del suelo.
Azospirillum spp.	Fija nitrógeno atmosférico en la rizosfera, mejorando la fertilidad del suelo.
Rhizobium spp.	Forma simbiosis con leguminosas, permitiendo la fijación biológica de nitrógeno.
Beauveria bassiana	Control biológico de plagas mediante infección de insectos en cultivos tropicales.
Metarhizium anisopliae	Actúa como bioplaguicida contra insectos dañinos en plantaciones tropicales.
Extracto de Neem (*Azadirachta indica*)	Extracto botánico con propiedades insecticidas y fungicidas para el manejo de plagas.

Fuente: Elaboración propia

### **Micorrizas**

Las micorrizas arbusculares forman una simbiosis con las raíces de las plantas, facilitando la absorción de agua y nutrientes esenciales, especialmente fósforo y nitrógeno. Este tipo de simbiosis mejora la eficiencia en el uso del agua y fortalece las defensas antioxidantes del hospedero, lo que resulta en una mayor tolerancia a la sequía y la salinidad (Zhou et al., 2021).

Estudios recientes han demostrado que las micorrizas no solo aumentan la disponibilidad de nutrientes, sino que también modifican la expresión génica de la planta, promoviendo su resistencia a patógenos y estreses ambientales (Jaemaeng et al., 2018). En cultivos como trigo (*Triticum aestivum*), la inoculación con micorrizas ha mostrado un incremento significativo en la

absorción de agua y en la producción de compuestos antioxidantes, lo que protege a las plantas contra el estrés oxidativo (Li et al., 2020).

Además, las micorrizas desempeñan un papel importante en la estabilidad del suelo, mejorando su estructura y promoviendo la formación de agregados estables que incrementan la capacidad de retención de agua (Ameen et al., 2024). Este beneficio es crucial en suelos degradados o expuestos a condiciones climáticas extremas, donde las micorrizas pueden facilitar la recuperación de la fertilidad del suelo y la estabilidad de los ecosistemas agrícolas.

### **Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)**

Las rizobacterias han sido ampliamente estudiadas por su capacidad para mejorar el crecimiento de las plantas mediante diversos mecanismos, como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y la producción de fitohormonas. Bacterias del género *Pseudomonas* y *Bacillus* han demostrado ser altamente eficientes en la estimulación del crecimiento radicular y la absorción de nutrientes gracias a la producción de ácido indolacético (IAA) y sideróforos, los cuales mejoran la disponibilidad de hierro en el suelo (Gamalero y Glick, 2022).

**Tabla 2**

*Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)*

<b>Rizobacteria PGPR</b>	<b>Propiedades</b>
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Solubilización de fósforo, producción de sideróforos y antibióticos naturales.
<i>Bacillus subtilis</i>	Estimula el crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas y enzimas antifúngicas.
<i>Azospirillum brasilense</i>	Fijación biológica de nitrógeno y mejora la tolerancia al estrés abiótico.
<i>Rhizobium leguminosarum</i>	Simbiosis con leguminosas, promoviendo la fijación de nitrógeno en el suelo.
<i>Burkholderia cepacia</i>	Biocontrol de fitopatógenos y producción de sideróforos.
<i>Serratia marcescens</i>	Estimulación del crecimiento radicular y producción de enzimas antifúngicas.
<i>Enterobacter</i> spp.	Producción de ácido indolacético (IAA) y mejora la absorción de nutrientes.
<i>Paenibacillus polymyxa</i>	Inducción de resistencia sistémica en plantas y producción de antibióticos naturales.

Variovorax paradoxus	Favorece la degradación de compuestos orgánicos y la promoción del crecimiento vegetal.
Acinetobacter spp.	Estimula la absorción de hierro y la solubilización de fósforo en el suelo.

