



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE MEDICINA

GRADO EN NUTRICIÓN HUMANA Y DIETÉTICA

**NUTRICIÓN, SEGURIDAD
ALIMENTARIA Y SOSTENIBILIDAD
DEL MAÍZ MODIFICADO
GENÉTICAMENTE**

AUTOR

Mauro Michele Guerrisi

TUTORES

Dr. Francisco Javier Arias Vallejo

Dra. Alessandra Girotti

Curso 2022-2023

RESUMEN

El crecimiento acelerado de la población ha provocado un aumento de la prevalencia del hambre, lo que requiere que se lleven a cabo estrategias para satisfacer estas demandas. El cultivo de alimentos modificados genéticamente es una opción para aumentar la producción de alimentos y mejorar su calidad. El maíz (*Zea mays* L.) es el principal cereal consumido en el mundo y ha sido objeto de estudio de la biotecnología durante décadas. La aceptación de este tipo de alimentos varía según la región del mundo, en la Unión Europea aún hay cierto rechazo hacia estos a pesar de que no haya una evidencia científica sólida que respalde un impacto negativo sobre la salud. En el presente trabajo se compara el maíz no modificado con su homólogo transgénico en cuanto a sus propiedades nutricionales, se discute si su consumo implica un riesgo para la salud y se valora el impacto ambiental que pueda suponer su cultivo, así como su sostenibilidad a nivel económico.

Palabras clave: maíz modificado genéticamente, nutrición, seguridad alimentaria.

ABSTRACT

The accelerated growth of the population has caused an increase in the prevalence of hunger, which requires that strategies be carried out to satisfy these demands. The cultivation of genetically modified foods is an option to increase food production and improve its quality. Maize (*Zea mays* L.) is the main cereal consumed in the world and has been the subject of biotechnology study for decades. The acceptance of this type of food varies according to the region of the world, in the European Union there is still some aversion towards them despite the fact that there is no solid scientific evidence that supports a negative impact on health. In the present work, unmodified maize is compared with its transgenic counterpart in terms of its nutritional properties, it is discussed whether its consumption implies a risk to health and the environmental impact that its cultivation may entail is assessed, as well as its sustainability in an economic sense.

Keywords: genetically modified maize, nutrition, food safety.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	4
III. METODOLOGÍA.....	5
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	6
4.1 El maíz como cultivo.....	6
4.1.1 Características morfológicas.....	6
4.1.2 El grano de maíz.....	7
4.1.3 Tipos de maíz.....	8
4.1.4 Composición nutricional.....	9
4.2 El maíz transgénico.....	9
4.2.1 Maíz resistente a insectos.....	10
4.2.2 Maíz tolerante a herbicidas.....	10
4.2.3 Transformación del maíz.....	11
4.3 El maíz transgénico en el ámbito nutricional.....	12
4.3.1 Aminoácidos.....	13
4.3.2 Ácidos grasos poliinsaturados.....	15
4.3.3 Vitaminas.....	16
4.3.4 Minerales.....	19
4.4 Seguridad alimentaria del maíz transgénico.....	20
4.4.1 Alergenicidad.....	20
4.4.2 Toxicidad.....	21
4.5 Sostenibilidad ambiental.....	22
4.5.1 Flujo genético.....	22
4.5.2 Impacto en organismos no objetivos.....	22
4.5.3 Beneficios ambientales.....	23
V. CONCLUSIONES.....	24
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
VII. ANEXOS.....	29
7.1 Lista de abreviaturas.....	29
7.2 Índice de figuras.....	30
7.3 Índice de tablas.....	30

I. INTRODUCCIÓN

En tan solo una década la población mundial ha sumado casi 1000 millones de habitantes, alcanzando en noviembre de 2022 una población de 8000 millones de personas (Figura 1). El ritmo de crecimiento poblacional es heterogéneo en las distintas regiones del mundo, predominando la fecundidad en África y siendo la más baja en Europa. Considerando las tendencias demográficas observadas se pueden realizar estimaciones; partiendo de una población mundial que ha aumentado significativamente, se pueden esperar resultados parecidos en los siguientes años ⁽²³⁾.

Esta superpoblación dificulta la consecución de los desafíos globales, entre ellos la erradicación del hambre. Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas es el “hambre cero”, que pretende acabar con el hambre en el 2030, a la vez que se logra la seguridad alimentaria, se mejora la nutrición y se promueve la alimentación sostenible. No obstante, en lugar de acercarnos a cumplir dicho objetivo, las cifras indican que nos estamos moviendo en la dirección contraria. De acuerdo con el informe SOFI publicado en 2022, han padecido hambre hasta 828 millones de personas en 2021, lo que representa un 9,8% de la población y supone un aumento del 1,8% en dos años ⁽¹¹⁾. Paralelamente, la inseguridad alimentaria no muestra una evolución positiva, repercutiendo sustancialmente en la prevalencia del hambre y desnutrición.

