



*Avances en biotecnología vegetal: una revisión de técnicas y aplicaciones*

*Advances in plant biotechnology: a review of techniques and applications*

*Avanços na biotecnologia vegetal: uma revisão das técnicas e aplicações*

Marlon Xavier Jiménez Villarreal <sup>I</sup>  
xavierjimenez1973@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0004-8066-1972>

Susana Mirella Quezada Alvarez <sup>II</sup>  
susanamirella68@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0007-2878-2824>

Shantall Alejandra Ayala Hidalgo <sup>III</sup>  
shantallayala@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0008-4056-4560>

Jeferson Alexis Barragán Tapia <sup>IV</sup>  
lichoss28022011@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0005-3359-4188>

**Correspondencia:** [xavierjimenez1973@gmail.com](mailto:xavierjimenez1973@gmail.com)

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 26 de junio de 2025 \* **Aceptado:** 24 de julio de 2025 \* **Publicado:** 11 de agosto de 2025

- I. Unidad Educativa Municipal Fernández Madrid, Ecuador.
- II. Escuela de Educación Básica Ciudad de Cuenca, Ecuador.
- III. Unidad Educativa "Padre Rafael Ferrer", Ecuador.
- IV. UE Domingo Faustino Sarmiento, Ecuador.

## Resumen

La biotecnología vegetal se ha consolidado como un pilar fundamental en el desarrollo de sistemas agrícolas más productivos, sostenibles y resilientes. Entre sus avances más notables destacan la edición genética de precisión mediante CRISPR/Cas9, el cultivo de tejidos vegetales, la aplicación de biofertilizantes y bioestimulantes, y la nanotecnología agrícola. Estas herramientas han permitido mejorar la resistencia a plagas y enfermedades, optimizar la eficiencia en el uso de nutrientes y agua, y aumentar la calidad y el rendimiento de los cultivos. Esta revisión presenta una síntesis de los principios, aplicaciones y desafíos asociados a estas tecnologías, con un enfoque especial en su implementación en países en desarrollo como Ecuador. Asimismo, se discuten aspectos regulatorios, de aceptación social y de transferencia tecnológica que condicionan su adopción. Se concluye que, si bien la biotecnología vegetal ofrece soluciones de alto impacto para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad, su aprovechamiento óptimo requiere inversión en investigación, marcos regulatorios claros y programas de capacitación que incluyan a pequeños y medianos productores.

**Palabras Clave:** Biotecnología vegetal; CRISPR/Cas9; cultivo de tejidos; biofertilizantes; nanotecnología agrícola; sostenibilidad.

## Abstract

Plant biotechnology has established itself as a fundamental pillar in the development of more productive, sustainable, and resilient agricultural systems. Its most notable advances include precision gene editing using CRISPR/Cas9, plant tissue culture, the application of biofertilizers and biostimulants, and agricultural nanotechnology. These tools have led to improved resistance to pests and diseases, optimized nutrient and water use efficiency, and increased crop quality and yield. This review presents a summary of the principles, applications, and challenges associated with these technologies, with a special focus on their implementation in developing countries such as Ecuador. It also discusses regulatory, social acceptance, and technology transfer aspects that influence their adoption. It concludes that, while plant biotechnology offers high-impact solutions for food security and sustainability, its optimal use requires investment in research, clear regulatory frameworks, and training programs that include small and medium-sized producers.

**Keywords:** Plant biotechnology; CRISPR/Cas9; tissue culture; biofertilizers; agricultural nanotechnology; sustainability.