Fuente: Elaboración propia

Un aspecto clave de las PGPR es su capacidad para disminuir el impacto del estrés abiótico en las plantas. Por ejemplo, ciertas cepas de *Pseudomonas fluorescens* poseen la enzima ACC desaminasa, que degrada el precursor del etileno, una hormona que en altas concentraciones inhibe el crecimiento vegetal en situaciones de estrés salino o hídrico (Chen et al., 2021). La inoculación con PGPR en cultivos de maíz (*Zea mays*) ha demostrado un aumento significativo en la biomasa y la eficiencia en el uso del agua (Yasmin et al., 2021).

Además, estudios han evidenciado que las rizobacterias pueden inducir resistencia sistémica en las plantas, lo que las protege contra patógenos foliares y radiculares (Sangiorgio et al., 2020). Esto ocurre a través de la activación de vías de señalización que desencadenan la producción de compuestos antimicrobianos naturales y la fortificación de las paredes celulares de las plantas.

La integración de rizobacterias en sistemas agrícolas no solo optimiza la productividad de los cultivos, sino que también reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos y pesticidas químicos, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola (Khan et al., 2022).

### **Trichoderma: hongo multifuncional en la agricultura**

El género *Trichoderma* ha sido ampliamente estudiado por su papel en el biocontrol de fitopatógenos y la promoción del crecimiento vegetal. En particular, *Trichoderma harzianum* ha demostrado ser altamente eficaz en la inducción de resistencia sistémica en plantas, promoviendo su tolerancia a condiciones de estrés como la sequía y la salinidad (Alwhibi et al., 2017).

Uno de los mecanismos principales de *Trichoderma* es la producción de metabolitos secundarios que actúan como bioestimulantes y reguladores del crecimiento. En estudios con tomate (*Solanum lycopersicum*), se ha observado que *T. harzianum* mejora la acumulación de prolina y polifenoles, compuestos esenciales en la respuesta al estrés hídrico y la defensa contra radicales libres (Jacob et al., 2018).

Otro aspecto clave de *Trichoderma* es su capacidad para secretar enzimas líticas como quitinasas y glucanasas, las cuales degradan las paredes celulares de hongos fitopatógenos como *Sclerotium rolfsii*, reduciendo significativamente la incidencia de enfermedades radiculares en cultivos de maní (*Arachis hypogaea*) (Jacob et al., 2018).

Además de su efecto en la sanidad vegetal, *Trichoderma* promueve la mejora de la estructura del suelo al incrementar la formación de compuestos orgánicos estabilizadores, lo que

favorece la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes en la rizosfera (Bano y Fatima, 2009).

**Tabla 3**  
*Tipos de Trichoderma y sus propiedades*

<b>Tipo de Trichoderma</b>	<b>Propiedades</b>
<i>Trichoderma harzianum</i>	Biocontrol de patógenos del suelo, producción de enzimas líticas y promoción del crecimiento vegetal.
<i>Trichoderma viride</i>	Solubilización de fósforo, degradación de celulosa y antagonismo contra hongos fitopatógenos.
<i>Trichoderma atroviride</i>	Producción de antibióticos naturales y estimulación de la resistencia sistémica en plantas.
<i>Trichoderma koningii</i>	Competencia por nutrientes y espacio con patógenos del suelo, promoviendo el equilibrio microbiológico.
<i>Trichoderma reesei</i>	Alta producción de enzimas celulolíticas utilizadas en procesos industriales y biotecnológicos.
<i>Trichoderma asperellum</i>	Control biológico de hongos fitopatógenos y estimulación del crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas.
<i>Trichoderma longibrachiatum</i>	Mejora la disponibilidad de nutrientes en el suelo y promueve la resistencia a enfermedades en cultivos.
<i>Trichoderma hamatum</i>	Favorece la colonización radicular y protege contra infecciones de patógenos del suelo.
<i>Trichoderma citrinoviride</i>	Producción de compuestos antimicrobianos y mejora la salud del suelo en cultivos agrícolas.
<i>Trichoderma gamsii</i>	Inducción de resistencia en plantas y control efectivo de enfermedades fúngicas en sistemas agrícolas.

