

# ESTRATEGIAS BIOTECNOLÓGICAS PARA OPTIMIZAR EL CULTIVO DE ARROZ (*ORYZA SATIVA*)

## BIOTECHNOLOGICAL STRATEGIES TO OPTIMIZE THE CULTIVATION OF RICE (*ORYZA SATIVA*)

Andrea Alejandra Orbe Riofrio<sup>1</sup>, Sixto Alejandro Gavilanez Montesdeoca<sup>2</sup>, Valeria Estefanía Astudillo Urquizo<sup>3</sup>, David Esteban Puyol Guevara<sup>4</sup>.

{andrearbd@hotmail.es<sup>1</sup>, sixto.gavilanez@educacion.gob.ec<sup>2</sup>, valestefy@hotmail.es<sup>3</sup>, David.puyol@esPOCH.edu.ec<sup>4</sup>}

Fecha de recepción: 17/02/2025 / Fecha de aceptación: 24/07/2025 / Fecha de publicación: 03/03/2025

**RESUMEN:** La biotecnología aplicada al cultivo de arroz ha demostrado un potencial significativo para afrontar desafíos agroindustriales y nutricionales en todo el mundo. El arroz es un cereal que está dentro de la alimentación global y poder mejorar sus características a través de la genética y técnicas de la ingeniería puede incrementar su calidad, resistencia y sostenibilidad. Estos avances son cruciales para abordar problemas ambientales que genera el cambio climático y la seguridad alimentaria. El cultivo de arroz *Oryza sativa* ha experimentado avances inmensos gracias a la innovación mezclado con la genética y la ingeniería. La biotecnología y otras técnicas modernas han permitido el desarrollo de muchas especies de arroz, no solo resistentes a plagas sino también a presentar mejoras en la calidad nutricional. El objetivo de esta investigación radica en como la biotecnología ha impactado en la mejora del cultivo de arroz. Los objetivos son alcanzados empleando técnicas como la transgénesis y la biobalística ya que han permitido la incorporación de genes específicos que hacen que exista una mayor resistencia y tolerancia a diferentes factores. La biofortificación y la edición génica han incrementado los niveles de proteínas, micronutrientes y vitaminas, mejorando la disponibilidad de alimentos nutritivos. Los marcadores moleculares han facilitado la clonación y caracterización de genes de resistencia a enfermedades bacterianas como la Mancha Bacterial, permitiendo variedades con resistencia duradera. En Ecuador y Latinoamérica, el cultivo de tejidos y la caracterización del germoplasma han mostrado potencial para desarrollar variedades adaptadas a condiciones de estrés, esenciales para la mitigación y adaptación al cambio climático. En conclusión, el uso de bacterias endófitas, como *Bacillus cereus* y *B. thuringiensis*, ha sido una estrategia viable para mejorar la producción y sostenibilidad del cultivo, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos y sus impactos ambientales.

**Palabras clave:** Genética, marcadores moleculares, bacterias endófitas, arroz

<sup>1</sup>Investigador dependiente, Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0009-0000-1958-5529>.

<sup>2</sup>Investigador dependiente, Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0009-0007-1126-4043>.

<sup>3</sup>Instituto Superior Tecnológico Riobamba, Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-2791-8896>.

<sup>4</sup>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0009-0001-9467-9637>.

**ABSTRACT:** Biotechnology applied to rice cultivation has shown significant potential to address agro-industrial and nutritional challenges around the world. Rice is a cereal that is part of the global diet and being able to improve its characteristics through genetics and engineering techniques can increase its quality, resistance and sustainability. These advances are crucial to address environmental problems generated by climate change and food security. The cultivation of *Oryza sativa* rice has experienced immense advances thanks to innovation combined with genetics and engineering. Biotechnology and other modern techniques have allowed the development of many rice species, not only resistant to pests but also with improvements in nutritional quality. The objective of this research is to look at how biotechnology has impacted the improvement of rice cultivation. The objectives are achieved using techniques such as transgenesis and bioballistics since they have allowed the incorporation of specific genes that make there be greater resistance and tolerance to different factors. Biofortification and gene editing have increased the levels of proteins, micronutrients and vitamins, improving the availability of nutritious foods. Molecular markers have facilitated the cloning and characterization of genes for resistance to bacterial diseases such as Bacterial Spot, allowing for varieties with long-lasting resistance. In Ecuador and Latin America, tissue culture and germplasm characterization have shown potential to develop varieties adapted to stress conditions, essential for mitigation and adaptation to climate change. In conclusión, the use of endophytic bacteria, such as *Bacillus cereus* and *B. thuringiensis*, has been a viable strategy to improve crop production and sustainability, reducing dependence on chemical fertilizers and their environmental impacts.