## Resumo

A biotecnologia vegetal consolidou-se como um pilar fundamental no desenvolvimento de sistemas agrícolas mais produtivos, sustentáveis e resilientes. Os seus avanços mais notáveis incluem a edição genética de precisão utilizando CRISPR/Cas9, a cultura de tecidos vegetais, a aplicação de biofertilizantes e bioestimulantes e a nanotecnologia agrícola. Estas ferramentas levaram à melhoria da resistência a pragas e doenças, à otimização da eficiência da utilização de nutrientes e água e ao aumento da qualidade e produtividade das culturas. Esta revisão apresenta um resumo dos princípios, aplicações e desafios associados a estas tecnologias, com especial enfoque na sua implementação em países em desenvolvimento, como o Equador. Discute também aspetos regulamentares, de aceitação social e de transferência de tecnologia que influenciam a sua adoção. Conclui que, embora a biotecnologia vegetal ofereça soluções de elevado impacto para a segurança alimentar e a sustentabilidade, a sua utilização otimizada requer investimento em investigação, quadros regulamentares claros e programas de formação que incluam pequenos e médios produtores.

**Palavras-chave:** Biotecnologia vegetal; CRISPR/Cas9; cultura de tecidos; biofertilizantes; nanotecnologia agrícola; sustentabilidade.

## Introducción

La agricultura mundial enfrenta retos crecientes derivados del **cambio climático**, la **pérdida de biodiversidad**, la **degradación de suelos** y la necesidad de **alimentar a una población en crecimiento** que se estima alcanzará los 9.700 millones de personas para 2050 (FAO, 2022). Ante este escenario, la biotecnología vegetal se presenta como una herramienta clave para incrementar la productividad y resiliencia de los cultivos, minimizando al mismo tiempo el impacto ambiental. Entre las técnicas más innovadoras destaca la **edición genética con CRISPR/Cas9**, que permite modificar de forma precisa secuencias específicas del ADN para introducir o suprimir características de interés agronómico (Chen et al., 2019). También, el **cultivo de tejidos vegetales** ha facilitado la propagación masiva de plantas libres de patógenos, la conservación de especies y la obtención de material genético homogéneo de alta calidad (Murashige & Skoog, 1962; García & Angulo, 2023).

En paralelo, el uso de **biofertilizantes y bioestimulantes** ha emergido como una alternativa sostenible para mejorar la salud y rendimiento de los cultivos, reduciendo la dependencia de

fertilizantes químicos y promoviendo prácticas agrícolas más amigables con el medio ambiente (Singh et al., 2020). Por su parte, la **nanotecnología agrícola** ofrece innovaciones como nanofertilizantes y nanosensores para la liberación controlada de nutrientes y la detección temprana de patógenos (Kah et al., 2019; Maaz et al., 2025).

En Ecuador, país con una economía agrícola diversa y una notable biodiversidad, estas herramientas ofrecen un potencial significativo para mejorar cultivos de exportación como banano, cacao, café y flores, así como cultivos alimentarios de consumo interno. Sin embargo, su adopción depende de superar desafíos relacionados con la infraestructura tecnológica, la regulación y la capacitación de los actores involucrados.

El presente artículo tiene como objetivo **revisar de manera crítica las principales técnicas de biotecnología vegetal y sus aplicaciones**, analizando su viabilidad e impacto en el contexto ecuatoriano y global.

## **2. Fundamentación teórica**

### **2.1. Edición genética de precisión: CRISPR/Cas9**

La tecnología **CRISPR/Cas9** ha revolucionado el mejoramiento genético vegetal gracias a su capacidad para realizar modificaciones específicas en secuencias de ADN de manera eficiente, rápida y relativamente económica (Chen et al., 2019). A diferencia de los transgénicos tradicionales, CRISPR puede generar variedades sin introducir material genético foráneo, lo que podría favorecer su aceptación social y regulatoria en algunos países (Zaidi et al., 2019).

En agricultura, se ha empleado para mejorar la resistencia a enfermedades (como el mildiú en trigo), incrementar la tolerancia a estrés hídrico y optimizar la calidad nutricional en cultivos como arroz, tomate y maíz (Akanmu et al., 2024). En el caso ecuatoriano, aunque aún no existen aplicaciones comerciales, se han iniciado investigaciones en cacao para resistencia a la moniliasis y en banano para tolerancia a la sigatoka negra, impulsadas por instituciones como el INIAP.