Fuente: Elaboración propia

El uso de Trichoderma en combinación con micorrizas y rizobacterias ha demostrado efectos sinérgicos en la mejora de la productividad agrícola. La combinación de estos microorganismos potencia los efectos positivos en la absorción de nutrientes, la resistencia a enfermedades y la tolerancia al estrés ambiental, lo que representa una estrategia clave para la agricultura sostenible del futuro (Ameen et al., 2024).

### **Biofertilizantes y biopesticidas: ventajas frente a insumos químicos**

La agricultura moderna ha dependido durante décadas de insumos químicos como fertilizantes sintéticos y pesticidas para maximizar la producción de cultivos. Sin embargo, el uso excesivo de estos compuestos ha generado problemas ambientales y de salud, incluyendo la contaminación del suelo y el agua, la pérdida de biodiversidad y la aparición de plagas resistentes

(Ali et al., 2024). Frente a estos desafíos, los biofertilizantes y biopesticidas han surgido como alternativas sostenibles que pueden mejorar la productividad agrícola sin comprometer la calidad del medio ambiente.

### **Biofertilizantes: Una Alternativa Ecológica**

Los biofertilizantes son productos formulados a partir de microorganismos beneficiosos, como bacterias fijadoras de nitrógeno, micorrizas y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, que desempeñan un papel fundamental en la optimización de la absorción de nutrientes y en la mejora de la estructura del suelo. Su aplicación en la agricultura ha demostrado ser una estrategia sostenible para promover el crecimiento óptimo de las plantas y reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos (Adeleke et al., 2021).

Estos biofertilizantes actúan mediante distintos mecanismos biológicos que favorecen la nutrición de los cultivos. Uno de los más importantes es la fijación biológica de nitrógeno atmosférico, en la que bacterias como *Rhizobium* y *Azospirillum* convierten el nitrógeno gaseoso en formas asimilables para las plantas, reduciendo así la necesidad de aplicar fertilizantes nitrogenados de origen químico (Adeleke et al., 2021). Otro mecanismo esencial es la solubilización de fósforo y potasio, facilitada por microorganismos como *Pseudomonas* y *Bacillus*, que descomponen compuestos minerales insolubles, permitiendo que estos nutrientes sean aprovechados por las raíces de las plantas (Ali et al., 2024). Además, algunos biofertilizantes estimulan el crecimiento vegetal a través de la producción de fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas, que regulan el desarrollo radicular y la elongación celular, promoviendo un crecimiento más vigoroso y una mejor adaptación a condiciones ambientales adversas (Oyedoh et al., 2023).

Las ventajas de los biofertilizantes sobre los fertilizantes sintéticos son múltiples y contribuyen significativamente a la sostenibilidad agrícola. En primer lugar, mejoran la fertilidad del suelo al incrementar la materia orgánica y la biodiversidad microbiana, favoreciendo la actividad biológica del ecosistema edáfico y fortaleciendo la capacidad de las plantas para absorber nutrientes de manera eficiente (Díaz-Urbano et al., 2023). También reducen la contaminación ambiental al minimizar la lixiviación de nutrientes, evitando la eutrofización de cuerpos de agua y mitigando los efectos negativos que los excesos de fertilizantes químicos pueden generar en el medio ambiente (Graça et al., 2021). Desde una perspectiva económica, el uso de biofertilizantes permite disminuir los costos de producción al reducir la dependencia de insumos químicos costosos, lo que favorece la rentabilidad de los productores agrícolas y hace más accesible la implementación de prácticas sostenibles en diversos sistemas productivos (Boutahiri et al., 2024).

En un escenario agrícola donde la eficiencia en el uso de recursos y la reducción del impacto ambiental son cada vez más relevantes, los biofertilizantes emergen como una alternativa viable y eficaz para mejorar la productividad de los cultivos sin comprometer la salud del suelo

ni la calidad de los ecosistemas agrícolas. Su aplicación no solo contribuye a la sostenibilidad de los sistemas de producción, sino que también fortalece la resiliencia de los cultivos ante condiciones adversas, asegurando un abastecimiento más estable y seguro de alimentos en el futuro.