**Keywords:** *Genetics, molecular markers, endophytic bacteria, rice*

## INTRODUCCIÓN

La biotecnología emplea material vivo o productos biológicos para crear nuevos productos utilizados en diversas aplicaciones farmacéuticas, médicas, agrícolas y ambientales, con el objetivo de beneficiar a la humanidad (1), (2) . Ejemplos incluyen la producción de proteínas recombinantes, cultivos resistentes a enfermedades, vegetales mejorados, y animales con mayor producción, entre otros. Además, la biotecnología desempeña un papel crucial como catalizador en la creación de nuevos productos y soluciones. Esto no solo favorece el avance de la innovación, sino que también contribuye significativamente a reducir el impacto ambiental asociado con la optimización de cultivo de arroz (2).

Desde su aparición, la biotecnología ha tenido como objetivo abordar los diversos problemas que enfrenta la humanidad. Esta disciplina integra tanto métodos tradicionales como innovadores desde perspectivas científicas y técnicas (3) . La Biotecnología Agrícola utiliza nuevas técnicas científicas basadas en el ADN para mejorar cultivos. La biotecnología emplea ADN recombinante para introducir rasgos novedosos que no se pueden obtener de manera convencional, como la transformación mediada por *Agrobacterium* o la entrega biolística. Los cultivos genéticamente modificados (GM), como el arroz dorado que expresa  $\beta$ -caroteno para

combatir la deficiencia de vitamina A, han estado disponibles comercialmente desde 1996 en los Estados Unidos (4), (5).

La *Oryza sativa*, también conocida como el arroz, es uno de los cultivos de cereales más importantes a nivel mundial, y la mejora genética en este cereal ha permitido lograr diversos fines, como el aumento del tamaño de grano, el incremento del rendimiento, el enriquecimiento del contenido de nutrientes y compuestos bioactivos, así como la mejora de la actividad antioxidante, optimizando así diversas características del cultivo y traduciéndose en mejoras en la calidad, la productividad y el valor nutricional de este cereal tan fundamental a nivel global (6). El arroz junto con el trigo y el maíz son alimentos esenciales que se consumen diariamente a nivel global, alrededor del 50% de la población mundial considera indispensable para obtener carbohidratos en su vida diaria (7). China, India e Indonesia lideran la producción mundial de arroz, sumando el 60% del total a diferencia de otros cultivos como trigo y el maíz, donde el 22% y 14% de su producción respectivamente se comercializa a nivel internacional, solo el 9% del arroz producido se destina al comercio exterior. Esto implica que los mayores productores de arroz son también sus principales consumidores (8), (9). El arroz es uno de los cinco cultivos más importantes en Ecuador, con un consumo promedio por persona de entre 43 y 45 kg, alcanzando hasta 50 kg por persona en los últimos meses de 2020. Las provincias de Guayas y Los Ríos lideran tanto en producción como en venta de arroz, con 223,701 y 79,399 hectáreas sembradas respectivamente. Estas provincias produjeron 1,287,856 y 328,682 toneladas métricas con rendimientos de 7.76 y 4.14 t/ha, respectivamente. A nivel nacional, la producción de arroz alcanzó 5.35 t/ha en 2021 (10), (11), (12).

La biofortificación consiste en incrementar la densidad de nutrientes en los cultivos alimentarios a través de mejoramiento genético convencional, prácticas agronómicas optimizadas y biotecnología moderna, sin comprometer las características valoradas por los consumidores y agricultores (13). Esta intervención agrícola, enfocada en la nutrición, puede ayudar a reducir la deficiencia de vitaminas y minerales. Actualmente, se están desarrollando diversas iniciativas de biofortificación, como la del hierro en frijoles, caupí y mijo perla; la de zinc en maíz, arroz y trigo, y la de carotenoides provitamina A en mandioca, maíz, arroz y batata. El principio biológico detrás de la biofortificación es sencillo: los cultivos biofortificados contienen más nutrientes que sus equivalentes no biofortificados (14). Esto significaría que, siempre la biodisponibilidad y retención de micronutrientes tras la cocción, procesamiento y almacenamiento sean similares, las personas consumirán y absorberán más micronutrientes al ingerir cultivos biofortificados en comparación con los no biofortificados. En poblaciones con dietas pobres en estos micronutrientes, la ingesta de cultivos biofortificados puede mejorar significativamente el estado nutricional (15).