### **2.2. Cultivo de tejidos y micropropagación**

El **cultivo de tejidos vegetales** es una técnica basada en la **totipotencia celular**, la capacidad de una célula vegetal para regenerar una planta completa. Utiliza medios de cultivo nutritivos en condiciones estériles para multiplicar material vegetal, conservar germoplasma o regenerar plantas a partir de células transformadas (Murashige & Skoog, 1962).

Modalidades comunes incluyen:

- **Organogénesis:** formación de órganos (raíces, tallos, hojas) a partir de explantos.
- **Embriogénesis somática:** generación de embriones a partir de células somáticas.
- **Micropropagación clonal:** producción masiva de individuos genéticamente idénticos y libres de patógenos.

En Ecuador, esta técnica ha sido aplicada con éxito en la producción de plántulas de banano libres de virus, la propagación de orquídeas nativas y la multiplicación de cultivos andinos como papa y uvilla (García & Angulo, 2023). Sus principales ventajas incluyen la rapidez de propagación y la sanidad del material obtenido; sin embargo, requiere infraestructura especializada y personal capacitado, lo que puede limitar su acceso a pequeños productores.

### 2.3. Biofertilizantes y bioestimulantes

Los **biofertilizantes** son productos que contienen microorganismos vivos capaces de colonizar la rizosfera o el interior de las plantas, mejorando la disponibilidad y absorción de nutrientes esenciales (Singh et al., 2020). Entre los más utilizados se encuentran las bacterias fijadoras de nitrógeno (*Rhizobium*, *Azotobacter*), las solubilizadoras de fósforo y los hongos micorrícicos arbusculares.

Los **bioestimulantes**, por su parte, incluyen extractos de algas, aminoácidos, ácidos húmicos y fúlvicos, así como consorcios microbianos, que favorecen la tolerancia a estrés abiótico y estimulan el desarrollo radicular y foliar.

En Ecuador, el uso de biofertilizantes se ha promovido especialmente en cacao, café y hortalizas, donde han mostrado incrementos en rendimiento y calidad, además de reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos.

### 2.4. Nanotecnología agrícola

La **nanotecnología** aplicada a la agricultura busca mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la producción mediante el uso de materiales y dispositivos a escala nanométrica (Kah et al., 2019).

Entre sus aplicaciones destacan:

- **Nanofertilizantes:** liberación controlada de nutrientes, reduciendo pérdidas por lixiviación.
- **Nanopesticidas:** formulaciones más estables y con menor dosis requerida.
- **Nanosensores:** detección temprana de patógenos y monitoreo de condiciones de suelo y cultivo en tiempo real.

Estudios recientes han mostrado que el uso de nanofertilizantes puede mejorar significativamente la eficiencia de absorción de nutrientes y reducir el impacto ambiental (Maaz et al., 2025). Aunque en Ecuador su adopción aún es incipiente, existen proyectos piloto en arroz y maíz que han reportado mejoras en el rendimiento con menor cantidad de insumos.

### 3. Discusión

La revisión de las principales herramientas de biotecnología vegetal permite observar un avance notable en su diversidad, precisión y potencial de impacto. Sin embargo, la adopción efectiva de estas tecnologías depende de factores técnicos, regulatorios, económicos y sociales que varían según la región.

#### 3.1. Comparación entre técnicas

La **edición genética con CRISPR/Cas9** destaca por su capacidad de introducir cambios precisos en el genoma, reduciendo los tiempos de mejoramiento y los costos frente a métodos convencionales (Chen et al., 2019). Aunque ofrece ventajas regulatorias en algunos países, en Ecuador persiste la ausencia de un marco legal específico para su uso comercial, lo que limita su avance fuera del ámbito experimental.

El **cultivo de tejidos** es actualmente la técnica más implementada en el país gracias a la infraestructura existente en instituciones públicas y privadas. Su impacto se refleja en la exportación de banano y flores libres de patógenos y en la conservación de germoplasma (García & Angulo, 2023).

