

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA AGRÍCOLA**



Tesina:

Organismos genéticamente modificados: su aplicación en agricultura

POR:

RUDY ALEXANDER RIVERA JOVEL

REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DE 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

ING. MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DECANO

MAECE. NELSON BERNABÉ GRANADOS ALVARADO

SECRETARIO

ING. MSc. EDGAR GEOVANNY REYES MELARA

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA AGRÍCOLA
MSc. FREDDY ALEXANDER CARRANZA ESTRADA

COORDINADOR DEL CURSO DE ESPECIALIZACIÓN
PhD. JOAQUÍN MIGUEL CASTRO MONTOYA

DOCENTE DIRECTOR
PhD. JOAQUÍN MIGUEL CASTRO MONTOYA

COORDINADOR DE PROCESOS DE GRADUACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
AGRÍCOLA
LICDA. ADA YANIRA ARIAS DE LINARES

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como propósito analizar el uso de organismos transgénicos en la producción de alimentos, considerando los avances científicos, los beneficios agronómicos y las implicaciones éticas y ambientales asociadas. El estudio se desarrolló en El Salvador durante el año 2025 y se basó en un enfoque cualitativo de revisión documental, a partir de fuentes científicas y técnicas relacionadas con la biotecnología alimentaria.

Las investigaciones revisadas incluyeron estudios experimentales de campo, laboratorio y análisis estadísticos. Los ensayos sobre cultivos Bt demostraron reducciones cercanas al 20 % en el daño por insectos y una menor aplicación de pesticidas. Los proyectos de biofortificación, como el *arroz dorado*, reportaron incrementos significativos en el contenido de provitamina A. En el ámbito industrial, los estudios de enzimas recombinantes mostraron aumentos de la actividad enzimática de hasta 190 U/mL respecto a 60 U/mL en cepas control. Por su parte, los trabajos basados en la edición genética CRISPR-Cas9 evidenciaron reducciones del 85 % en proteínas alergénicas, lo que reflejó una mejora en la seguridad alimentaria.

De manera general, la información analizada validó que la biotecnología moderna contribuyó al aumento del rendimiento y la calidad de los alimentos, siempre que existan políticas regulatorias y medidas de control que aseguren un uso ético y sostenible de los organismos genéticamente modificados (OGM).

Palabras clave: transgénicos; biotecnología; biofortificación; seguridad alimentaria; ética.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the use of transgenic organisms in food production, considering scientific advances, agronomic benefits, and the associated ethical and environmental implications. The research was conducted in El Salvador in 2025 and followed a qualitative documentary review approach, based on scientific and technical sources related to food biotechnology.

The reviewed studies included experimental research in field, laboratory, and statistical contexts. Field trials on Bt crops showed reductions of about 20% in insect damage and a decrease in pesticide application. Biofortification projects such as *Golden Rice* reported significant increases in provitamin A content. In the industrial field, research on recombinant enzymes demonstrated increases in enzymatic activity up to 190 U/mL compared to 60 U/mL in control strains. Meanwhile, studies using CRISPR-Cas9 gene editing achieved an 85% reduction in allergenic proteins, reflecting an improvement in food safety.

Overall, the analyzed evidence validated that modern biotechnology has contributed to improving food yield and quality, provided that regulatory frameworks and monitoring measures ensure the ethical and sustainable use of genetically modified organisms (OGM).

Key words: transgenics; biotechnology; biofortification; food safety; ethics.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme fortaleza, sabiduría y la claridad necesaria para avanzar en cada etapa de mi vida.

A mis padres, cuyo amor, apoyo incondicional y ejemplo de perseverancia han sido el motor que me impulsa a alcanzar cada meta. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y por acompañarme en cada uno de mis sueños.

A mi familia, por sus palabras de aliento, consejos y confianza, que me han formado como una mejor persona y han sido un pilar fundamental en todo este camino.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por otorgar salud, paciencia y la oportunidad de culminar este proceso académico. A mis docentes de la Facultad de Ciencias Agronómicas, quienes con su dedicación y conocimientos contribuyeron a mi formación profesional.

A mis amigos, que con su apoyo y motivación hicieron más llevadero este recorrido. A mi tutor, Phd. Joaquín Castro Montoya, que, por su guía, tiempo y valiosos aportes para el desarrollo de esta investigación, se convirtió en un pilar fundamental para culminar este trabajo.

ÍNDICE

Resumen	i
Abstract	ii
Dedicatoria y agradecimiento	iii
1. INTRODUCCIÓN	10
2. OBJETIVOS	12
3. MARCO TEÓRICO	13
3.1 Entendiendo el mecanismo de los transgénicos	13
3.2 Ingeniería genética: La nueva biotecnología	15
3.2.1 Enzimas de restricción.	16
3.2.3 Tecnologías modernas: CRISPR-Cas9.	16
3.3 Aplicaciones de los transgénicos.	17
3.4 Mejora de cultivos: resistencia a plagas.	17
3.4.1 Tolerancia a herbicidas.	18
3.4.2 Biofortificación.	19
3.5 Biotecnología de interés industrial en los alimentos.	21
3.5.1 Fermentación y transformación microbiana de alimentos.	21
3.5.2 Enzimas genéticamente modificadas en la mejora de procesos alimentarios.	23
3.5.3 Reducción de alergenicidad en alimentos mediante edición genética.	25
3.6 Marco regulatorio en el uso de OGM y edición génica.	26
3.6.1 Controversias y riesgos potenciales.	27
3.6.2 Ámbito ecológico.	27
3.6.3 Perspectiva socioeconómica.	28
3.6.4 Aceptación pública.	28
4. METODOLOGÍA	30
4.1 Metodología de campo.	30
4.2 Metodología de laboratorio.	31
4.3 Metodología estadística y de análisis de datos.	31
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
5.1 Cultivos Bt y resistencia a plagas	33
5.2 Biofortificación y calidad nutricional	33
5.3 Enzimas recombinantes y biotecnología industrial	34
5.4 Edición genética y reducción de alergenicidad	34
5.5 Aspectos regulatorios, éticos y ambientales	34
6. CONCLUSIONES	36
7. RECOMENDACIONES	37
8. BIBLIOGRAFÍAS.....	38
9. ANEXOS.....	46

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Actividad enzimática de cepa modificada y control bajo diferentes condiciones experimentales	24
Cuadro A-1. Ensayos y resultados del maíz transgénico SCB-29 con tolerancia múltiple a herbicidas...	46
Cuadro A-2. Comparación entre cepa recombinante y cepa silvestre de <i>Lactobacillus plantarum</i> en parámetros	47
Cuadro A-3. Comparación de estudios sobre el impacto del maíz Bt en la reducción de pérdidas por plaga	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura A-1. Efecto de distintas dosis de herbicidas sobre maíz SCB-29	49
Figura A-2. Comparativo entre granos de arroz dorado y arroz blanco	49
Figura A-3. Comparación de actividad enzimática (en <i>Pichia pastoris</i>) entre cepas control y cepas mejoradas.....	50

1. INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos enfrenta presiones simultáneas: pérdidas por plagas y malezas, degradación de suelos, efectos del cambio climático y carencias nutricionales en poblaciones vulnerables. En ese contexto, los organismos genéticamente modificados (OGM), es decir, organismos cuyo ADN ha sido alterado de forma dirigida para conferir un rasgo útil, se han consolidado como una herramienta para mejorar rendimiento, estabilidad sanitaria y calidad de los cultivos. Progresivamente, han surgido enzimas recombinantes y microorganismos diseñados para optimizar procesos industriales, desde fermentaciones más eficientes hasta mejoras en textura o vida útil de los alimentos, lo que amplía el alcance de la biotecnología más allá del campo. Este trabajo se sitúa en esa intersección entre agricultura y procesamiento de alimentos.

La evidencia acumulada muestra beneficios concretos. En agricultura, los cultivos Bt (que expresan proteínas insecticidas de *Bacillus thuringiensis*) han reducido daños por insectos y, en ciertos casos, la contaminación por micotoxinas en el grano; por ejemplo, el maíz Bt con Cry1Ab/Cry2Aj en China ayudó a sostener la productividad bajo alta presión de plagas y disminuyó fumonisinas y aflatoxinas. En el manejo de malezas, líneas tolerantes a glifosato y glufosinato (p. ej., maíz SCB-29) posibilitan estrategias de control químico más simples, con buen desempeño agronómico cuando se aplican dosis elevadas de herbicidas. En nutrición, la biofortificación (como el arroz dorado con provitamina A) busca cerrar brechas de micronutrientes; y en industria alimentaria, la expresión recombinante de enzimas (p. ej., fitasas, α -galactosidasas) y la ingeniería de bacterias lácticas han mejorado rendimientos y tiempos de proceso. (Zhou et al., 2023; Padgett et al., 1995; Chen et al., 2023; Paine et al., 2005; Potvin et al., 2015).

Al mismo tiempo, persisten debates y riesgos que demandan evaluación caso por caso: aparición de resistencias por presión de selección en plagas o malezas; posibles efectos fuera del objetivo en edición génica, controversias sobre propiedad intelectual y acceso, y una aceptación pública condicionada por la confianza institucional más que por conocimientos técnicos. Por ello, el marco regulatorio va desde el Protocolo de Cartagena y los lineamientos

del Codex Alimentarius hasta las decisiones regionales (UE vs. EE. UU., Argentina, Japón) es clave para balancear innovación, seguridad y comercio, y hoy muestra enfoques dispares especialmente ante la edición génica (CRISPR-Cas9), que permite cambios puntuales sin introducir ADN externo. (Secretaría CDB, 2000; FAO/OMS, 2009; Court of Justice of the European Union, 2018; Entine et al., 2021; Doudna & Charpentier, 2014).