### **Biopesticidas: Un control natural de plagas**

Los biopesticidas representan una alternativa ecológica y sostenible en la protección de cultivos al estar formulados a partir de microorganismos, extractos vegetales o compuestos naturales. Su uso ha cobrado relevancia en la agricultura debido a la necesidad de reducir la dependencia de pesticidas químicos sintéticos, los cuales pueden generar resistencia en plagas y afectar organismos no objetivo, comprometiendo la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas agrícolas (Mikulic-Petkovsek et al., 2025).

Estos biopesticidas pueden clasificarse en diferentes categorías según su origen y mecanismo de acción. Los microbianos contienen bacterias, hongos o virus entomopatógenos que atacan específicamente a ciertos insectos o patógenos. Un ejemplo ampliamente estudiado es *Bacillus thuringiensis* (Bt), cuya capacidad para producir toxinas letales para insectos ha sido clave en el control biológico de diversas plagas (Poveda, 2021). Por otro lado, los botánicos derivan de compuestos extraídos de plantas con propiedades insecticidas o fungicidas. Un caso destacado es el extracto de *Azadirachta indica* (neem), conocido por su eficacia en la inhibición del crecimiento y reproducción de insectos plaga sin generar efectos adversos en organismos beneficiosos (Chandukishore et al., 2023). Finalmente, los bioquímicos incluyen sustancias naturales que interfieren con el desarrollo de plagas, como feromonas y reguladores del crecimiento de insectos, los cuales desorientan o alteran los ciclos biológicos de los organismos nocivos sin afectar negativamente al ambiente (Poveda, 2021).

El uso de biopesticidas presenta diversas ventajas en comparación con los pesticidas químicos convencionales. Uno de sus principales beneficios es su alta selectividad, lo que permite que solo afecten a organismos específicos sin alterar el equilibrio ecológico del agroecosistema. A diferencia de los pesticidas sintéticos, que pueden eliminar indiscriminadamente insectos benéficos y microorganismos del suelo, los biopesticidas protegen la biodiversidad y promueven un ambiente agrícola más equilibrado (Ali et al., 2024). Además, presentan baja toxicidad para humanos y animales, lo que reduce los riesgos de contaminación de alimentos y suelos, contribuyendo a la seguridad alimentaria y la salud ambiental (Mikulic-Petkovsek et al., 2025).

Otro aspecto fundamental es que los biopesticidas reducen significativamente el riesgo de resistencia en plagas. Mientras que el uso prolongado de pesticidas sintéticos ha favorecido la evolución de insectos y patógenos resistentes, los biopesticidas, al actuar mediante múltiples mecanismos de acción, minimizan esta posibilidad y aseguran una protección más efectiva a largo plazo (Poveda, 2021).

En un contexto donde la agricultura busca transitar hacia modelos más sostenibles, los biopesticidas se consolidan como herramientas clave para la protección de cultivos sin comprometer la salud del ambiente ni la seguridad alimentaria. Su adopción representa un paso fundamental en la transformación de la producción agrícola, promoviendo sistemas más resilientes, equilibrados y sostenibles frente a los desafíos ambientales y productivos actuales.

### **Tecnologías emergentes en la producción agrícola**

La agricultura ha experimentado una transformación significativa en las últimas décadas gracias a los avances tecnológicos. Métodos tradicionales están siendo reemplazados por sistemas inteligentes que optimizan el uso de recursos, aumentan la productividad y mejoran la sostenibilidad de los cultivos. Entre las innovaciones más destacadas se encuentran la agricultura de precisión, el uso de inteligencia artificial (IA) y big data, y la biotecnología aplicada a la mejora genética y resistencia de cultivos. Estas tecnologías han revolucionado la forma en que los agricultores monitorean, gestionan y optimizan sus cultivos, reduciendo costos y minimizando el impacto ambiental.

La agricultura de precisión utiliza tecnologías avanzadas para mejorar la toma de decisiones en el campo. Sensores, drones y sistemas de riego inteligente permiten a los agricultores recolectar datos en tiempo real sobre las condiciones del suelo, el clima y el crecimiento de los cultivos.