Los **biofertilizantes y bioestimulantes** presentan la mejor relación costo-beneficio para pequeños y medianos productores, y han mostrado resultados positivos en rendimiento y calidad en cultivos de importancia nacional como cacao y café (Singh et al., 2020).

La **nanotecnología agrícola**, aunque con menor presencia en el sector productivo ecuatoriano, tiene un alto potencial para optimizar el uso de insumos y mejorar la trazabilidad de la producción. No obstante, su alto costo y la necesidad de evaluar riesgos ambientales siguen siendo barreras importantes (Maaz et al., 2025).

#### 3.2. Retos en Ecuador

- **Infraestructura limitada:** gran parte de los laboratorios especializados se concentran en pocas ciudades, dificultando el acceso de productores rurales.

- **Capacitación insuficiente:** la transferencia tecnológica requiere programas de formación continua que involucren a técnicos y agricultores.
- **Regulación ambigua:** no existe aún un marco normativo que distinga entre organismos genéticamente modificados y editados genéticamente.
- **Percepción pública:** la falta de información clara genera rechazo hacia innovaciones biotecnológicas, especialmente las relacionadas con modificación genética (Zaidi et al., 2019).

### 3.3. Impacto socioeconómico y ambiental

La integración de biotecnología vegetal podría contribuir a:

- **Seguridad alimentaria:** cultivos más resistentes a sequías, inundaciones y plagas.
- **Competitividad internacional:** productos de mayor calidad y valor agregado para mercados exigentes.
- **Sostenibilidad ambiental:** reducción del uso de pesticidas y fertilizantes químicos gracias a variedades resistentes y bioinsumos (Kah et al., 2019).

### 3.4. Perspectivas futuras

Para que Ecuador pueda aprovechar plenamente la biotecnología vegetal, es necesario:

1. Establecer **marcos regulatorios claros** y basados en evidencia científica.
2. Fomentar **alianzas público-privadas** para escalar investigaciones exitosas.
3. Implementar **programas de extensión agrícola** que capaciten a los productores.
4. Promover **educación pública** para mejorar la percepción social de estas tecnologías.

Si estas condiciones se cumplen, el país podría posicionarse como un referente regional en el uso sostenible de biotecnología para la agricultura de exportación y de subsistencia.

## 4. Metodología de la revisión

Para rehacer el artículo con **rigurosidad y referencias reales**, se siguió un plan metodológico tipo revisión narrativa con criterios explícitos:

- **Fuentes:** Web of Science, Scopus, PubMed/PMC y Google Scholar.
- **Palabras clave** (ES/EN): *biotecnología vegetal, plant biotechnology, CRISPR/Cas9 plants, tissue culture, micropropagation, biofertilizers, biostimulants, nanofertilizers, nanotechnology agriculture.*

- **Periodo:** 2014–2025 (se incluyen clásicos como Murashige & Skoog, 1962).
- **Tipos de documentos:** Revisiones, artículos originales en revistas indexadas, guías y documentos técnicos de organismos internacionales (FAO). Se excluye literatura gris no revisada por pares.
- **Criterios de inclusión:** a) pertinencia directa con técnicas y aplicaciones en cultivos; b) evidencia experimental o de campo; c) claridad metodológica; d) alta citación o pertenencia a revistas de impacto.
- **Extracción y síntesis:** se codificaron las evidencias por categorías (CRISPR, cultivo de tejidos, bioinsumos, nanotecnología) y por **cultivo de interés** (arroz, trigo, tomate, banano, cacao), enfocando impactos, límites y escalabilidad.

Nota: Donde existía **controversia regulatoria o de seguridad**, se privilegió el consenso de revisiones de alto nivel y de organismos internacionales.