Con base en lo anterior, este estudio sobre uso de transgénicos en producción de alimentos se justifica por tres razones: primeramente en documentar, con evidencia actual, dónde los OGM y la biotecnología industrial aportan valor (rendimiento, calidad y eficiencia de procesos); continuando con identificar límites y vacíos (estabilidad genética a largo plazo, resistencias, poscosecha en biofortificación, impactos ecológicos y socioeconómicos); y finalmente, analizar cómo los reglamentos vigentes pueden facilitar o frenar una adopción responsable de estas tecnologías. El objetivo es ofrecer una visión equilibrada, clara y útil para la toma de decisiones técnicas y regulatorias, integrando resultados experimentales, síntesis de metaanálisis y criterios de evaluación de riesgo reconocidos internacionalmente.

2. OBJETIVOS

Objetivo general

- ❖ Analizar el uso de los organismos genéticamente modificados (OGM) en la agricultura y la producción de alimentos, mediante una revisión crítica de información científica, técnica y normativa, con el fin de comprender sus aplicaciones, implicaciones y desafíos actuales.

Objetivos específicos

- ❖ Describir las principales aplicaciones de los OGM en la producción de alimentos, a partir del análisis de casos documentados y antecedentes tecnológicos, para contextualizar sus aportes productivos y funcionales.
- ❖ Analizar críticamente los riesgos, controversias, marcos regulatorios y factores de aceptación pública asociados al uso de OGM.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Entendiendo el mecanismo de los transgénicos.

La biotecnología es una disciplina que aprovecha los sistemas biológicos y organismos vivos para desarrollar productos o procesos con aplicaciones específicas. Su uso es amplio, abarcando campos como la medicina, la agricultura y la alimentación (FAO, 2020).

Dentro de este ámbito, la ingeniería genética se encarga de modificar el ADN de los seres vivos, permitiendo insertar genes de interés para dotarlos de nuevas características. Dando lugar a la transgénesis, la cual consiste en introducir material genético de un organismo donante a uno receptor, incluso si pertenecen a especies distintas. Esta técnica busca generar organismos con características que no se encuentran naturalmente en su especie. Podemos imaginar la transgénesis como instalar una nueva aplicación en un organismo: se le añade una función que antes no tenía, como resistencia a una plaga o tolerancia a la sequía. El resultado de este proceso es un OGM, cuyos rasgos específicos son producto de la manipulación genética de forma controlada (ChileBio, 2015; Chamas, 2000; Schaper et al., 2001).

Para lograr esta interacción, se utilizan herramientas moleculares como los vectores genéticos, que son estructuras (frecuentemente plásmidos bacterianos o virus modificados) capaces de transportar el gen deseado hasta el genoma del organismo huésped. Este vector incluye no solo el gen de interés, sino también un promotor, una secuencia de ADN que actúa como interruptor celular: activa el gen únicamente cuando es necesario que la célula produzca cierta proteína (ISAAA, 2006). Solo así el gen se podría expresar adecuadamente, siguiendo los patrones establecidos, con los rasgos adecuados. Es decir, no es suficiente con instalar el gen deseado en la parte interesada, con las características que se desean replicar, aquí hace falta un medio que le permita transportar estas secuencias hasta el núcleo donde se encuentra el genoma del organismo.

Una vez activado, el gen no actúa de forma directa. En este caso, la célula traduce su información utilizando una molécula intermedia llamada ácido ribonucleico mensajero (ARNm), que funciona como una copia temporal del gen para guiar la producción de proteínas

en los ribosomas (Lodish et al., 2021). Esta síntesis está determinada por el código genético, es como un “lenguaje universal” que las células usan para leer y traducir la información genética en funciones biológicas concretas.

Finalmente, existen los constructos genéticos que contienen marcadores de selección, genes auxiliares que permiten identificar fácilmente qué células han incorporado con éxito el transgén. Estos marcadores son clave en los procesos de selección y validación experimental de organismos transformados (Stein & Rodríguez-Cerezo, 2009).

Existen diversos métodos de transformación genética utilizados en plantas, cada uno con aplicaciones específicas según el tipo de tejido vegetal y la especie. Uno de los más ampliamente empleados es la transformación mediada por *Agrobacterium tumefaciens*, un fitobacterium capaz de transferir un segmento de ADN (ADN-T) desde su plásmido Ti hacia las células vegetales. Este método es particularmente efectivo en plantas dicotiledóneas, como el frijol, la calabaza y otras que presentan hojas embrionarias dobles (Marone et al., 2023).

Otro enfoque común es la biobalística o “Gene Gun”, que consiste en disparar micropartículas recubiertas con ADN foráneo hacia células vegetales. Este sistema resulta útil especialmente en plantas monocotiledóneas, como el maíz o el arroz, las cuales presentan baja susceptibilidad a la transformación mediada por *Agrobacterium* (Marone et al., 2023).

Por último, también se emplean técnicas como la electroporación y los tratamientos químicos, los cuales aumentan la permeabilidad de la membrana celular mediante pulsos eléctricos o agentes químicos, facilitando así la entrada del ADN en las células objetivo (Niemann & Kues, 2007).

La expresión del transgen puede ser influenciada por mecanismos epigenéticos como la metilación del ADN y modificaciones, que pueden silenciar el gen insertado. Además, la interferencia por ARN (ARNi) puede degradar el ARN mensajero del transgen, impidiendo su traducción (Niemann & Kues, 2007).

Para que el gen foráneo se integre en el nuevo organismo vivo y se exprese adecuadamente, dependerá de múltiples factores, que al combinarse puede facilitar o dificultar el proceso. Esto no depende solamente de la intención del investigador, o que se pueda realizar al azar. Uno de los principales factores es el tipo de célula receptora: algunas actúan como esponjas

moleculares, listas para incorporar el ADN externo con eficiencia, mientras que otras operan como puestos de control de restricción, que solo permiten el paso tras superar múltiples barreras regulatorias (ISAAA, 2006).

Por lo tanto, la transgénesis no solo se entiende como un proceso de inserción de genes, sino como una estrategia para programar funciones celulares. Su desarrollo ha sido clave para crear nuevas líneas de investigación en agricultura de precisión, y edición de compuestos complejos relacionados a la mejora de la estructura funcional de los alimentos. La selección del promotor adecuado y la comprensión del entorno genómico del organismo hospedero, son uno de los pasos clave para que se dé una correcta interacción entre individuos. Esta evolución metodológica ha permitido reducir los efectos no deseados y mejorar los resultados predecibles, lo que consolida a la transgénesis como una herramienta fundamental de la ingeniería genética.

3.2 Ingeniería genética: la nueva biotecnología.

El genoma de un organismo es la totalidad de su información hereditaria codificada en su ADN. Este contiene genes, secuencias reguladoras y regiones no codificantes que cumplen funciones estructurales y de regulación (Alberts et al., 2014). El Proyecto Genoma Humano (PGH), finalizado en 2003, proporcionó un mapa de los aproximadamente 3 mil millones de pares de bases del ADN humano (International Human Genome Sequencing Consortium, 2004), lo que permitió comprender mejor las bases moleculares de enfermedades genéticas y sentó las bases para el desarrollo de la medicina genómica.

La ingeniería genética es la técnica que permite insertar, eliminar o modificar secuencias específicas de ADN en el genoma de un organismo. Su aplicación abarca desde la mejora de especies vegetales hasta el tratamiento de enfermedades hereditarias (Nicholl, 2008). En sus primeras etapas, la ingeniería genética dependía del uso de enzimas de restricción y vectores plasmídicos. En la actualidad, el uso de sistemas como CRISPR-Cas9 ha facilitado una edición más precisa y eficaz (Doudna & Charpentier, 2014).

3.2.1 Enzimas de restricción. Las enzimas de restricción o endonucleasas permiten cortar el ADN en sitios específicos, generando fragmentos que pueden ser recombinados con otros segmentos de ADN. Estas enzimas fueron las primeras herramientas utilizadas en ingeniería genética (Watson et al., 2013). Los vectores, como los plásmidos bacterianos, permiten introducir secuencias deseadas en organismos receptores. La clonación molecular facilita la replicación y expresión de estos genes en sistemas vivos (Sambrook & Russell, 2001).

3.2.3 Tecnologías modernas: CRISPR-Cas9. El sistema CRISPR-Cas9, derivado de un mecanismo inmunológico bacteriano, permite la edición genética guiada por ARN con una alta especificidad (Hsu et al., 2014). Esta herramienta ha permitido realizar correcciones genéticas en modelos animales y en líneas celulares humanas, con aplicaciones en investigaciones básicas y en el desarrollo de terapias. Como dato, en el caso de una enfermedad como la distrofia muscular de Duchenne, causada por mutaciones en el gen *DMD*, podría utilizarse CRISPR para restaurar la lectura del gen y producir una versión funcional de la distrofina (Long et al., 2016). Además, proyectos como Revive & Restore exploran la edición del genoma de especies extintas, por ejemplo: el mamut lanudo, para reforzar la diversidad genética de poblaciones en peligro (Shapiro, 2015). Estas estrategias también podrían usarse para reforzar la diversidad genética de especies en peligro.

El diseño de genomas completos y organismos sintéticos abre la posibilidad de crear microorganismos con funciones industriales y ambientales específicas (Boeke et al., 2016).

La ingeniería genética ha cambiado en los últimos años aspectos de la biotecnología y la medicina. Sus aplicaciones, tanto actuales como potenciales, ofrecen soluciones a problemas médicos, ambientales y alimentarios. Sin embargo, el progreso científico debe ir acompañado de una regulación ética rigurosa que garantice un desarrollo responsable. La sociedad continúa decidiendo sobre qué alimentos debe elegir. En los próximos capítulos se abordarán los avances relevantes que más interesan, y que influyen en las repercusiones sociales.