El presente artículo tiene como objetivo realizar un estudio de la incidencia de la aplicación de biotecnología en el cultivo de arroz (*Oryza sativa*), explorando cómo el uso de herramientas biotecnológicas ha impactado en la mejora de este cereal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Tipo de investigación

El presente estudio aplica el tipo de investigación cualitativa, descriptiva y exploratoria, debido a que se realizara por medio de revisiones bibliográficas explorando diferentes bases de datos y describiendo cada resultado obtenido de acuerdo al tema de estudio.

### Entorno y fuente de datos

Para la búsqueda de las publicaciones se utilizó las bases de datos digitales de la FAO, Elsevier, PubMed y Google Académico. Empleando las palabras clave: "biotecnología y arroz", "*Oryza sativa*", "mejoramiento genético del arroz", "biotecnología agrícola y arroz", agregando expresiones como "beneficios de la mejora genética del arroz", "aplicaciones de la biotecnología en el cultivo de arroz", "resistencia genética y arroz" etc.

### Proceso de selección de datos

Para determinar la relevancia en los estudios se abordaron criterios de inclusión y exclusión, la parte de inclusión conforman aquellos estudios que se examinaron inicialmente el título y resumen para identificar si es un estudio relevante, además estudios que tienen no más de 5 años de anterioridad, estudios que proporcionen información específica sobre la optimización del cultivo a través de la aplicación de la ingeniería genética y biotecnología. Por otro lado, se excluyeron aquellos estudios que carecen de datos fidedignos y reales, estudios que no tenga información específica sobre el caso de estudio e investigaciones que no tengan acceso libre.

Las referencias se eligieron de artículos, sitios web y libros publicados en inglés y español que cumplieron con los criterios de inclusión necesarios para garantizar la elegibilidad y la calidad. Recursos educativos y científicos Incluye revistas revisadas por pares, sitios web gubernamentales y educativos y libros de autores reconocidos en los campos de la biología y la agricultura. Es importante La elección del periodo de publicación también se tuvo en cuenta a la hora de buscar criterios que permitieran que los datos y la información reflejaran el estado actual de la investigación. Aunque el conocimiento histórico se considera relevante y útil para explicar el desarrollo de la educación,

### Mediciones

Algunas variables de estudio son: la resistencia a plagas y enfermedades, la tolerancia a estrés abiótico, la biofortificación y calidad nutricional, rendimiento y productividad, uso de bacterias endófitas, impacto ambiental

### Análisis de datos

Las investigaciones encontradas y seleccionadas serán analizadas con el fin de analizar, sintetizar la información existente sobre el tema a estudiar. El estudio contendrá una lista de referencias bibliográficas al final del trabajo, se utilizarán referencias donde el lector pueda

identificar y ubicar los datos citados. Por medio de estos datos se identificará que se sabe y que es desconocido sobre el tema de interés.

## RESULTADOS

A partir de la revisión de la literatura, se identificaron las principales incidencias y aplicaciones de la biotecnología en el cultivo de arroz:

(16), (17) en sus investigaciones sobre el arroz biotecnológico se encuentran las siguientes incidencias:

- Desarrollo de variedades de arroz transgénico o genéticamente modificado (GM): Las técnicas de ingeniería genética más empleadas incluyen la transgénesis utilizando *Agrobacterium tumefaciens* y la tecnología de biobalística. Los objetivos principales de estos desarrollos biotecnológicos son introducir nuevos rasgos de interés agronómico, como resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a estreses abióticos, y mejora de la calidad nutricional.
- Mejora de las prácticas agrícolas: La ingeniería genética ha permitido la introducción de características que facilitan el manejo y las prácticas de cultivo, como mayor eficiencia en el uso de recursos (agua, nutrientes) y reducción de insumos. Esto se ha traducido en incrementos significativos de la productividad del cultivo de arroz.
- Aumento de la seguridad alimentaria y de forrajes: El desarrollo de variedades de arroz con mejor perfil nutricional ya sea a través de la biofortificación o la introducción de genes de interés, ha contribuido a mejorar la disponibilidad de alimentos nutritivos para consumo humano y animal.

El artículo de “Avances recientes para mejorar la calidad nutricional del arroz” revisa diversas estrategias para mejorar la calidad nutricional del arroz, entre las cuales se destaca el uso de enfoques biotecnológicos (18):

- Se han empleado técnicas de ingeniería genética para desarrollar variedades de arroz con mayor contenido de proteínas, micronutrientes y vitaminas. Esto ha permitido elevar los niveles de estos componentes nutricionales de manera dirigida.
- Las herramientas de edición génica, como CRISPR-Cas9, ofrecen la posibilidad de realizar modificaciones puntuales en el genoma del arroz para mejorar rasgos relacionados con su valor nutricional.
- Las tecnologías ómicas, como la transcriptómica, proteómica, ionómica y metabolómica, han proporcionado una amplia gama de herramientas y técnicas para explorar los recursos genéticos del arroz y comprender los mecanismos moleculares involucrados en el desarrollo de características nutricionales.