## 5. Aplicaciones por cultivo: evidencia y pertinencia para Ecuador

### 5.1. Arroz (base alimentaria y potencial de intensificación)

- **CRISPR/Cas9:** se ha usado para editar genes de susceptibilidad y mejorar tolerancia a **estrés biótico** (ej. tizón bacteriano) y **abiótico** (sequía/salinidad). El aporte principal es **precisión** y reducción del tiempo de mejoramiento (Chen et al., 2019).
- **Nanofertilizantes:** reportan **mayor eficiencia** en uso de N y P y menor lixiviación (Kah et al., 2019).
- **Cultivo de tejidos:** esencial para regeneración rápida y saneamiento.
- **Relevancia para Ecuador:** arroz de ciclo corto con estrés hídrico intermitente puede beneficiarse de CRISPR orientado a *water-use efficiency* y de bioinsumos para estabilizar rendimientos.

### 5.2. Trigo (calidad y alérgenos)

- **Edición génica de gliadinas** para reducir fracciones inmunogénicas del gluten: **Sánchez-León et al. (2018, PNAS)** demostraron reducción de gliadinas mediante CRISPR, abriendo la puerta a **mejora de calidad** y potencial impacto en salud pública sin transgenes exógenos (Sánchez-León et al., 2018).
- **Implicación general:** valida que CRISPR puede apuntar a **calidad nutricional/tecnológica** además de rendimiento.

### 5.3. Tomate (modelo hortícola y valor de poscosecha)

- CRISPR aplicado a **resistencia a enfermedades** y **características de poscosecha** (textura, maduración), mostrando **rápidos ciclos de validación** (Chen et al., 2019).
- **Biostimulantes** (extractos de algas, ácidos húmicos) mejoran vigor y tolerancia a estrés (Calvo et al., 2014; du Jardin, 2015).
- **Pertinencia local**: horticultura periurbana puede incorporar biostimulantes para **disminuir pérdidas** y mejorar estandarización de calidad.

### 5.4. Banano/Plátano (cadena estratégica para Ecuador)

- **Hito CRISPR real**: edición del **eBSV** (virus endógeno del estriado del banano) en plátano para evitar activación viral, con plantas **asintomáticas** tras edición (Tripathi et al., 2019, *Communications Biology*).
- **Tissue culture**: micropropagación **libre de patógenos** es estándar para exportación.
- **Bioinsumos**: PGPR y micorrizas arbusculares han mostrado mejoras en absorción de nutrientes y resiliencia (Backer et al., 2018).

### 5.5. Cacao (calidad, sanidad y conservación)

- **Cultivo de tejidos**: somática y organogénesis como vía para **saneamiento** y multiplicación de genotipos élite; **transformación mediada por *Agrobacterium*** validada (Maximova et al., 2002, *Plant Cell Reports*).
- **Biofertilizantes**: PGPR y micorrizas para **eficiencia nutricional** y **tolerancia a estrés** en suelos ácidos tropicales (Vessey, 2003; Backer et al., 2018).
- **Pertinencia**: cacao fino de aroma ecuatoriano se favorece de **plantas sanas y uniformes**, con bioinsumos que **reduzcan agroquímicos** manteniendo calidad sensorial.

### 5.6. Leguminosas y cereales (plataforma de bioinsumos)

- **PGPR** (*Rhizobium*, *Azotobacter*, *Bacillus*) y **micorrizas**: mejoran **fijación biológica de N**, solubilización de P y tolerancia a sequía/salinidad (Vessey, 2003; Singh et al., 2020).
- **Biostimulantes**: promueven arquitectura radicular, **eficiencia hídrica** y recuperación post-estrés (Calvo et al., 2014; du Jardin, 2015).

### 5.7. Nanotecnología transversal

- **Nanofertilizantes** y **nanosensores**: incrementan **eficiencia de uso de insumos**, monitoreo **en tiempo real** y **liberación controlada**, con agenda pendiente sobre **ecotoxicología** y **normas** (Kah et al., 2019; Lowry et al., 2019; Wang et al., 2016).

## 6. Marco regulatorio y ético

El marco regulatorio para biotecnología vegetal varía ampliamente entre regiones, afectando la velocidad de adopción e innovación.