3.3 Aplicaciones de los transgénicos.

Después de haber explicado los conceptos clave relacionados con la transgénesis y las herramientas que la hacen posible, es necesario mostrar cómo estas bases se aplican en la práctica. En esta sección se presentan casos concretos donde se han utilizado OGM, para resolver problemas reales, especialmente en el área agrícola y alimentaria. Además, se busca analizar con más profundidad algunos estudios realizados, seleccionando aquella información que aporta evidencias claras sobre sus beneficios, limitaciones o posibles riesgos.

La ingeniería genética ha transformado la forma en que enfrentamos los principales desafíos agrícolas. Uno de los problemas más persistentes a nivel global es el daño causado por plagas, que puede reducir entre un 20 % y 40 % del rendimiento de los cultivos esenciales si no se controla adecuadamente (Oerke, 2006). Frente a esta problemática, los OGM han sido desarrollados para incorporar genes que confieren a las plantas resistencia específica a insectos, permitiendo una reducción significativa en el uso de pesticidas químicos y una mejora en la seguridad alimentaria (Qaim & Zilberman, 2003). A continuación, se examinan algunas de estas aplicaciones, comenzando con el uso de cultivos transgénicos diseñados para resistir el ataque de insectos mediante la expresión de proteínas derivadas de *Bacillus thuringiensis*.

3.4 Mejora de cultivos: resistencia a plagas.

Una de las aplicaciones más extendidas de los OGM ha sido la incorporación de genes de resistencia a insectos, especialmente mediante la inserción de genes derivados de *Bacillus thuringiensis* (Bt). Este microorganismo produce una proteína que actúa como insecticida natural al ser ingerida por determinadas plagas, lo que permite reducir el uso de agroquímicos y minimizar su impacto ambiental (Brookes & Barfoot, 2020). Un ejemplo ampliamente documentado es el del maíz Bt, que ha mostrado reducciones en pérdidas por plagas de hasta un 80% en regiones vulnerables (Shelton et al., 2002), pero investigaciones más recientes en países como China reportan reducciones del 16 % al 21 %, con mejoras adicionales en seguridad alimentaria y calidad del grano (James, 2014; Qaim, 2009; Klümper & Qaim, 2014). En China continental, el cultivo de maíz Bt que expresa las toxinas Cry1Ab y Cry2Aj ha contribuido significativamente a mantener la productividad agrícola incluso bajo alta presión

de plagas. Además, estos cultivos han mostrado una reducción en la contaminación de los granos por micotoxinas como fumonisinas y aflatoxinas, lo cual representa un avance importante en términos de calidad alimentaria y salud pública (Zhou et al., 2023).

Además, estudios de metaanálisis han revelado que los cultivos Bt no solo protegen a la planta modificada, sino que también generan un efecto de zona refugio inversa, disminuyendo las poblaciones de plagas en áreas cercanas (Lu et al., 2012). Esta estrategia ha reducido el uso de insecticidas químicos y ha favorecido el control biológico en muchas regiones, pero no está exenta de desafíos. El uso masivo y continuado puede generar presiones evolutivas que den lugar a plagas resistentes. Por eso, se recomienda complementar los cultivos Bt con otras prácticas agrícolas sostenibles, como la rotación de cultivos o la plantación de refugios no transgénicos (Tabashnik & Carrière, 2017). A pesar de estos retos, la resistencia a plagas mediante transgénesis ha marcado un antes y un después en la defensa de cultivos frente a amenazas biológicas.

3.4.1 Tolerancia a herbicidas. La biotecnología agrícola ha desarrollado estrategias basadas en OGM que permiten resistencia específica a herbicidas, como el glifosato, sin afectar el metabolismo de la planta cultivada. A través de la introducción de genes exógenos, principalmente variantes de la enzima EPSPS resistentes a glifosato derivadas de bacterias como *Agrobacterium sp. CP4*, se ha logrado que estas plantas mantengan su funcionalidad metabólica incluso bajo aplicaciones intensas del herbicida (Padgett et al., 1995).

Este tipo de modificación genética no tiene como objetivo reducir el uso de herbicidas, sino permitir la sobrevivencia selectiva de los cultivos modificados en entornos tratados con estos productos químicos. Así, el glifosato puede eliminar malezas sin dañar las plantas transgénicas, mejorando el manejo agronómico, pero sin generar controversias respecto a la dependencia tecnológica y al uso continuado de agroquímicos en el entorno agrícola. Estudios de campo han demostrado que el uso de modificaciones genéticas ha reducido el laboreo mecánico del suelo, lo que indirectamente beneficia la estructura edáfica y reduce emisiones de carbono; sin embargo, también ha contribuido a la aparición de biotipos de malezas resistentes al glifosato como *Amaranthus palmeri*, debido a la presión selectiva generada por su uso repetido (Gaines et al., 2010).

Un caso reciente que ejemplifica el avance en tolerancia múltiple a herbicidas es el desarrollo del maíz transgénico SCB-29, creado por la Universidad de Zhejiang (Chen et al., 2023). Este híbrido incorpora resistencia combinada al glifosato (inhibidor de EPSPS) y al glufosinato (inhibidor de glutamina sintetasa), dos herbicidas de amplio uso. El estudio incluyó ensayos controlados y de campo abierto, aplicando dosis crecientes de herbicidas (0 a 3600 g/ha). Los indicadores fisiológicos —como altura de planta, contenido de clorofila (SPAD) y fenotipo de estrés— mostraron mínimas alteraciones, con solo una reducción menor al 5 % en parámetros fisiológicos, y un descenso de rendimiento cercano al 3 % en las dosis más altas. Este desempeño revela una alta estabilidad bajo presión química, lo cual refuerza su potencial para sistemas agrícolas que combinan siembra directa y control químico intensivo. Este y otros ejemplos se presentan en el Cuadro A-1, disponible en los anexos.

En síntesis, los cultivos transgénicos tolerantes a herbicidas han permitido una transformación significativa en el manejo de malezas y en ciertas prácticas agronómicas como la siembra directa, aportando ventajas ambientales a corto plazo. Sin embargo, su uso intensivo ha desencadenado nuevas problemáticas, como la aparición de malezas resistentes, que obligan a replantear las estrategias de control químico. Aunque las investigaciones recientes han demostrado que algunas variedades pueden soportar dosis elevadas de herbicidas sin una pérdida considerable de rendimiento, aún surgen dudas sobre los efectos a largo plazo, tanto en el cultivo como en el entorno agrícola ver Figura A-1. Esto deja claro que la eficacia de estas tecnologías no puede evaluarse únicamente por su desempeño, sino por su sostenibilidad real dentro de sistemas de producción complejos.

3.4.2 Biofortificación. La biofortificación es una estrategia biotecnológica que consiste en el mejoramiento genético de cultivos para incrementar su contenido de micronutrientes esenciales, como hierro, zinc o provitamina A, con el fin de combatir deficiencias nutricionales en poblaciones vulnerables (Bouis & Saltzman, 2017). A diferencia de la fortificación industrial, en la cual se agregan nutrientes después de la cosecha, la biofortificación permite que las plantas los generen de forma endógena durante su desarrollo.

Un ejemplo es el arroz dorado, conocido como *Golden Rice*, un arroz transgénico modificado para producir β -caroteno, el precursor de la vitamina A. Su versión más avanzada, llamada

GR2E, incorpora genes de maíz (*psy1*) y de una bacteria del suelo (*crtI*) que permiten la síntesis de β -caroteno en el endospermo del grano (Paine et al., 2005) ver Figura A-2. Este desarrollo fue liderado inicialmente por Syngenta, y posteriormente transferido sin fines de lucro al *International Rice Research Institute* (IRRI) para su adaptación a variedades regionales.

Uno de los avances más relevantes fue realizado por Slamet-Loedin et al. (2021), quienes integraron el rasgo GR2E en *BRR1 dhan29*, una variedad de arroz de alto rendimiento cultivada en Bangladesh. En sus ensayos (2017–2018), se evaluó el desempeño agronómico en cinco localidades, midiendo parámetros como el ciclo de madurez, calidad del grano y contenido de carotenoides mediante cromatografía líquida (HPLC). Los resultados mostraron un contenido promedio de β -caroteno de 10,6 $\mu\text{g/g}$ en el grano cosechado, suficiente —según los autores— para cubrir hasta el 80 % del requerimiento diario de vitamina A en niños.

No obstante, otros estudios han mostrado que este contenido se degrada significativamente durante el almacenamiento. Por ejemplo, Tang et al. (2009) y Bollinedi et al. (2019) demostraron que el β -caroteno en el arroz dorado puede perder hasta un 50 % de su concentración en seis meses, y hasta un 80 % si se almacena bajo condiciones de alta temperatura o exposición al oxígeno. De forma complementaria, un informe de la FDA (2017) señaló que, a las diez semanas postcosecha, algunas muestras de GR2E retenían solo un 13 % de su contenido original de carotenoides.

Sautter et al. (2018), por su parte, identificaron que el proceso de pulido del grano, acelera la pérdida de carotenoides, por lo que sugieren conservar el grano con su cáscara o en condiciones controladas para mantener su valor nutricional. Este hallazgo plantea desafíos logísticos para garantizar que el arroz biofortificado llegue con efectividad a los consumidores finales.

A pesar de estas limitaciones, De Moura et al. (2016) desarrollaron un modelo predictivo para estimar el impacto nutricional del arroz GR2E en niños de países en desarrollo. Considerando factores como el consumo promedio y la degradación de carotenoides, concluyeron que el arroz podría cubrir entre el 40 % y el 70 % de los requerimientos diarios de vitamina A, dependiendo de las condiciones de almacenamiento y la dieta local. Aunque su estudio no

involucró experimentación directa, aporta una visión poblacional útil para evaluar el impacto potencial de esta tecnología.