(19) en su investigación sobre la aplicación de la biotecnología en el cultivo de arroz con el uso de herramientas moleculares obtuvo que el uso de marcadores moleculares ha facilitado la clonación, caracterización e introgresión de genes de resistencia a enfermedades bacterianas

como la Mancha Bacterial (MB) en variedades élite. Al menos 46 genes de resistencia a MB han sido identificados y mapeados de diversas fuentes hasta la fecha. De estos, 11 genes han sido clonados y caracterizados.

- El mejoramiento asistido por marcadores sigue siendo el enfoque más eficiente para mejorar la resistencia a MB al introducir dos o más genes de resistencia en las variedades objetivo. Los genes xa5, xa13 y Xa21 se utilizan ampliamente en el mejoramiento asistido por marcadores. Más de 70 variedades de arroz o líneas parentales de arroz híbrido se han mejorado para su resistencia a MB, sola o en combinación con genes/QTL que confieren tolerancia a otros estreses.
- La pirimidación de genes de resistencia a MB es una estrategia clave para desarrollar variedades de arroz con resistencia duradera y de amplio espectro.

La incidencia de la aplicación de la biotecnología en el cultivo de arroz (*Oryza sativa*) en Ecuador según (20):

- El análisis de la literatura reveló que las principales técnicas biotecnológicas aplicadas al cultivo de arroz en Ecuador y Latinoamérica han sido el cultivo de tejidos, específicamente de anteras. Adicionalmente, se ha trabajado en la caracterización del germoplasma de arroz con el objetivo de evaluar su potencial de producción, capacidad de resistencia a enfermedades y estrés ambiental, así como para asegurar su conservación a largo plazo.
- En cuanto al impacto de estas herramientas biotecnológicas, se ha identificado un alto potencial para su aplicación en el desarrollo de nuevas variedades de arroz. Así lo confirman los enormes avances alcanzados a nivel mundial en áreas como la genética molecular. La ingeniería genética y la bioinformática, especialmente la biotecnología, permitirán desarrollar variedades de arroz más resistentes al estrés biótico y abiótico. Esto es importante para la mitigación y adaptación al cambio climático y también puede resultar en mejoras significativas en el enriquecimiento de nutrientes. Calidad de semillas y producción de productos finales con mayor valor añadido. Uno de los desafíos pendientes es fortalecer los marcos regulatorios relacionados con el uso de la biotecnología, en aspectos de bioseguridad, derechos de propiedad y condiciones de acceso.

De acuerdo a (21), las principales herramientas biotecnológicas que han tenido un impacto significativo en el mejoramiento genético del arroz (*Oryza sativa*) son:

- La técnica de organogénesis permite la regeneración de plantas a partir de tejidos vegetales, facilitando la propagación y mejoramiento de variedades de arroz. La embriogénesis somática permite la inducción de embriones a partir de células somáticas, lo cual es útil para la selección y propagación de genotipos superiores.
- La introducción de genes de otras especies en el genoma del arroz ha permitido desarrollar variedades con características mejoradas, como mayor tolerancia a estreses bióticos y abióticos. Esta herramienta ha contribuido a aumentar la productividad y adaptabilidad del cultivo de arroz a diversas condiciones ambientales.

- La transferencia de genes dentro de la misma especie de arroz ha permitido la obtención de nuevas variedades con características deseables, sin introducir material genético de otras especies. Esta técnica es considerada más aceptable desde el punto de vista de bioseguridad y puede facilitar la adopción de variedades mejoradas por los productores.