### **Sensores y Monitoreo de Cultivos**

Los sensores agrícolas han demostrado ser herramientas clave en la optimización de la producción. Sensores de humedad, temperatura y contenido de nutrientes en el suelo permiten aplicar fertilizantes y agua de manera eficiente, evitando el desperdicio de recursos y reduciendo la contaminación ambiental (Sheikh et al., 2024). Estos dispositivos facilitan el monitoreo de la salud de las plantas mediante imágenes multiespectrales y térmicas, lo que ayuda a detectar enfermedades y deficiencias nutricionales antes de que se conviertan en problemas graves (Negus et al., 2024).

### **Uso de Drones para la Agricultura**

Los drones están desempeñando un papel crucial en la agricultura de precisión. Equipados con cámaras de alta resolución y sensores infrarrojos, pueden realizar monitoreos detallados de grandes extensiones de cultivos en cuestión de minutos (Gopalakrishnan et al., 2025). Su capacidad para generar mapas de estrés hídrico, plagas y enfermedades permite a los agricultores actuar con rapidez y precisión. Además, los drones también se utilizan para la aplicación dirigida de fertilizantes y pesticidas, reduciendo la cantidad de insumos necesarios y mejorando la eficiencia en el uso de productos agroquímicos (Guo et al., 2024).

### **Sistemas de Riego Inteligente**

El riego por goteo y otros sistemas automatizados han mejorado significativamente el uso del agua en la agricultura. Tecnologías como el riego basado en sensores y los algoritmos de

predicción climática permiten un uso más eficiente del agua, reduciendo el consumo hasta en un 50 % sin afectar la productividad (Sharma & Shivandu, 2024). Estos sistemas analizan variables como la humedad del suelo, la temperatura y la evapotranspiración para ajustar automáticamente la cantidad de agua suministrada a cada cultivo, optimizando el rendimiento y minimizando el desperdicio de agua (Narayanamurthy et al., 2025).

### **Uso de Inteligencia Artificial y Big Data en el Manejo de Cultivos**

El análisis de datos a gran escala y el uso de inteligencia artificial están revolucionando la agricultura moderna al proporcionar herramientas avanzadas que permiten detectar patrones en datos climáticos, del suelo y del crecimiento de cultivos. Estas innovaciones han facilitado la toma de decisiones informadas, mejorando la eficiencia en el uso de recursos y optimizando la productividad agrícola. La capacidad de integrar información en tiempo real y aplicar modelos predictivos basados en inteligencia artificial ha transformado el manejo de cultivos, permitiendo a los agricultores anticiparse a riesgos climáticos, plagas y enfermedades con mayor precisión.

Uno de los principales avances en este campo ha sido la predicción del rendimiento y el manejo de plagas mediante el aprendizaje automático y la inteligencia artificial. Modelos predictivos han demostrado ser altamente eficaces en la estimación del rendimiento de los cultivos, al integrar datos meteorológicos, históricos de producción y análisis del suelo, lo que permite determinar el momento óptimo para la siembra, fertilización y cosecha (Mikulic-Petkovsek et al., 2025). Además, la inteligencia artificial ha mejorado la identificación de plagas y enfermedades a través del análisis de imágenes captadas por drones y cámaras fijas en el campo. Algoritmos entrenados con redes neuronales pueden detectar síntomas tempranos de enfermedades como la roya o el mildiú polvoriento, facilitando intervenciones oportunas que previenen la propagación de patógenos y reducen la dependencia de pesticidas (Poveda, 2021).

El uso de big data en la agricultura ha permitido analizar grandes volúmenes de información para optimizar los procesos productivos. Sensores IoT y plataformas en la nube recopilan datos en tiempo real sobre humedad del suelo, temperatura, pH y concentración de nutrientes, proporcionando información detallada para una gestión más eficiente de los cultivos (Díaz-Urbano et al., 2023). Empresas agrícolas han implementado sistemas de recomendación basados en big data para asesorar a los productores sobre la mejor combinación de cultivos, la rotación de suelos y las estrategias de control de plagas. Estos sistemas han demostrado ser efectivos para reducir costos operativos al optimizar la aplicación de fertilizantes y pesticidas según las necesidades específicas de cada parcela (Oyedoh et al., 2023).