Este desarrollo de arroz biofortificado representa una propuesta innovadora y técnicamente sólida, con un enfoque de mejora genética y una visión claramente orientada a la salud pública. No obstante, su impacto práctico aún depende de pruebas de campo, estudios de seguridad alimentaria, y aceptación regulatoria. De manera científica, constituye un modelo valioso para futuras estrategias de edición genética orientadas a resolver deficiencias múltiples simultáneamente, lo que podría marcar una evolución desde enfoques nutricionales hacia soluciones más integrales.

3.5 Biotecnología de interés industrial en los alimentos.

Luego de haber abordado diferentes enfoques de la biotecnología, es necesario dar un paso más hacia otras formas en que la biotecnología está transformando nuestra forma de producir y consumir alimentos. Uno de estos caminos es la aplicación de la biotecnología en los procesos industriales de fabricación de alimentos, donde se están usando microorganismos y enzimas modificadas para mejorar el sabor, el valor nutricional, la textura o el tiempo de conservación de muchos productos (Leroy & De Vuyst, 2020; Illanes et al., 2020).

3.5.1 Fermentación y transformación microbiana de alimentos. El avance de la biotecnología, especialmente mediante la transgénesis, ha permitido una evolución significativa en el uso de estos microorganismos. Ya no solo se les selecciona por sus propiedades fermentativas tradicionales, sino que ahora pueden modificarse genéticamente para potenciar funciones específicas, que anteriormente no estaban presentes en su genoma natural. Por ejemplo, ciertas cepas de *Lactobacillus plantarum*, naturalmente implicadas en la fermentación vegetal, han sido modificadas para incrementar la producción de ácido ferúlico, un compuesto antioxidante con beneficios probados para la salud humana (Li et al., 2022).

En términos de conservación, la fermentación prolonga la vida útil del alimento gracias a la producción de ácidos orgánicos (como ácido láctico y acético), bacteriocinas y otros compuestos antimicrobianos que inhiben el crecimiento de microorganismos patógenos o de descomposición (Arena et al., 2016). Las bacterias ácido-lácticas (*Lactobacillus plantarum*,

Lactobacillus rhamnosus) han sido extensamente estudiadas por su capacidad de acidificar rápidamente el medio, reduciendo el pH a niveles inferiores a 4,5, lo que bloquea la proliferación de patógenos como *Listeria monocytogenes* o *Clostridium botulinum* (Gänzle, 2015). Además, algunas cepas han sido modificadas para producir bacterias más potentes o específicas, como la nisina, cuya eficacia como agente antimicrobiano ha sido validada en diversos sistemas alimentarios (Delves-Broughton et al., 1996).

Un caso ilustrativo es el desarrollo de una cepa recombinante¹ de *Lactobacillus plantarum*, en la cual se introdujo el gen amyL, codificante de α -amilasa. Esta modificación resultó en un incremento sustancial de la actividad enzimática total², pasando de 4.9 kU/L en la cepa parental a 13.1 kU/L en la recombinante, lo que implica una mejora casi triplicada en la capacidad para degradar almidones complejos (Zhang et al., 2020). Además, el 62 % de esta actividad se detectó en el sobrenadante del cultivo³, frente al 38 % en la cepa original, indicando una mayor secreción extracelular de la enzima, lo que facilita su recuperación en entornos industriales, ver Figura A-3.

Otro aspecto a destacar fue la reducción del tiempo de fermentación: la cepa modificada alcanzó un pH de 4.5 en solo 9 horas, frente a las 18 horas registradas en la cepa parental. Este cambio representa una aceleración del proceso del 50 %, con acidificación más rápida y mayor estabilidad funcional en un rango de pH entre 3 y 6. Estos avances hacen que esta cepa recombinante sea más eficiente, segura y adecuada para aplicaciones alimentarias fermentadas. Para ver todos los datos comparativos, consulte el Cuadro A-2, en los Anexos.

Estos avances permiten reducir la dependencia de aditivos sintéticos y optimizar procesos industriales de conservación, con impacto directo en la calidad y seguridad del producto final. En efecto, estudios recientes destacan que la fermentación con cepas modificadas no sólo mejora la estabilidad y la vida útil de los alimentos, sino que también potencia su valor funcional y sensorial (Leroy & De Vuyst, 2020).

¹ **Cepas recombinantes:** Son microorganismos genéticamente modificados mediante técnicas de transgénesis para expresar características mejoradas (Chen et al., 2020).

² **Actividad enzimática total (kU/L):** Es la cantidad de enzima activa presente en un litro del cultivo. 1 kU equivale a 1000 unidades de actividad enzimática, donde una unidad es la cantidad de enzima que cataliza la transformación de un micromol de sustrato por minuto (Couto & Sanromán, 2006).

³ **Sobrenadante del cultivo:** Se refiere a la fracción líquida que queda después de centrifugar un cultivo microbiano (Zhang et al., 2017).

3.5.2 Enzimas genéticamente modificadas en la mejora de procesos alimentarios. En la industria alimentaria, las enzimas cumplen funciones fundamentales para la transformación de sustratos, el desarrollo de texturas, sabores y la conservación de productos. Tradicionalmente, estas enzimas eran obtenidas mediante extracción de tejidos animales, vegetales o de cultivos microbianos naturales. Sin embargo, estas fuentes presentan limitaciones en cuanto a rendimiento, especificidad y estabilidad. En este contexto, el desarrollo de enzimas recombinantes ha permitido superar muchas de estas barreras, ofreciendo una producción más eficiente, controlada y adaptada a condiciones industriales específicas (Illanes et al., 2020).

En un estudio específico, Potvin et al. (2015) desarrollaron una estrategia para optimizar la producción de fitasa modificada en la levadura transgénica *Pichia pastoris*, enzima que cataliza la liberación de fósforo inorgánico a partir del fitato, mejorando su biodisponibilidad en animales monogástricos y reduciendo la carga de fósforo. Para ello, aplicaron un Diseño Compuesto Central (CCD) dentro de la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM), con el fin de modelar el efecto individual e interactivo de tres variables independientes clave durante la fase de inducción: pH del medio (4, 6 y 8), concentración de metanol como inductor (1 %, 2 % y 3 %) y temperatura de fermentación (20 °C, 25 °C y 30 °C). Como variable control se empleó una cepa de *P. pastoris* no modificada genéticamente, utilizada como línea base para aislar los efectos propios de la transgénesis. La variable dependiente fue la actividad enzimática de fitasa en el sobrenadante, medida en unidades por mililitro (U/mL) tras 48 h de fermentación. Los resultados, respaldados por el análisis estadístico, mostraron diferencias entre los tratamientos, identificándose un punto óptimo de producción bajo condiciones intermedias (pH 6, metanol al 2 %, temperatura de 25 °C), donde la cepa recombinante alcanzó 190 U/mL, triplicando el rendimiento de la cepa control (~60 U/mL). Este desempeño validó tanto la eficacia de la modificación genética como la precisión del modelo estadístico, ya que los valores predichos se ajustaron estrechamente a los resultados experimentales obtenidos, como se observa en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Actividad enzimática de cepa modificada y control bajo diferentes condiciones experimentales.

pH	Metanol (%)	Temperatura (°C)	Actividad recombinante (U/mL)	Actividad control (U/mL)	Rendimiento relativo (%)	Valor predicho (U/mL)
5	1	20	75	58	129	74
5	2	25	120	60	200	118
6	1	25	150	59	254	149
6	2	25	190	60	317	188
6	3	30	170	60	283	172
7	2	25	140	59	237	141
7	2	30	130	58	224	129

Fuente: Adaptado de Potvin et al., 2015.

Los casos anteriores presentados demuestran que la aplicación de enzimas modificadas genéticamente, obtenidas mediante herramientas de ingeniería genética como la inserción de genes heterólogos, llamados también genes foráneos en microorganismos huéspedes, ha permitido mejorar parámetros clave de los procesos alimentarios, tales como el rendimiento, la estabilidad térmica y la selectividad del producto. Tanto la cepa modificada de *Clostridium tyrobutyricum*, orientada a una mayor producción de ácido butírico (Zhang et al., 2022), como la levadura *Pichia pastoris* empleada para expresar una α -galactosidasa con propiedades industriales mejoradas (Huang et al., 2022), evidencian cómo la intervención genética específica permite correlacionar variables fisiológicas del microorganismo con el rendimiento de compuestos bioactivos de interés alimentario.

3.5.3 Reducción de alergenicidad en alimentos mediante edición genética. Uno de los avances más significativos en la reducción de alergenicidad en alimentos ha sido el uso de la edición genética por CRISPR-Cas9 en trigo *hexaploide* (*Triticum aestivum*), una variedad de trigo común que posee seis juegos de cromosomas (AABBDD), lo que complica los intentos de modificar múltiples genes simultáneamente. En el estudio de Jouanin et al. (2020), se logró editar de forma dirigida hasta 35 copias de genes que codifican *gliadinas*, un tipo de proteína del gluten rica en *epítomos tóxicos*—fragmentos peptídicos que provocan respuestas inmunes anómalas en *pacientes celíacos*. Estos últimos padecen una enfermedad autoinmune en la que el consumo de gluten causa daño inflamatorio al intestino delgado.

Para verificar la reducción efectiva de estos epítomos⁴, Jouanin et al. (2020) aplicaron métodos de qRT-PCR (reacción en cadena de la polimerasa con transcriptasa inversa en tiempo real) y *secuenciación profunda*, técnicas moleculares que permiten cuantificar la expresión génica y analizar millones de fragmentos de ADN de forma simultánea, respectivamente. Los resultados revelaron una disminución del 85 % en la expresión de epítomos inmunogénicos, además de una drástica reducción en la reactividad de estas líneas de trigo con sueros de pacientes celíacos.