La utilización de técnicas de biotecnología, como el cultivo in vitro de anteras de plantas F<sub>2</sub>, mostró un impacto positivo en la mejora genética del arroz (22). Esta metodología permitió:

- Obtener nuevos genotipos de arroz resistentes a la Piriculariosis (enfermedad causada por el hongo *Magnaporthe grisea*): Se realizaron cruzamientos entre cultivares resistentes a la Piriculariosis y cultivares de buen comportamiento agronómico. Las anteras de las plantas F<sub>2</sub> se cultivaron in vitro para evaluar la formación de callos y la regeneración de plantas verdes y albinas. Las líneas que combinaron resistencia a la Piriculariosis y buenos caracteres agronómicos fueron evaluadas en condiciones de infección natural, demostrando su efectividad.
- Aumentar la eficiencia y reducir el tiempo en el proceso de mejoramiento genético: Las plantas obtenidas mediante el cultivo in vitro de anteras son genéticamente homocigóticas, lo que redujo el tiempo para la obtención de los nuevos cultivares. Esta técnica permitió ahorrar recursos financieros y materiales, al aumentar la eficiencia de la selección y facilitar la identificación de individuos superiores.
- Superar la recalcitrancia de los cultivares de tipo indica al cultivo de tejidos: Se logró aplicar satisfactoriamente el cultivo in vitro de anteras en variedades comerciales de arroz de tipo indica, las cuales son conocidas por ser más recalcitrantes al cultivo de tejidos.

Las principales incidencias de la aplicación de la biotecnología en el cultivo de arroz en la investigación de los Métodos y usos agrícolas de la ingeniería genética aplicada al cultivo del arroz incluyen (23), (24):

- Mejora de la resistencia a factores bióticos: Se han introducido genes que confieren resistencia a insectos, hongos, bacterias, virus y nematodos, lo que ha permitido desarrollar variedades más tolerantes a estos agentes patógenos.
- Mejora de la tolerancia a factores abióticos: Se han generado variedades de arroz con mayor tolerancia a condiciones de salinidad, sequía, altas y bajas temperaturas, e incluso a la inundación.
- Mejoramiento de características agronómicas: La ingeniería genética ha permitido el desarrollo de variedades con mejor calidad nutricional, mayor rendimiento, mayor eficiencia en el uso de nutrientes y tolerancia a herbicidas.

Incidencia de la aplicación de biotecnología en el cultivo de arroz según (25) muestra los siguientes resultados en su estudio de “Bacterias endófitas aisladas de cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) con actividad promotora de crecimiento vegetal”

Los resultados de este estudio demuestran el potencial de las bacterias endófitas aisladas de diferentes variedades de arroz como una alternativa biotecnológica para promover el crecimiento y el desarrollo de este importante cultivo. Se logró aislar un total de 107 morfotipos

de bacterias endófitas, siendo la variedad 2000 la que presentó una mayor población de estos microorganismos en comparación con la variedad 67.

El análisis de las actividades promotoras de crecimiento vegetal de los aislados endófitos reveló que 11 de ellos fueron capaces de solubilizar fosfato, 6 produjeron sideróforos y 5 mostraron capacidad de fijar nitrógeno. Estas características son de gran relevancia, ya que permiten a las plantas mejorar la absorción y disponibilidad de nutrientes esenciales, lo que se traduce en un mejor crecimiento y rendimiento.

La identificación molecular de los aislados endófitos de mayor actividad demostró la presencia de *Bacillus cereus* y *B. thuringiensis*, los cuales son reconocidos por su potencial como biofertilizantes y agentes de biocontrol en el cultivo de arroz. Estos resultados sugieren que la aplicación de estas bacterias endófitas con actividades promotoras de crecimiento vegetal podría representar una estrategia biotecnológica viable para mejorar la producción y la sostenibilidad del cultivo de arroz, reduciendo así la dependencia de fertilizantes químicos y sus impactos ambientales.

## DISCUSIÓN

Las técnicas de ingeniería genética han revolucionado el desarrollo de variedades de arroz transgénico, permitiendo la creación de cultivos con características mejoradas, tales como resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a estreses abióticos, y mejora de la calidad nutricional. Estas mejoras se han logrado mediante el uso de transgénesis con *Agrobacterium tumefaciens* y la tecnología de biobalística (26). Además, la ingeniería genética ha facilitado la introducción de características que mejoran la eficiencia en el uso de recursos y reducen la necesidad de insumos, resultando en incrementos significativos en la productividad del cultivo de arroz (26).

El desarrollo de variedades de arroz con perfiles nutricionales mejorados ha sido otro logro significativo de la biotecnología. Mediante biofortificación y la introducción de genes de interés, se han aumentado los niveles de proteínas, micronutrientes y vitaminas en el arroz, mejorando así la disponibilidad de alimentos nutritivos (9), (10). Técnicas avanzadas como la edición génica con CRISPR-Cas9 y las tecnologías ómicas, incluyendo la transcriptómica, proteómica, ionómica y metabolómica, han proporcionado herramientas para realizar modificaciones puntuales en el genoma del arroz y explorar sus recursos genéticos de manera más profunda (27), (28).