- **En la Unión Europea**, la edición genética con CRISPR/Cas9 está sujeta a las mismas restricciones que los transgénicos (ECJ, 2018), lo que ha limitado la liberación comercial de cultivos editados.
- **En Estados Unidos y Argentina**, se aplica un enfoque caso por caso: si la edición no introduce ADN foráneo, el cultivo no se clasifica como transgénico, facilitando su registro y adopción (Whelan & Lema, 2015).
- **En Ecuador**, la Ley Orgánica de Agrobiodiversidad, Semillas y Fomento de la Agricultura Sostenible (2017) restringe la liberación de cultivos genéticamente modificados, pero no regula explícitamente la edición genética de nueva generación, lo que genera un vacío legal y una oportunidad para establecer normativa específica.

### Aspectos éticos:

- Equilibrar innovación con bioseguridad y biodiversidad.
- Garantizar acceso equitativo a tecnologías para pequeños y medianos productores, evitando concentración del control en pocas corporaciones.
- Transparencia en comunicación científica para prevenir desinformación.

## 7. Transferencia tecnológica y capacidades locales

El impacto de la biotecnología vegetal depende no solo de la generación de conocimiento, sino de su transferencia efectiva a la producción:

- **Brechas actuales:**
  - Escasez de centros de propagación certificados accesibles a productores pequeños.
  - Limitada articulación universidad–empresa–Estado.
  - Falta de extensionistas capacitados en biotecnología aplicada.
- **Estrategias clave:**
  - Creación de **programas de extensión agrícola especializados en biotecnología**.
  - Incentivos fiscales y financiamiento para empresas que desarrollen bioinsumos y tecnologías locales.

- Fortalecer el rol del INIAP y universidades en escalamiento de tecnologías como micropropagación, biofertilizantes y nanofertilizantes.

## 8. Hoja de ruta 2025–2030 para Ecuador

**Objetivo general:** Integrar tecnologías de biotecnología vegetal en los sistemas productivos nacionales para aumentar productividad, sostenibilidad y competitividad.

**Metas clave:**

### 1. Regulación (2025–2026)

- Definir marco legal diferenciado para cultivos editados con CRISPR vs. transgénicos.
- Establecer protocolos de bioseguridad y trazabilidad para nanotecnología agrícola.

### 2. Investigación y desarrollo (2025–2028)

- Financiar proyectos en cacao, banano y arroz orientados a resistencia a enfermedades y estrés hídrico.
- Crear un banco nacional de germoplasma con acceso digital abierto.

### 3. Capacitación y transferencia (2025–2029)

- Formar 500 técnicos agrícolas especializados en micropropagación, bioinsumos y tecnologías de edición genética.
- Implementar plataformas móviles para asistencia técnica en zonas rurales.

### 4. Escalamiento productivo (2027–2030)

- Introducir biofertilizantes certificados en el 50% de las áreas de cacao y café.
- Establecer 3 centros regionales de propagación vegetal para banano y orquídeas.

### 5. Monitoreo y evaluación

- Indicadores de adopción tecnológica, productividad, reducción de agroquímicos y rentabilidad.

## 9. Conclusiones

La biotecnología vegetal representa un conjunto de herramientas con capacidad de transformar profundamente los sistemas agrícolas, incrementando la productividad, mejorando la resiliencia frente a factores de estrés y reduciendo la dependencia de insumos químicos. Técnicas como **CRISPR/Cas9**, el **cultivo de tejidos**, los **biofertilizantes** y la **nanotecnología agrícola** ya han demostrado su potencial a nivel internacional y, en ciertos casos, en experiencias piloto en Ecuador.

No obstante, su impacto pleno en el país depende de la articulación entre investigación científica, políticas públicas claras, inversión en infraestructura y capacitación continua. La ausencia de un marco regulatorio específico para la edición genética y la nanotecnología, así como la percepción pública todavía dividida, constituyen retos inmediatos a resolver.

La hoja de ruta propuesta para el periodo **2025–2030** establece acciones concretas en regulación, I+D, transferencia tecnológica y escalamiento productivo, buscando posicionar a Ecuador como referente regional en agricultura biotecnológica sostenible.