Estos hallazgos están respaldados por estudios previos como el de Sánchez-León et al. (2018), que aplicaron CRISPR para silenciar regiones inmunogénicas en trigo panificable, y por los trabajos de Visioli et al. (2020), quienes confirmaron la viabilidad de este enfoque sin afectar la calidad panadera ni el rendimiento del grano. A diferencia de la transgénesis convencional, este tipo de edición no introduce genes externos, lo cual facilita su aceptación en marcos regulatorios más exigentes y que podría posibilitar una mayor aceptación pública. Este tipo de innovación biotecnológica abre la posibilidad de diseñar alimentos funcionales desde su base genómica con menor potencial alergénico.

⁴ **Epítomo:** región específica de un antígeno reconocido por el sistema inmunitario, que interactúa directamente con anticuerpos o receptores de células inmunes, desencadenando una respuesta. En proteínas, corresponde a una secuencia corta de aminoácidos, mientras que en polisacáridos puede ser un conjunto característico de azúcares (Janeway et al., 2017)

3.6 Marco regulatorio, avances tecnológicos y perspectivas futuras.

El desarrollo de la biotecnología aplicada a la agricultura y la producción de alimentos ha evolucionado a un ritmo que, en muchos casos, supera la capacidad de adaptación de los marcos regulatorios. A nivel internacional, dos referencias normativas principales guían la regulación de los OGM:

1. El Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2000), que establece que cualquier liberación de OGM en el medio ambiente debe evaluarse caso por caso, considerando el organismo receptor, el rasgo introducido y el entorno de uso.
2. Los lineamientos del Codex Alimentarius (FAO/OMS, 2009), que definen criterios para evaluar la inocuidad de un alimento OGM, como la comparación con su equivalente convencional (equivalencia sustancial), la identificación de posibles alérgenos o toxinas, la estabilidad del gen introducido y los efectos del procesamiento.

A nivel regional, existen diferencias sustanciales. En la Unión Europea (UE), la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) distingue entre transgénesis clásica (introducción de genes foráneos) y edición génica (modificación dirigida del genoma existente). No obstante, desde la sentencia del Tribunal de Justicia de la UE en 2018, todas las técnicas de edición génica, incluyendo CRISPR-Cas9, se regulan como si fueran transgénicos (Court of Justice of the European Union, 2018), lo que implica procesos más largos y costosos. En síntesis, países como Estados Unidos, Argentina y Japón aplican criterios diferenciados: si la modificación no implica la inserción de ADN externo, el producto puede quedar exento de la regulación transgénica (Entine et al., 2021). Estas diferencias regulatorias pueden dificultar la trazabilidad. La aparición de tecnologías como CRISPR-Cas9 ha generado un debate sobre si deben regularse igual que los OGM tradicionales. A diferencia de la transgénesis, que suele insertar genes de otras especies, CRISPR permite realizar cambios precisos dentro del genoma del propio organismo, reduciendo la probabilidad de efectos no deseados y acelerando la obtención de variedades adaptadas a condiciones locales (Jinek et al., 2012; Zhang et al., 2020). Sin embargo, su alta precisión no implica ausencia de riesgos.

En El Salvador no existe, hasta la fecha, evidencia documentada de la producción o liberación comercial de cultivos transgénicos destinados a la agricultura o a la alimentación humana. La ausencia de OGM cultivados localmente responde, en gran medida, a un marco regulatorio restrictivo y a la falta de lineamientos específicos que autoricen su uso productivo, más que a una prohibición explícita ampliamente desarrollada. Esta situación es comparable a la de varios países de Centroamérica, donde la adopción de OGM ha sido limitada o inexistente a nivel de producción agrícola comercial (FAO, 2021). No obstante, la inexistencia de cultivos transgénicos locales no implica una ausencia total de OGM en el sistema alimentario nacional. La adopción de marcos regulatorios para organismos genéticamente modificados en El Salvador y Centroamérica debe basarse en los principios internacionales de bioseguridad, particularmente en el enfoque de evaluación caso por caso propuesto por el Protocolo de Cartagena (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2000), pero adaptándose a las capacidades técnicas, productivas y sociales del contexto regional. La aplicación automática de modelos altamente restrictivos, como el de la Unión Europea, puede resultar poco funcional en sistemas agrícolas dominados por pequeños productores y con alta dependencia de importaciones de granos básicos (Davison, 2010; Entine et al., 2021).

3.6.1 Controversias y riesgos potenciales. Entre los riesgos técnicos más discutidos está la posibilidad de mutaciones fuera del objetivo (*off-target effects*), es decir, cambios no intencionados en otras regiones del ADN. Aunque poco frecuentes, se han detectado incluso en condiciones de alta fidelidad, lo que evidencia que la especificidad de herramientas como CRISPR-Cas9 no es absoluta (Kosicki et al., 2018). Estos cambios pueden generar fenotipos no previstos o afectar vías metabólicas esenciales, un aspecto que cobra relevancia cuando se trata de organismos destinados a la cadena alimentaria.

3.6.2 Ámbito ecológico. Se documenta el riesgo de impactos indirectos, como la aparición de resistencias en plagas o malezas por presión de selección. Este fenómeno, observado en cultivos transgénicos resistentes a herbicidas, ha llevado a incrementos en el uso de agroquímicos o a la necesidad de combinaciones de estrategias para mantener la eficacia (Gassmann et al., 2014; Heap, 2023). En algunos casos, el flujo génico hacia especies silvestres

ha derivado en híbridos con mayor competitividad, alterando el equilibrio de ecosistemas locales (Ellstrand, 2018).

3.6.3 Perspectiva socioeconómica. La concentración de patentes de tecnologías de edición genética en un reducido número de empresas y universidades implica riesgos de dependencia tecnológica y posibles barreras de acceso para pequeños productores o países con menos recursos (van der Oost et al., 2017). El caso de las disputas legales entre el Broad Institute y la Universidad de California sobre la titularidad de CRISPR ilustra cómo los conflictos por propiedad intelectual pueden ralentizar o encarecer la aplicación de la tecnología (Sherkow, 2017).

3.6.4 Aceptación pública de los OGM: diferencias culturales y regionales. La aceptación pública de las nuevas herramientas de edición genética depende menos del conocimiento técnico de la población y más de factores sociopolíticos, como la confianza en las instituciones reguladoras, la percepción de beneficios tangibles y la transparencia de los procesos de control. Diversos estudios coinciden en que la disposición de las personas a aceptar alimentos modificados aumenta significativamente cuando perciben que los organismos científicos y estatales son confiables y comunican los riesgos de manera clara y accesible (Shew et al., 2018; McFadden & Smyth, 2019). De tal manera, la falta de participación ciudadana temprana y la opacidad institucional pueden derivar en resistencia social y bloqueos regulatorios, como ocurrió en Europa tras la introducción de los primeros cultivos transgénicos (Davison, 2010).

Desde una perspectiva comparativa, la aceptación social presenta marcadas diferencias culturales y regionales. En América del Norte y varios países de América Latina, donde predomina una visión más pragmática de la innovación agrícola y una mayor confianza en la evaluación científica del riesgo, los OGM han sido aceptados principalmente por sus beneficios productivos y económicos. En cambio, en gran parte de Europa, la percepción pública está fuertemente influida por valores culturales asociados a la naturalidad de los alimentos, la precaución ambiental y la desconfianza histórica hacia la industrialización del sistema alimentario, lo que se traduce en una actitud más crítica incluso frente a tecnologías de alta precisión (European Commission, 2021). Estudios recientes muestran que tecnologías como

CRISPR-Cas9 tienden a recibir una valoración relativamente más favorable cuando se perciben beneficios directos para la salud humana o el ambiente, aunque los cuestionamientos éticos y ecológicos persisten independientemente de la solidez de la evidencia científica (Pew Research Center, 2020). En síntesis, la aceptación social de los OGM no depende de la técnica en sí, sino del contexto cultural, la gestión institucional y la calidad de la comunicación científica.

4. METODOLOGÍA

El presente trabajo corresponde a una revisión documental de carácter cualitativo y analítico, orientada a examinar el uso de organismos transgénicos en la producción de alimentos desde una perspectiva científica, técnica y ética. La recopilación de información se basó en fuentes bibliográficas especializadas, tales como artículos científicos, informes técnicos, revisiones académicas y documentos institucionales vinculados con la biotecnología alimentaria.

Las publicaciones seleccionadas se eligieron conforme a su relevancia y actualidad, priorizando investigaciones recientes sobre OGM y sus aplicaciones en biofortificación, resistencia a plagas, tolerancia a herbicidas, edición genética mediante CRISPR y uso de enzimas recombinantes en la industria alimentaria.

A partir del análisis de estas fuentes se identificaron los principales enfoques metodológicos empleados por los investigadores —ensayos de campo, pruebas de laboratorio y análisis estadísticos—, lo que permitió comprender la validez y alcance de los resultados reportados. La información se organizó en categorías de análisis para comparar coincidencias, divergencias y tendencias entre los estudios revisados, con el fin de establecer conclusiones fundamentadas sin recurrir a experimentación directa.

El objetivo metodológico fue, por tanto, sintetizar y describir las metodologías aplicadas en las investigaciones empíricas consultadas, mostrando cómo los distintos enfoques científicos han contribuido al conocimiento sobre los transgénicos en la producción alimentaria.