El uso de marcadores moleculares ha sido crucial para mejorar la resistencia a enfermedades en el arroz. Estos marcadores han facilitado la clonación, caracterización e introgresión de genes de resistencia a enfermedades bacterianas como la Mancha Bacterial (MB). El mejoramiento asistido

por marcadores y la pirimidación de genes de resistencia, utilizando genes como xa5, xa13 y Xa21, han permitido desarrollar variedades de arroz con resistencia duradera y de amplio espectro (19).

En Ecuador y Latinoamérica, la biotecnología ha mostrado un alto potencial para el desarrollo de nuevas variedades de arroz adaptadas a condiciones de estrés biótico y abiótico, esenciales para la mitigación y adaptación al cambio climático. Las principales técnicas aplicadas han sido el cultivo de tejidos, especialmente de anteras, y la caracterización del germoplasma de arroz. Estas herramientas permiten evaluar el potencial de producción y la resistencia a enfermedades y estrés ambiental, asegurando la conservación a largo plazo (20).

La organogénesis y embriogénesis somática han sido herramientas valiosas en el mejoramiento genético del arroz, permitiendo la propagación y mejora de variedades con características deseadas. La introducción de genes de otras especies ha contribuido al desarrollo de variedades con mayor tolerancia a estreses bióticos y abióticos, mientras que la transferencia de genes dentro de la misma especie ha facilitado la aceptación y adopción de estas variedades mejoradas por los productores (21).

El cultivo in vitro de anteras de plantas F2 ha demostrado ser una metodología eficaz para obtener nuevos genotipos de arroz resistentes a enfermedades como la Piriculariosis, aumentando la eficiencia y reduciendo el tiempo del proceso de mejoramiento genético. Esta técnica ha permitido la regeneración de plantas homocigóticas, lo cual reduce el tiempo y los recursos necesarios para la obtención de nuevos cultivares (29).

La ingeniería genética ha sido fundamental para mejorar la resistencia del arroz a factores bióticos y abióticos. Se han introducido genes que confieren resistencia a insectos, hongos, bacterias, virus y nematodos, así como genes que mejoran la tolerancia a salinidad, sequía y temperaturas extremas. Estas mejoras han resultado en variedades de arroz con mayor rendimiento, mejor calidad nutricional y mayor eficiencia en el uso de nutrientes (30).

El uso de bacterias endófitas aisladas de diferentes variedades de arroz ha mostrado un potencial significativo para promover el crecimiento y desarrollo del cultivo. Las bacterias como *Bacillus cereus* y *B. thuringiensis* han demostrado capacidades para solubilizar fosfato, producir sideróforos y fijar nitrógeno, lo que mejora la absorción y disponibilidad de nutrientes esenciales, traduciéndose en un mejor crecimiento y rendimiento del arroz. Estas bacterias pueden representar una estrategia biotecnológica viable para mejorar la producción y sostenibilidad del cultivo, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos y sus impactos ambientales (31).

## CONCLUSIONES

El uso de tecnología en el cultivo de arroz (*Oryza sativa*) ha influido significativamente en el mejoramiento de este cultivo. Nuevas tecnologías, como la edición genómica y la biología, han