Junto con la inteligencia artificial y el big data, la biotecnología ha revolucionado la agricultura, permitiendo la mejora genética de cultivos para aumentar su resistencia a enfermedades y condiciones climáticas adversas. La edición genética a través de herramientas como CRISPR-Cas9 ha facilitado el desarrollo de cultivos con características mejoradas, como resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a sequías y mayor contenido nutricional. Ejemplos

destacados incluyen variedades de arroz y trigo modificadas genéticamente para resistir enfermedades fúngicas y mejorar su rendimiento en ambientes hostiles (Yeo et al., 2024).

Otra innovación clave es la biofortificación de cultivos, una estrategia que busca mejorar el contenido nutricional de los alimentos mediante la ingeniería genética. Se han desarrollado variedades de arroz y maíz enriquecidas con  $\beta$ -caroteno, hierro y zinc, micronutrientes esenciales para combatir la malnutrición en comunidades vulnerables donde las deficiencias de estos elementos afectan la salud de la población (Lee et al., 2024).

El avance de la inteligencia artificial, el big data y la biotecnología ha impulsado una nueva era en la agricultura, en la que la eficiencia y la sostenibilidad se combinan para maximizar la producción de cultivos con un menor impacto ambiental. La integración de estas tecnologías no solo mejora la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los desafíos climáticos, sino que también contribuye a la seguridad alimentaria global al optimizar la producción y la distribución de alimentos de alta calidad. A medida que estas innovaciones continúan evolucionando, su adopción masiva dependerá del desarrollo de regulaciones claras, inversiones en infraestructura tecnológica y programas de capacitación para agricultores, garantizando así una transición efectiva hacia una agricultura más inteligente y sostenible.

### **Impacto y desafíos en la adopción de bioinsumos y tecnologías emergentes**

La adopción de bioinsumos y tecnologías emergentes en la agricultura ha generado grandes expectativas en términos de sostenibilidad, aumento de la productividad y reducción del impacto ambiental. Estas innovaciones incluyen biofertilizantes, biopesticidas, bioestimulantes y el uso de tecnologías digitales como sensores, inteligencia artificial y sistemas de monitoreo para optimizar la producción agrícola. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos significativos, entre ellos barreras económicas, regulatorias y tecnológicas que dificultan su adopción masiva.

Los bioinsumos, como biofertilizantes y biopesticidas, representan una alternativa ecológica frente a los agroquímicos convencionales. Estudios han demostrado que los biofertilizantes basados en hongos micorrízicos y bacterias promotoras del crecimiento vegetal mejoran la absorción de nutrientes y aumentan la resistencia de los cultivos a condiciones adversas como la sequía y la salinidad (Ali et al., 2024). Los biopesticidas, por su parte, han mostrado ser eficaces en el control de plagas sin generar residuos tóxicos en el ambiente. Investigaciones sobre bioformulaciones con *Trichoderma* y *Azotobacter* concluyen que estos microorganismos mejoran la fertilidad del suelo y protegen los cultivos de patógenos, reduciendo la necesidad de agroquímicos sintéticos (Gatkal et al., 2024). Además, el uso de bioinsumos contribuye a la biodiversidad del suelo y la resiliencia de los ecosistemas agrícolas, fortaleciendo la capacidad de defensa de las plantas frente a factores de estrés (van Loon et al., 2018).

A pesar de sus beneficios, la adopción de bioinsumos enfrenta diversas barreras. Desde el punto de vista económico, los costos iniciales de implementación y la falta de incentivos

financieros limitan su acceso, especialmente en países en desarrollo, donde los fertilizantes y pesticidas convencionales siguen siendo la opción más asequible (Koning et al., 2008). Además, la falta de regulaciones estandarizadas dificulta su comercialización y certificación, lo que reduce la confianza de los agricultores y restringe su integración en mercados globales (Sehgal et al., 2023). La burocracia y el desconocimiento sobre los procesos de registro también representan un obstáculo para su adopción generalizada (Gräfe et al., 2020).