4.1 Metodología de campo.

Las investigaciones agronómicas revisadas implementaron ensayos en condiciones reales de cultivo y ensayos controlados (invernadero y parcela). Los diseños más frecuentes fueron ensayos comparativos con controles convencionales, réplicas en parcelas y ensayos de parcelas a campo abierto, donde se midieron variables tales como rendimiento (kg/ha), incidencia de plagas, daño por insectos y presencia de micotoxinas. En varios estudios sobre maíz Bt se emplearon muestreos por parcelas y evaluación de daño entomológico, reportándose reducciones de daño y pérdidas que, según algunos autores incluidos, pueden oscilar en rangos reportados (por ejemplo, reducciones reportadas entre ~16% y 21% en

ciertos contextos). Otros ensayos (p. ej., pruebas para tolerancia a herbicidas como SCB-29) aplicaron tratamientos con dosis crecientes de herbicida (0 a 3600 g/ha) y compararon respuestas fisiológicas y rendimiento entre tratamientos y controles. Estas aproximaciones de campo se combinan con protocolos de manejo agronómico (rotación, refugios) para evaluar el desempeño real de los rasgos transgénicos bajo prácticas agrícolas.

4.2 Metodología de laboratorio.

Los estudios bioquímicos y moleculares consultados emplearon técnicas de laboratorio estándar para caracterizar transgenes, cuantificar metabolitos y medir actividad enzimática. Entre las técnicas reportadas en las fuentes revisadas se encuentran: transformaciones vía *Agrobacterium* y biobalística para obtención de líneas transgénicas; ensayos de expresión génica y cuantificación de proteínas (PCR, qRT-PCR y secuenciación para validar ediciones y confirmación de inserciones); análisis cromatográficos (HPLC) para cuantificar carotenoides en cultivos biofortificados (por ejemplo, contenidos como 10,6 µg/g de β-caroteno reportados en ensayos sobre arroz dorado en ciertos estudios); y ensayos bioquímicos para medir actividad enzimática en unidades por mililitro (U/mL) en cepas recombinantes (ej.: valores reportados en las fuentes revisadas como ~190 U/mL frente a ≈60 U/mL en controles para fitasas). En investigaciones sobre reducción de alergenicidad mediante CRISPR se documenta el uso de secuenciación profunda y ensayos de expresión para cuantificar la disminución de epítomos (por ejemplo, reducciones del orden del 85 % en la expresión de determinados epítomos en trabajos revisados). Estas técnicas de laboratorio permitieron confirmar la presencia, eficacia y estabilidad de rasgos introducidos o editados.

4.3 Metodología estadística y de análisis de datos.

Los estudios empíricos complementaron sus datos experimentales con análisis estadísticos descriptivos e inferenciales para evaluar significancia y tamaño del efecto. Entre los procedimientos mencionados en las fuentes se incluyen: análisis de varianza (ANOVA) para comparar medias entre tratamientos, pruebas de significación (p. ej., $p < 0.05$) para establecer diferencias estadísticamente robustas, análisis de regresión y comparaciones múltiples cuando

los diseños lo requerían. En estudios de optimización de producción de enzimas se usaron diseños experimentales y metodologías de respuesta de superficie (por ejemplo, Diseño Compuesto Central — CCD— dentro de RSM) para modelar la influencia de variables como pH, temperatura e inductor en la actividad enzimática. Adicionalmente, los ensayos de campo con dosis crecientes (p. ej. herbicidas) incluyeron análisis comparativos entre tratamientos y controles, con reportes de diferencias no significativas en algunos parámetros ($p > 0.05$) según los autores. Estos enfoques estadísticos validaron la robustez de los hallazgos y permitieron extraer conclusiones sobre eficacia y estabilidad de los rasgos biotecnológicos.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis documental permitió identificar los principales aportes científicos relacionados con el uso de organismos transgénicos en la producción de alimentos, a partir de los distintos enfoques revisados. En conjunto, las investigaciones evidencian que el desarrollo de cultivos modificados genéticamente y la aplicación de técnicas biotecnológicas han generado impactos positivos en la productividad agrícola y la calidad de los alimentos, aunque persisten desafíos éticos, ambientales y regulatorios que deben ser considerados.

5.1 Cultivos Bt y resistencia a plagas

Los estudios sobre cultivos Bt revisados en este trabajo coinciden en que la inserción de genes que codifican proteínas insecticidas ha reducido de forma significativa el daño causado por plagas, especialmente en maíz y algodón. Los ensayos de campo reportan disminuciones superiores al 20% en el daño por insectos y una reducción notable en el uso de insecticidas químicos. Sin embargo, las fuentes también señalan que el uso prolongado de un mismo evento transgénico puede favorecer la aparición de resistencias en poblaciones de plagas, por lo que se recomienda implementar estrategias de manejo integrado, como la rotación de cultivos y el uso de refugios biológicos.

5.2 Biofortificación y calidad nutricional

En el ámbito nutricional, los proyectos de biofortificación genética, como el *arroz dorado* (*Golden Rice*), demuestran la posibilidad de incrementar el contenido de β -caroteno, precursor de la vitamina A, sin afectar el rendimiento agronómico. Los estudios citados muestran que las concentraciones de provitamina A en el grano alcanzan niveles que pueden contribuir a mitigar la deficiencia de micronutrientes en regiones con inseguridad alimentaria. No obstante, los investigadores destacan que la estabilidad del compuesto durante el almacenamiento y la cocción sigue siendo un factor determinante para su efectividad real en la dieta.

5.3 Enzimas recombinantes y biotecnología industrial

Otra línea de investigación documental aborda la producción de enzimas recombinantes mediante microorganismos modificados genéticamente. Estas investigaciones de laboratorio reportan incrementos significativos en la actividad enzimática, alcanzando valores de hasta 190 U/mL frente a 60 U/mL en cepas control, lo que representa un aumento considerable en la eficiencia de los procesos industriales. Tales resultados confirman que la manipulación genética puede mejorar el aprovechamiento de recursos biológicos y reducir los costos de producción alimentaria, siempre que se mantengan medidas de control y bioseguridad adecuadas.

5.4 Edición genética y reducción de alergenicidad

Las fuentes más recientes analizadas reflejan la incorporación de herramientas de edición genética CRISPR-Cas9, que permiten modificaciones precisas sin introducir genes externos. Un ejemplo documentado corresponde a la reducción de epítomos alergénicos en trigo, donde se registró una disminución de hasta el 85% en la expresión de proteínas inmunorreactivas. Este tipo de avances sugiere que la biotecnología moderna no solo busca mejorar la productividad, sino también elevar la seguridad alimentaria al disminuir los riesgos de alergias en consumidores sensibles.

5.5 Aspectos regulatorios, éticos y ambientales

A nivel global, las investigaciones revisadas evidencian diferencias significativas en los marcos regulatorios y en la aceptación pública de los transgénicos. Documentos institucionales y revisiones académicas destacan la importancia de aplicar los principios del Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología, que promueve la evaluación de riesgos antes de la liberación comercial. Asimismo, se plantea la necesidad de fortalecer la transparencia informativa y la comunicación científica para contrarrestar percepciones negativas asociadas al uso de OGM. Desde una perspectiva ética, los autores coinciden en que la biotecnología debe orientarse hacia el bien común, priorizando la salud humana, la protección ambiental y la soberanía alimentaria.

En conjunto, las fuentes analizadas permiten concluir que la biotecnología aplicada a la producción de alimentos ha demostrado beneficios tangibles en rendimiento, calidad y eficiencia, respaldados por metodologías rigurosas de campo, laboratorio y análisis estadístico. Sin embargo, los resultados también confirman que su implementación requiere regulación constante, monitoreo científico y responsabilidad social para garantizar la sostenibilidad del sistema alimentario y el respeto al equilibrio ecológico.

6. CONCLUSIONES

La revisión crítica de la literatura científica, muestra que los OGM se han consolidado como una herramienta relevante en la agricultura y los sistemas agroalimentarios, con aplicaciones que abarcan el control de plagas, la tolerancia a herbicidas y la mejora del valor nutricional de los cultivos. La evidencia disponible respalda su contribución al rendimiento productivo y a la calidad de los alimentos, siempre que su desarrollo y uso estén acompañados de evaluaciones rigurosas de seguridad ambiental y alimentaria.

No obstante, el avance acelerado de la biotecnología aplicada a la agricultura ha superado, en muchos casos, la capacidad de adaptación de los marcos normativos. Mientras las referencias internacionales establecen criterios generales de evaluación de riesgos, las normativas regionales presentan enfoques divergentes, como el tratamiento homogéneo de la edición génica y la transgénesis en la Unión Europea, frente a esquemas diferenciados basados en la presencia de ADN externo en países como Estados Unidos, Argentina y Japón. Esta heterogeneidad regulatoria condiciona la adopción de tecnologías como CRISPR y plantea desafíos para la armonización y la trazabilidad.

En este contexto, la implementación responsable de los OGM requiere un enfoque integral que considere, no sólo los aspectos técnicos, sino también las dimensiones ecológicas, socioeconómicas y regulatorias, junto con la aceptación pública. La evidencia revisada subraya la importancia de una regulación adaptativa, la evaluación a largo plazo de impactos y el fortalecimiento de la comunicación científica y la educación, como elementos clave para reducir la brecha entre el avance tecnológico y su legitimidad social, garantizando así un uso sostenible de estas tecnologías en la agricultura y la producción de alimentos.

7. RECOMENDACIÓN

Los OGM continúan representando una herramienta clave para enfrentar los retos de la seguridad alimentaria, el cambio climático y la sostenibilidad agrícola. La evidencia científica respalda su contribución en la mejora del rendimiento, la reducción de pérdidas por plagas y enfermedades, y el incremento en la calidad nutricional de los cultivos. No obstante, el uso de OGM debe estar respaldado a largo plazo, acompañado de evaluaciones rigurosas de bioseguridad, análisis de impacto socioeconómico y una regulación transparente que fomente la confianza pública y la adopción responsable. Finalmente, es necesario invertir en programas de educación y divulgación que acerquen al público la evidencia científica, con el fin de reducir la brecha entre el avance tecnológico y su aceptación social.

8. BIBLIOGRAFÍAS

Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2014). *Molecular biology of the cell* (6th ed.). Garland Science.