permitido el desarrollo de variedades de arroz resistentes a plagas y enfermedades, tolerantes al estrés abiótico y con propiedades nutricionales mejoradas. Mediante ingeniería genética y edición genómica, se ha aumentado el contenido de proteínas, micronutrientes y vitaminas del arroz, haciéndolo más nutritivo. Con el desarrollo de marcadores moleculares, se ha vuelto más fácil mapear genes de resistencia contra patógenos bacterianos desde el locus bacteriano e identificar rasgos de resistencia de amplio espectro. En Ecuador y América Latina, el cultivo del arroz y la genética del germoplasma han mostrado un gran potencial para el desarrollo de variedades adaptadas a diferentes estreses bióticos y abióticos, lo cual es crucial para mitigar y adaptarse al cambio climático. El uso de bacterias endófitas como *Bacillus cereus* y *Bacillus thuringiensis* ha surgido como una estrategia prometedora para mejorar la producción y la sostenibilidad del arroz, así como para reducir la dependencia de micronutrientes y sus impactos ambientales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Asas C, Llanos C, Matavaca J, Verdezoto D. El lactosuero: impacto ambiental, usos y aplicaciones vía mecanismos de la biotecnología. *Agroindustrial Science*, ISSN-e 2226-2989, Vol 11, No 1 (enero - abril), 2021, págs 105-116 [Internet]. 2021 [cited 2025 Feb 18];11(1):105–16. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8085141&info=resumen&idioma=ENG>
2. Chicaiza Ortiz CD, Rivadeneira Arias V del C, Herrera-Feijoo RJ. *Biología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*. 2023 [cited 2025 Feb 18]; Available from: [http://repositorio.ikiam.edu.ec/jspui/handle/RD\\_IKIAM/679](http://repositorio.ikiam.edu.ec/jspui/handle/RD_IKIAM/679)
3. Campos-Flores JR, Hernández-Trejo A, Orihuela YCO. La importancia de la biotecnología en las ciencias de la salud: una revisión. *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan* [Internet]. 2023 Jan 5 [cited 2025 Feb 18];11(21):4–8. Available from: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/xikua/article/view/9923>
4. Luisa M, Fernández G, García TH. Alimentos Transgénicos y Seguridad Alimentaria, ¿son la solución contra el hambre y la desnutrición en los países en desarrollo? *Seguridad alimentaria y alimentos transgénicos. Revista de Investigación y Educación en Ciencias de la Salud (RIECS)* [Internet]. 2023 Jun 1 [cited 2025 Feb 18];8(1):105–12. Available from: <https://www.riecs.es/index.php/riecs/article/view/363>
5. Oluwole OO, Aworunse OS, Aina AI, Oyesola OL, Popoola JO, Oyatomi OA, et al. A review of biotechnological approaches towards crop improvement in African yam bean (*Sphenostylis stenocarpa* Hochst. Ex A. Rich.). *Heliyon*. 2021 Nov 1;7(11).
6. Kobayashi K, Wang X, Wang W. Genetically Modified Rice Is Associated with Hunger, Health, and Climate Resilience. *Foods* [Internet]. 2023 Jul 1 [cited 2025 Feb 18];12(14). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37509868/>
7. Abbate PE. Trigo como alimento: su cultivo y producción en Latinoamérica. 2023 May 12 [cited 2025 Feb 18];2. Available from: <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/15210>
8. Mario Paredes EC, Becerra V V, Donoso Ñ G. Producción y comercialización mundial del arroz. 2021 [cited 2025 Feb 18]; Available from: <https://agritrop.cirad.fr/598772/1/100%20a%C3%B1os%20del%20cultivo%20de%20arroz%20en%20Chile%20Tomo%20I%20-%20Capitulo%2011%20Producci%C3%B3n%20y%20comercializaci%C3%B3n%20mundial.pdf>

9. Valverde1 BE. Arroz resistente a herbicidas: oportunidades y riesgos. sbcpd.org [Internet]. [cited 2025 Feb 18]; Available from: <https://sbcpd.org/uploads/trabajos/arroz-resistente-a-herbicidas-oportunidades-y-riesgos-979.pdf>
10. Lombeida García E, Medina Litardo R, Uvidia Vélez M, Pazmiño Pérez Á, Lombeida García E, Medina Litardo R, et al. Caracterización de un sistema de producción de arroz (*Oriza sativa* L.) en el cantón Babahoyo. Revista Científica y Tecnológica UPSE (RCTU) [Internet]. 2022 Dec 23 [cited 2025 Feb 18];9(2):39–47. Available from: [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-76972022000100039&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-76972022000100039&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
11. Velásquez AI, Velásquez AI, Villamar JM, Moncada BC, Cajas MP, Flores LR. Análisis de la cadena agroalimentaria de arroz en Ecuador. Polo del Conocimiento [Internet]. 2023 May 1 [cited 2025 Feb 18];8(5):3–21. Available from: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/5540>
12. Painii-Montero VF, Santillán-Muñoz OB, Montes-Escobar K, Garcés-Fiallos FR. Characterization of soybean productive units in the Ecuadorian Coast. Ciencia Tecnologia Agropecuaria. 2020 Jun 24;21(3).
13. Biofortificación de cultivos con minerales y vitaminas [Internet]. [cited 2025 Feb 18]. Available from: <https://www.who.int/tools/elena/bbc/biofortification>
14. Rendon N, Guerrero C. Evaluación de rendimiento y calidad nutricional de arroz biofortificado bajo un sistema de rotación con frijol. 2024 [cited 2025 Feb 18]; Available from: <https://cgspace.cgiar.org/items/fea1e129-4d16-4524-a42b-7c53e4895751>
15. Martínez JD, Díaz MD. Evaluación del comportamiento agronómico y nutricional de tres cultivares biofortificados y dos testigos comerciales de arroz (*Oryza sativa* L.) en Montería. 2021 [cited 2025 Feb 18]; Available from: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/42c19152-97e9-48ad-8c16-3998eab68cf1/content>
16. Alava Huacon WF. Importancia de las semillas bio-activadas sobre las características agronómicas del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.). 2022 [cited 2025 Feb 19]; Available from: <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13244>
17. Alberto C, Ramírez C. Desarrollo de estrategias biológicas para el manejo del tamo de arroz con fines de biofertilización en el departamento del Tolima. 2024 [cited 2025 Feb 19]; Available from: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/86677>
18. Zafar S, Jianlong X. Recent Advances to Enhance Nutritional Quality of Rice. Rice Sci. 2023 Nov 1;30(6):523–36.
19. Fiyaz RA, Shivani D, Chaithanya K, Mounika K, Chiranjeevi M, Laha GS, et al. Genetic Improvement of Rice for Bacterial Blight Resistance: Present Status and Future Prospects. Rice Sci. 2022 Mar 1;29(2):118–32.
20. La Biotecnología Al Mejoramiento Del Arroz En Ecuador A DE, Betzaida Pérez Almeida I. Aportes de la biotecnología al mejoramiento del arroz en Ecuador. REVISTA CIENTÍFICA ECOCIENCIA [Internet]. 2019 Oct 4 [cited 2025 Feb 19];6(5):1–22. Available from: <https://revistas.ecotec.edu.ec/index.php/ecociencia/article/view/225>
21. De F, Agropecuarias C. Importancia de la biotecnología aplicada para el mejoramiento genético del arroz (*Oryza sativa* L.). 2024 [cited 2025 Feb 19]; Available from: <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16161>