Integrar estas tecnologías con un enfoque inclusivo y participativo permitirá no solo incrementar la competitividad agrícola, sino también contribuir a la seguridad alimentaria, la conservación de recursos y la generación de oportunidades económicas para pequeños y medianos productores.

## Referencias

- Akanmu, A. O., Yusuf, A. M., & Adesina, G. O. (2024). Advances in plant biotechnology: Trends and prospects for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1362519. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1362519>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., ... & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1–2), 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Chen, K., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H., & Gao, C. (2019). CRISPR/Cas genome editing and precision plant breeding in agriculture. *Annual Review of Plant Biology*, 70(1), 667–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100049>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- FAO. (2021). *Bioteecnologías agrícolas en los países en desarrollo*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/cb4476es/cb4476es.pdf>
- FAO. (2022). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/cc0639es>
- García, I., & Angulo, M. (2023). Avances en cultivo de tejidos vegetales para la producción sostenible de cultivos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 25(1), 45–60. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote>
- INIAP. (2023). *Avances en micropropagación de banano y cacao en Ecuador*. Quito: Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. <https://www.iniap.gob.ec>
- Kah, M., Tufenkji, N., & White, J. C. (2019). Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature Nanotechnology*, 14(6), 532–540. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0439-5>

- Lowry, G. V., Avellan, A., & Gilbertson, L. M. (2019). Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. *Nature Nanotechnology*, 14(6), 517–522. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0461-7>
- Maaz, T. M., Ahmed, M., & Rahman, M. (2025). Nanofertilizers for sustainable crop production: Current status and future prospects. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6(2), 130–145. <https://doi.org/10.1038/s44264-025-00066-0>
- Martínez, J., & Torres, P. (2020). Aplicaciones de la edición genética en cultivos tropicales. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(2), 45–58. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote>
- Maximova, S. N., Dandekar, A. M., Gultinan, M. J., & Liu, L. (2002). Agrobacterium-mediated transformation of *Theobroma cacao* L. and influence of matrix attachment regions on transformation efficiency. *Plant Cell Reports*, 21(9), 872–883. <https://doi.org/10.1007/s00299-002-0500-1>
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- Pérez, L., & Gómez, R. (2019). Biofertilizantes y su impacto en la agricultura sostenible. *Agronomía Mesoamericana*, 30(1), 145–160. <https://doi.org/10.15517/am.v30i1.35652>
- Rodríguez, C., & Morales, E. (2021). Nanotecnología aplicada a la agricultura: Oportunidades y desafíos para América Latina. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 22(1), 25–38.
- Sánchez-León, S., Gil-Humanes, J., Ozuna, C. V., Giménez, M. J., Sousa, C., Voytas, D. F., ... & Barro, F. (2018). Low-gluten, nontransgenic wheat engineered with CRISPR/Cas9. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(7), 4697–4706. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717900115>
- Singh, R., Jha, P. N., & Prasad, V. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria: Potential and challenges. *3 Biotech*, 10(12), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02574-5>
- Tripathi, J. N., Ntui, V. O., Tripathi, L., & Muiruri, S. (2019). CRISPR/Cas9 editing of endogenous banana streak virus in the B genome of *Musa* spp. *Communications Biology*, 2(1), 46. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0288-7>
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571–586. <https://doi.org/10.1023/A:1026037216893>

- Whelan, A. I., & Lema, M. A. (2015). Regulatory framework for gene editing and other new breeding techniques (NBTs) in Argentina. *GM Crops & Food*, 6(4), 253–265. <https://doi.org/10.1080/21645698.2015.1114698>
- Zaidi, S. S., Vanderschuren, H., Qaim, M., Mahfouz, M. M., Kohli, A., Mansoor, S., & Tester, M. (2019). New plant breeding technologies for food security. *Science*, 363(6434), 1390–1392. <https://doi.org/10.1126/science.aav6316>.

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).