Arena, M. P., Capozzi, V., Russo, P., Drider, D., Spano, G., & Fiocco, D. (2016). *Lactic Acid Bacteria and Bacteriocins: Classification, Biochemistry and Applications in Food Safety*. *Frontiers in Microbiology*, 7, 863. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00863>

Boeke, J. D., Church, G., Hessel, A., Kelley, N. J., Arkin, A., Cai, Y., ... & Weiss, R. (2016). The genome project-write. *Science*, 353(6295), 126-127. <https://doi.org/10.1126/science.aaf6850>

Bollinedi, H., Saraswathi, R., Ranganathan, C., Sudhakar, D., Balachandran, S. M., & Sundaram, R. M. (2019). Stability of carotenoids in Golden Rice lines under storage and different processing conditions. *Food Chemistry*, 278, 773–779. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.116>

Bouis, H. E., & Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 12, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>

Brookes, G., & Barfoot, P. (2020). GM crops: Global socio-economic and environmental impacts 1996–2018. *PG Economics Ltd*.

Brown, T. A. (2016). *Gene cloning and DNA analysis: An introduction* (7.^a ed.). Wiley. DOI:<https://www.wiley.com/en-us/Gene+Cloning+and+DNA+Analysis%3A+An+Introduction%2C+7th+Edition-p-9781119072560>

Chamas, A. (2000). Alimentos transgénicos. *Invenio*, 3(4-5), 149–159. <https://www.redalyc.org/pdf/877/87730512.pdf>

Chen, Y., Zhang, H., Wang, R., Liu, S., & Li, J. (2023). *Development and evaluation of a glyphosate- and glufosinate-tolerant maize line SCB-29 with dual herbicide resistance traits*. *Plant Biotechnology Journal*, 21(3), 478–490. <https://doi.org/10.1111/pbi.13985>

ChileBio. (2015). *Manual de consulta sobre cultivos transgénicos*. <https://www.chilebio.cl/wp-content/uploads/2015/09/ARCHIVADOR.pdf>

Cyranoski, D. (2019). The CRISPR-baby scandal: what's next for human gene-editing. *Nature*, 566(7745), 440–442. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00673-1>

Davison, J. (2010). *GM plants: Science, politics and EC regulations*. *Plant Science*, 178(2), 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.11.009>

De Moura, F. F., Palmer, A. C., Finkelstein, J. L., Haas, J. D., Murray-Kolb, L. E., Wenger, M. J., ... & Rocheford, T. (2016). Biofortified β -carotene rice improves vitamin A intake and reduces the prevalence of inadequacy among women and young children in a simulated analysis in Bangladesh, Indonesia, and the Philippines. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 104(3), 769–776. <https://doi.org/10.3945/ajcn.116.135228>

Delves-Broughton, J., Blackburn, P., Evans, R. J., & Hugenholtz, J. (1996). *Applications of the bacteriocin, nisin*. *Antonie van Leeuwenhoek*, 69(2), 193–202. <https://doi.org/10.1007/BF00399425>

Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213), 1258096. <https://doi.org/10.1126/science.1258096>

Dubock, A. (2023). Golden Rice: From laboratory to field to health impact. *GM Crops & Food*, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/21645698.2023.2174971>

Entine, J., Uhl, E., & Hileman, B. (2021). *Regulatory frameworks for genome-edited crops*. *Trends in Biotechnology*, 39(8), 789–798. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.03.005>

European Commission. (2021). *Special Eurobarometer 504: Europeans, agriculture and the CAP*. Publications Office of the European Union.

FAO. (2021). *The state of food and agriculture 2021*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FDA (U.S. Food and Drug Administration). (2017). *Biotechnology consultation note to file BNF 000158: Golden Rice GR2E*. Retrieved from <https://www.fda.gov/media/111304/download>

Gaines, T. A., Zhang, W., Wang, D., et al. (2010). Gene amplification confers glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(3), 1029–1034. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906649107>

Gänzle, M. G. (2015). *Lactic metabolism revisited: Metabolism of lactic acid bacteria in food fermentations and food spoilage*. *Current Opinion in Food Science*, 2, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.03.001>

Hsu, P. D., Lander, E. S., & Zhang, F. (2014). Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. *Cell*, 157(6), 1262–1278. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.05.010>

Huang, J., Wei, Y., Wang, S., & Xie, J. (2022). *Production and characterization of a recombinant α -galactosidase from Pichia pastoris for potential food industry applications*. *Food Chemistry*, 373, 131447. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131447>

Illanes, A., Cauerhff, A., Wilson, L., & Castro, G. R. (2020). *Recent trends in biocatalysis engineering*. *Bioresource Technology*, 295, 122261. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122261>

International Human Genome Sequencing Consortium. (2004). Finishing the euchromatic sequence of the human genome. *Nature*, 431(7011), 931–945. <https://doi.org/10.1038/nature03001>

ISAAA. (2006). *Development of transgenic crops*. Recuperado de https://www.isaaa.org/kc/inforesources/publications/biotechninagriculture/Development_of_transgenic_crops.htm

International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications. (2006). *Pocket K No. 17: Genetic Engineering and GM Crops*. <https://isaaa.org/resources/publications/pocketk/17/>

Jouanin, A., Boyd, L. A., Visser, R. G. F., & Smulders, M. J. M. (2020). *Development of wheat with hypoimmunogenic gluten epitopes via CRISPR/Cas9 genome editing*. *Plant Biotechnology Journal*, 18(12), 2561–2573. <https://doi.org/10.1111/pbi.13451>

Klümper, W., & Qaim, M. (2014). A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. *PLOS ONE*, 9(11), e111629. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>

Leroy, F., & De Vuyst, L. (2020). *Fermented food microbiomes in a dynamic world: Challenges for future food production*. *Current Opinion in Food Science*, 32, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.006>

Li, Y., Liu, X., Zhao, J., Zhang, H., & Chen, W. (2022). *Engineering of Lactobacillus plantarum for enhanced production of ferulic acid via the expression of feruloyl esterase and optimization of culture conditions*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 833771. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.833771>

Lodish, H., Berk, A., Kaiser, C. A., Krieger, M., Bretscher, A., Ploegh, H., Amon, A., & Martin, K. C. (2021). *Molecular cell biology* (9.^a ed.). W. H. Freeman.

Long, C., McAnally, J. R., Shelton, J. M., Mireault, A. A., Bassel-Duby, R., & Olson, E. N. (2016). Prevention of muscular dystrophy in mice by CRISPR/Cas9-mediated editing of germline DNA. *Science*, 345(6201), 1184–1188. <https://doi.org/10.1126/science.1254445>

Lu, Y., Wu, K., Jiang, Y., Guo, Y., & Desneux, N. (2012). Widespread adoption of Bt cotton and insecticide decrease promotes biocontrol services. *Nature*, 487(7407), 362–365. <https://doi.org/10.1038/nature11153>

Marone, D., Mastrangelo, A. M., & Borrelli, G. M. (2023). From Transgenesis to Genome Editing in Crop Improvement: Applications, Marketing, and Legal Issues. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(8), 7122. <https://doi.org/10.3390/ijms24087122>

Napier, J. A., Haslam, R. P., Tsalavouta, M., & Sayanova, O. (2019). The challenges of delivering genetically modified crops with nutritional enhancement traits. *Nature Plants*, 5, 563–567. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0447-x>

Nicholl, D. S. T. (2008). *An introduction to genetic engineering* (3rd ed.). Cambridge University Press.

Niemann, H., & Kues, W. A. (2007). Transgenic farm animals: an update. *Reproduction, Fertility and Development*, 19(6), 762–770. <https://doi.org/10.1071/RD07007>

Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>

Padgett, S. R., Kolacz, K. H., Delannay, X., et al. (1995). Development, identification, and characterization of a glyphosate-tolerant soybean line. *Crop Science*, 35(5), 1451–1461. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500050032x>

Paine, J. A., Shipton, C. A., Chaggar, S., et al. (2005). Improving the nutritional value of Golden Rice through increased pro-vitamin A content. *Nature Biotechnology*, 23, 482–487. <https://doi.org/10.1038/nbt1082>

Panda, T., Gowrishankar, B. S., & Khan, A. A. (2021). *Advances in enzyme technology for industrial and biotechnological applications*. *Enzyme and Microbial Technology*, 149, 109835. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2021.109835>

Potrykus, I. (2010). Lessons from the “Humanitarian Golden Rice” project: Regulation prevents development of public good genetically engineered crop products. *GM Crops & Food*, 1(2), 68–71. <https://doi.org/10.4161/gmcr.1.2.11558>

Potrykus, I. (2022). Lessons from Golden Rice: A science and policy case study. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 89–112. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-090921-101940>

Potvin, G., Ahmad, A., & Zhang, Z. (2015). *Optimization of recombinant phytase production in Pichia pastoris using response surface methodology*. *Biotechnology Reports*, 6, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.11.004>

Qaim, M. (2020). Role of new plant breeding technologies for food security and sustainable agricultural development. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 42(2), 129–150. <https://doi.org/10.1002/aepp.13044>

Qaim, M., & Zilberman, D. (2003). Yield effects of genetically modified crops in developing countries. *Science*, 299(5608), 900–902. <https://doi.org/10.1126/science.1080609>

Sambrook, J., & Russell, D. W. (2001). *Molecular cloning: A laboratory manual* (3rd ed.). Cold Spring Harbor Laboratory Press.

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*. *Plant Biotechnology Journal*, 16(4), 902–910. <https://doi.org/10.1111/pbi.12837>

Sautter, C., Gruissem, W., & Potrykus, I. (2018). Postharvest losses of provitamin A in Golden Rice: Quantitative analysis and recommendations for handling. *Food Chemistry*, 240, 519–526. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.142>

Shapiro, B. (2015). *How to clone a mammoth: The science of de-extinction*. Princeton University Press.