22. Duhalde MA, Bezus R, Rodriguez AA, Maiale SJ, Romero FM. Optimización de condiciones de cultivo de tejidos y transformación in vitro e in planta de la variedad local de arroz Don Justo FCAyF. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 2022 Nov 29;121(Especial 2):100.
23. Duhalde MA, Bezus R, Rodriguez AA, Maiale SJ, Romero FM. Optimización de condiciones de cultivo de tejidos y transformación in vitro e in planta de la variedad local de arroz Don Justo FCAyF. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 2022 Nov 29;121(Especial 2):100.
24. Bajaña Bravo PE. Impacto de los OGM en la productividad agrícola y la seguridad alimentaria. 2024 [cited 2025 Feb 19]; Available from: <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/17333>
25. BARBOZA-GARCÍA A, PÉREZ-CORDERO A, CHAMORRO-ANAYA L, BARBOZA-GARCÍA A, PÉREZ-CORDERO A, CHAMORRO-ANAYA L. Bacterias endófitas aisladas de cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) con actividad promotora de crecimiento vegetal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* [Internet]. 2023 Mar 7 [cited 2025 Feb 19];21(1):28–39. Available from: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-35612023000100028&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612023000100028&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
26. Singh R, Kaur N, Praba UP, Kaur G, Tanin MJ, Kumar P, et al. A Prospective Review on Selectable Marker-Free Genome Engineered Rice: Past, Present and Future Scientific Realm. *Front Genet* [Internet]. 2022 Jun 9 [cited 2025 Feb 19];13:882836. Available from: [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)
27. Myszkowska-Ryciak J, Ishdorj A, Je M, Zewska-Zychowicz ` , Mohidem NA, Hashim N, et al. Rice for Food Security: Revisiting Its Production, Diversity, Rice Milling Process and Nutrient Content. *Agriculture* 2022, Vol 12, Page 741 [Internet]. 2022 May 24 [cited 2025 Feb 19];12(6):741. Available from: <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/6/741/htm>
28. Zafar S, Jianlong X. Recent Advances to Enhance Nutritional Quality of Rice. *Rice Sci*. 2023 Nov 1;30(6):523–36.
29. Detquizán GM, Mori JBM, Huaman EH, Cruz SMO. Cultivo in vitro de anteras en arroz (*Oryza sativa* L.): una revisión general. *Revista Científica Pakamuros* [Internet]. 2022 Sep 17 [cited 2025 Feb 19];10(2). Available from: <https://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/183>
30. Ledesma Villacres BE. Uso de nuevas tecnologías en el desarrollo de nuevas variedades de arroz. 2022 [cited 2025 Feb 19]; Available from: <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13275>
31. Barboza-García, Pérez-Cordero ;, Alexander, Chamorro-Anaya ;, Lina. Bacterias endófitas aisladas de cultivo de arroz con actividad promotora de crecimiento. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* [Internet]. 2023 Mar 7 [cited 2025 Feb 19];21(1):28–38. Available from: <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/1728>