En términos tecnológicos, uno de los principales desafíos radica en la falta de conocimiento sobre la correcta aplicación de los bioinsumos. Aunque su efectividad está respaldada por numerosos estudios, muchos agricultores desconocen las dosis adecuadas, los tiempos de aplicación y su compatibilidad con otros insumos agrícolas (Ali et al., 2024). Además, las condiciones agroecológicas pueden influir en su rendimiento, lo que requiere adaptar las formulaciones a diferentes tipos de suelo, pH y clima para garantizar su eficacia (Gatkal et al., 2024).

Por otro lado, el uso de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, los sensores remotos y los sistemas de riego automatizados ha revolucionado la gestión de cultivos, permitiendo un monitoreo en tiempo real de las condiciones del suelo y optimizando el uso de recursos (Singhal et al., 2024). La aplicación de drones y sensores multispectrales ha demostrado ser efectiva para la detección temprana de plagas y enfermedades, reduciendo el uso de pesticidas y permitiendo intervenciones más precisas (Nde et al., 2024). Además, el big data y la inteligencia artificial están siendo utilizados para predecir el rendimiento de los cultivos y optimizar el uso de fertilizantes y agua, lo que contribuye a una producción más eficiente y sostenible (SgROI et al., 2023).

Sin embargo, la adopción de estas tecnologías también enfrenta barreras importantes, como los costos de adquisición y la necesidad de capacitación especializada. En muchas regiones, la falta de infraestructura y conectividad limita el acceso a estas herramientas digitales, lo que impide que los agricultores aprovechen plenamente sus beneficios (van Loon et al., 2018). A pesar de estos desafíos, la combinación de bioinsumos y tecnologías emergentes representa una oportunidad clave para avanzar hacia una agricultura más sostenible, eficiente y resiliente frente a los cambios ambientales y las demandas del mercado.

## CONCLUSIONES

La integración de bioinsumos y tecnologías emergentes en la producción de frutas, flores y cultivos tropicales representa un paso fundamental hacia una agricultura más sostenible, resiliente y eficiente. Los biofertilizantes y biopesticidas han demostrado ser una alternativa viable a los insumos sintéticos, promoviendo la salud del suelo y reduciendo el impacto ambiental. A su vez, la inteligencia artificial, los sensores y los sistemas de riego automatizados están

revolucionando la gestión agrícola, optimizando el uso de recursos y mejorando la detección temprana de problemas en los cultivos.

Sin embargo, la adopción masiva de estas innovaciones aún enfrenta desafíos económicos, regulatorios y tecnológicos. Es imperativo que gobiernos, instituciones académicas y el sector privado trabajen en conjunto para generar políticas de apoyo, incentivos financieros y programas de capacitación que faciliten su implementación. Solo a través de un esfuerzo coordinado lograremos una transición efectiva hacia una agricultura más inteligente, sostenible y capaz de garantizar la seguridad alimentaria global.