Shelton, A. M., Zhao, J. Z., & Roush, R. T. (2002). Economic, ecological, food safety, and social consequences of the deployment of Bt transgenic plants. *Annual Review of Entomology*, 47(1), 845–881. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.47.091201.145128>

Slamet-Loedin, I. H., et al. (2021). Performance of Golden Rice GR2E introgressed into mega rice variety BRRI dhan29 under confined field conditions in Bangladesh. *Frontiers in Plant Science*, 12, 619739. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.619739>

Slamet-Loedin, I. H., Johnson-Beebout, S. E., Impa, S., Aung, M. S., Kretschmar, T., Rahman, M. A., & Solon, F. (2021). Biofortified indica rice attains iron and zinc nutrition dietary targets in the field. *Scientific Reports*, 11(1), 3302. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82692-z>

Stein, A. J., & Rodríguez-Cerezo, E. (2009). *The global pipeline of new GM crops: Implications of asynchronous approval for international trade*. JRC Scientific and Technical Reports, European Commission. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC52599>

Tabashnik, B. E., & Carrière, Y. (2017). Surge in insect resistance to transgenic crops and prospects for sustainability. *Nature Biotechnology*, 35(10), 926–935. <https://doi.org/10.1038/nbt.3974>

Tang, G., Qin, J., Dolnikowski, G. G., Russell, R. M., & Grusak, M. A. (2009). Golden Rice is an effective source of vitamin A. *American Journal of Clinical Nutrition*, 89(6), 1776–1783. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2008.27119>

Visioli, G., D'Egidio, M. G., De Vita, P., & Masci, S. (2020). *High-quality low-gluten durum wheat lines through CRISPR/Cas9 editing of gliadin genes*. *Agronomy*, 10(4), 487. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040487>

Watson, J. D., Baker, T. A., Bell, S. P., Gann, A., Levine, M., & Losick, R. (2013). *Molecular biology of the gene* (7th ed.). Pearson Education.

World Health Organization (WHO). (2023). Vitamin A deficiency. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/vitamin-a-deficiency>

Zhang, Y., Xue, C., Li, X., Dong, L., & Sun, H. (2022). *Enhanced butyric acid production in Clostridium tyrobutyricum by overexpressing rate-limiting enzymes in the Embden-Meyerhof-Parnas pathway*. *Journal of Biotechnology*, 344, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.02.002>

Zhang, Z., Liu, Y., & Wang, M. (2020). *Heterologous expression of α -amylase in *Lactobacillus plantarum* for starch degradation*. *Microbial Cell Factories*, 19, 116. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01385-0>

Zhou, L., et al. (2023). Multi-year field evaluation of Bt maize expressing Cry1Ab/Cry2Aj for resistance to Asian corn borer and mycotoxin reduction. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1120063. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1120063>

9. ANEXOS.

Cuadro A-1. Ensayos y resultados del maíz transgénico SCB-29 con tolerancia múltiple a herbicidas.

Tipo de ensayo	Condiciones y tratamientos	Variables evaluadas	Resultados principales	Interpretación
Ensayo controlado (invernadero)	Dosis crecientes de glifosato y glufosinato: 0, 900, 1800, 2700, 3600 g/ha	- Altura de planta- Contenido de clorofila (SPAD)- Fenotipo de estrés visual	- Reducción <5 % en altura y SPAD incluso a dosis máximas- Fenotipo de estrés mínimo	Alta tolerancia fisiológica en condiciones controladas; los mecanismos de resistencia se mantienen activos bajo presión química directa.
Ensayo a campo abierto	Aplicación combinada de glifosato y glufosinato, replicación en parcelas agrícolas bajo siembra directa.	- Rendimiento (kg/ha) - Altura de planta- Uniformidad de espiga	- Pérdida de rendimiento ≤ 3 % a la dosis máxima- Altura de planta estable Espigas uniformes sin deformaciones relevantes.	El híbrido mantiene su productividad y calidad morfológica en condiciones reales de manejo intensivo.
Evaluación de estabilidad	Comparación entre tratamientos y controles sin herbicida	Consistencia de variables fisiológicas y de Rendimiento	- Diferencias no significativas ($p > 0.05$) en la mayoría de parámetros - Respuesta homogénea en distintas condiciones	La resistencia combinada es estable y predecible; minimiza el riesgo de pérdida de productividad en programas de control químico dual.

Fuente: Adaptado de Chen et al. (2023).

Cuadro A-2. Comparación entre cepa recombinante y cepa silvestre de *Lactobacillus plantarum* en parámetros fermentativos.

Parámetro evaluado	Cepa Parental	Cepa Recombinante
Actividad enzimática total (kU/L)	6.2	13.1
Actividad en el sobrenadante (kU/L)	3	8.1
Tiempo de fermentación del sustrato (h)	48 h	24 h
Acidificación del medio (ph final)	4.3	3.8
Estabilidad frente a variaciones de ph	Baja	Alta
Vida útil del producto fermentado estimado (días)	10	16

Fuente: Adaptado según datos del estudio de Zhang et al. (2017) y análisis comparativos a partir de Chen et al. (2020).

Cuadro A-3. Comparación de estudios sobre el impacto del maíz Bt en la reducción de pérdidas por plagas (Shelton et al., 2002; Zhou et al., 2023; James, 2014; Qaim, 2009; Klümper & Qaim, 2014).

País/Región	Cultivo Bt	Reducción de pérdidas por plagas (%)	Plaga principal controlada
Filipinas	Maíz Bt (Cry1Ab)	Hasta 80 %	<i>Ostrinia furnacalis</i> (taladro del maíz)
China	Maíz Bt (Cry1Ab/Cry2Aj)	16,4 % – 21,3 %	<i>Ostrinia furnacalis</i>
Sudáfrica	Maíz Bt	60 % – 85 %	Plagas lepidópteras variadas
India	Maíz Bt	50 % – 70 %	Plagas perforadoras del tallo

Fuente: Elaboración propia con base en literatura científica revisada por pares.

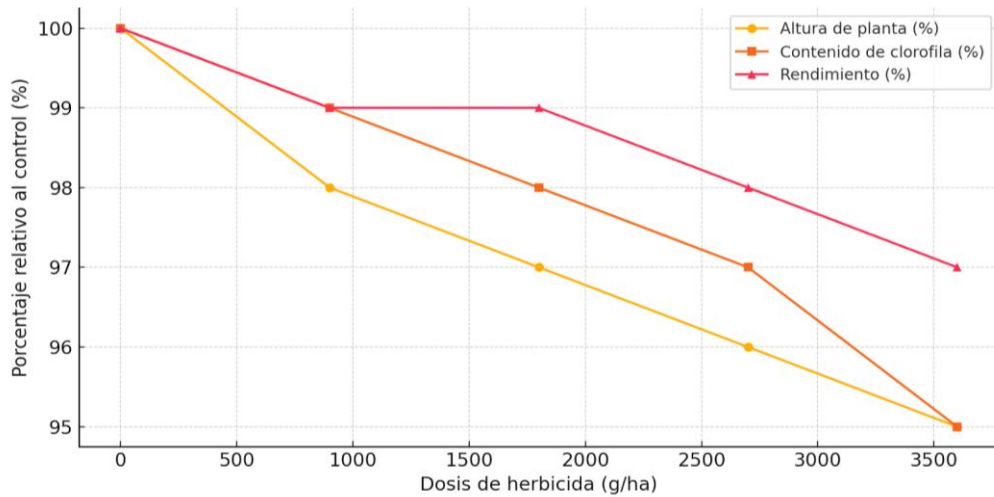


Figura A-1. Efecto de distintas dosis de herbicidas sobre maíz SCB-29 (Chen et al., 2023).



Figura A-2. Diferencias entre granos de arroz dorado y arroz blanco (International Rice Research Institute (2011)).

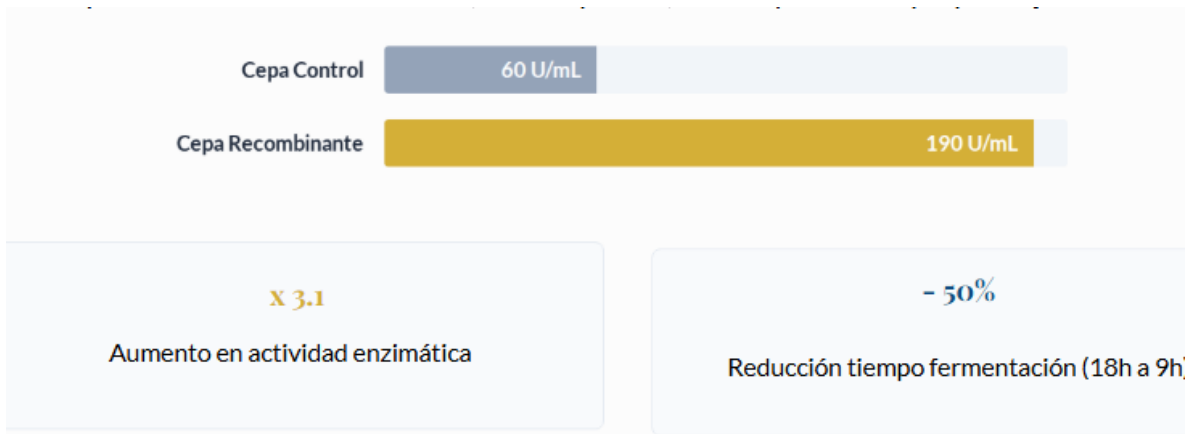


Figura A-3. Comparación de actividad enzimática (en *Pichia pastoris*) entre cepas control y cepas mejoradas (elaboración propia basada en Potvin et al., 2015).