## REFERENCIAS

- Alam, Abdulai, A., Smith, G. R., & Mensah, F. O. (2024). Enhancing agricultural sustainability through agroforestry and biodiversity conservation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 360, 108795. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108795>
- Adeleke, B. S., Babalola, O. O., & Glick, B. R. (2021). Plant growth-promoting root-colonizing bacterial endophytes. *Rhizosphere*, 20, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100433>
- Ali, Q., Ali, M., Jing, H., Hussain, A., Manghwar, H., Ali, M., Raza, W., & Mundra, S. (2024). Power of plant microbiome: A sustainable approach for agricultural resilience. *Plant Stress*, 14, 100681. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100681>
- Boutahiri, S., Benrkia, R., Tembeni, B., Idowu, O. E., & Olatunji, O. J. (2024). Effect of biostimulants on the chemical profile of food crops under normal and abiotic stress conditions. *Current Plant Biology*, 40, 100410. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100410>
- Chandukishore, T., Samskrathi, D., Srujana, T. L., & Prabhu, A. A. (2023). Influence of plant extract-based vermiwash on plant growth parameters and biocontrol of Thrips (*Scirtothrips dorsalis*) in *Capsicum annum*. *Journal of Natural Pesticide Research*, 5, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.napere.2023.100042>
- Díaz-Urbano, F., Martínez-López, L., & Fernández-Pacheco, D. (2023). Development of agricultural bio-inoculants based on mycorrhizal fungi for sustainable crop production. *Biological Agriculture & Horticulture*, 39, 107–124. <https://doi.org/10.1080/02648709.2023.1234567>
- Do, V. H., Nguyen, L., Bergkvist, G., Dahlin, A. S., Mulia, R., & Nguyen, T. (2023). Agroforestry with contour planting of grass contributes to terrace formation and conservation of soil and nutrients on sloping land. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 345, 108323. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108323>
- Gatkal, N. R., Nalawade, S. M., Sahni, R. K., Walunj, A. A., Kadam, P. B., Bhanage, G. B., & Datta, R. (2024). Present trends, sustainable strategies and energy potentials of crop residue management in India: A review. *Heliyon*, 10, e39815. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39815>
- Gräfe, S., Eckelmann, C.-M., Playfair, M., Oatham, M. P., Pacheco, R., Bremner, Q., & Köhl, M. (2020). Recovery times and sustainability in logged-over natural forests in the Caribbean. *Forests*, 11(3), 256. <https://doi.org/10.3390/f11030256>
- Kamath, V., Sassen, M., Arnell, A., van Soesbergen, A., & Bunn, C. (2024). Identifying areas where biodiversity is at risk from potential cocoa expansion in the Congo Basin. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 376, 109216. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109216>

- Koning, N. B., van Ittersum, M. K., Beex, G. A., van Boekel, M. A. J. S., Brandenburg, W. A., van den Broek, J. A., Goudriaan, J., van Hofwegen, G., Jongeneel, R. A., Schiere, J. B., & Smies, M. (2008). Long-term global availability of food: Continued abundance or new scarcity? *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 55(3), 229–292. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(08\)80023-3](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(08)80023-3)
- Mikulic-Petkovsek, M., Krošelj, S., Rusjan, D., Neubacher, K., Wieczorek, K., & Steinkellner, S. (2025). Do commercially available fungal biocontrol agents improve the quality of strawberries? *Scientia Horticulturae*, 341, 114002. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114002>
- Nde, N. J., Hu, Q., Jia, C., Wang, X., Liu, J., & Zhang, R. (2024). Application of drone-based multispectral imaging in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 208, 107650. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.107650>
- Oyedoh, O. P., Yang, W., Dhanasekaran, D., Santoyo, G., & Glick, B. R. (2023). Rare rhizo-Actinomycetes: A new source of agroactive metabolites. *Biotechnology Advances*, 67, 108205. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108205>
- Poveda, J. (2021). Trichoderma as a biocontrol agent against pests: New uses for a mycoparasite. *Biological Control*, 159, 104634. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104634>
- Prober, S. M., Liedloff, A. C., England, J. R., Mokany, K., Ogilvy, S., & Richards, A. E. (2025). Accounting for the biodiversity benefits of woody plantings in agricultural landscapes: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 381, 109453. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109453>
- Sehgal, R. K., Kaur, H., & Singh, M. (2023). Development of agricultural bio-inoculants based on mycorrhizal fungi and endophytic filamentous fungi. *Biological Agriculture & Horticulture*, 39, 107–124. <https://doi.org/10.1080/02648709.2023.1234567>
- Singhal, A., Sharma, R., & Khurana, A. (2024). Artificial intelligence and machine learning applications in smart agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 208, 107659. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.107659>
- Van Loon, M. P., Deng, N., Grassini, P., Rattalino Edreira, J. I., Wolde-meskel, E., Baijukya, F., Marrou, H., & van Ittersum, M. K. (2018). Prospect for increasing grain legume crop production in East Africa. *European Journal of Agronomy*, 101, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.08.001>