El término de inseguridad alimentaria hace referencia a la inaccesibilidad a alimentos inocuos y nutritivos, ya sea por la escasez de alimentos o por la falta de recursos para su obtención. Por otro lado, el “hambre” se define como una sensación física incómoda producida por un consumo calórico deficiente ⁽¹⁰⁾. Ambos términos están vinculados, el no tener acceso a alimentos va a desembocar en una situación de hambre o si se tiene acceso, pero dichos alimentos no presentan un perfil nutricional adecuado, se podrán producir estados patológicos como desnutrición, sobrepeso u obesidad. De esta manera, un panorama en el que la inseguridad alimentaria está aumentando a nivel mundial, nos aleja de las metas propuestas en el objetivo “hambre cero”.

Al ser un problema que persiste a lo largo de los años, se han empleado estrategias para cubrir las demandas de este sector de la población mundial, suministrando alimentos tanto nutritivos como inocuos. Para estar a la altura de estas demandas, la biotecnología y los organismos modificados genéticamente han tomado un papel importante en la agricultura, al mejorar el ritmo de producción de alimentos, seguridad alimentaria y sostenibilidad ⁽²⁶⁾.

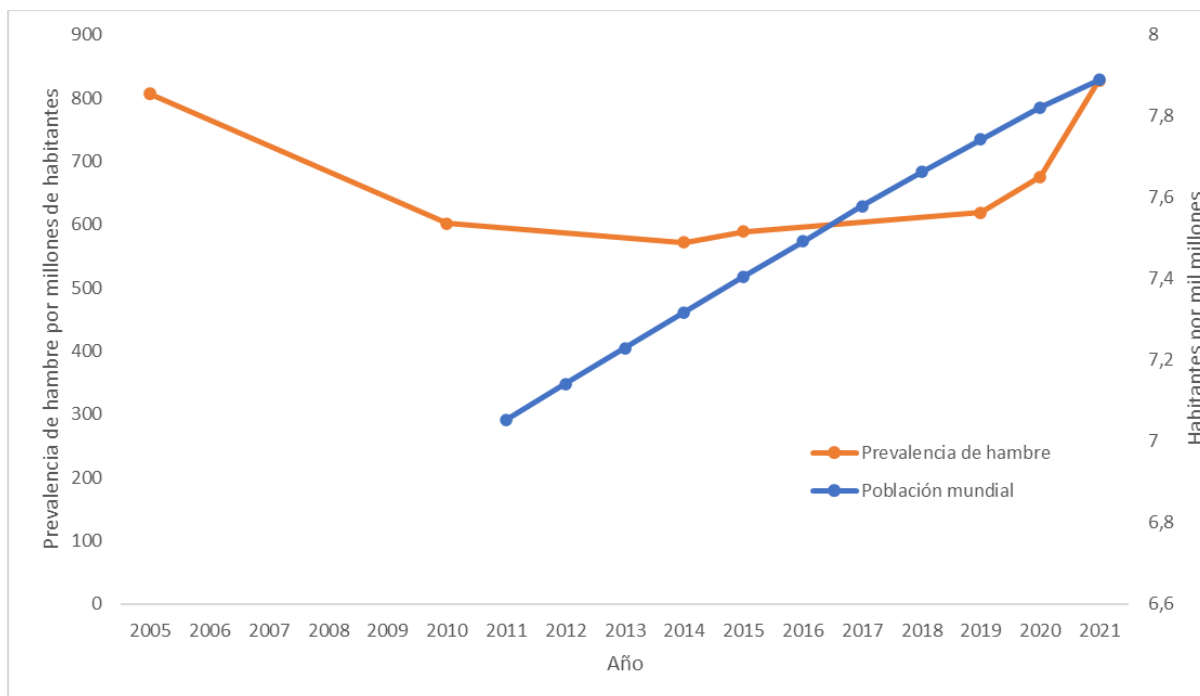


Figura 1. Evolución de la población mundial en la última década y prevalencia de hambre en el mundo. Adaptado de Informe SOFI ⁽¹¹⁾.

Un organismo modificado genéticamente (OMG) u organismo transgénico se define como el organismo, excluyendo a los seres humanos, cuyo material genético ha sido modificado de una forma que no se produce naturalmente en el apareamiento ni en la recombinación natural (Directiva 2001/18/CE). Así, se entiende por “alimentos modificados genéticamente” aquellos que contienen o están compuestos por OMG o han sido producidos a partir de ellos ⁽²⁸⁾.

Los cultivos modificados genéticamente que conocemos hoy en día fueron desarrollados con el objetivo principal de aumentar la resistencia a plagas, mejorar la tolerancia a herbicidas para el control de las malezas y aumentar la resistencia a virus. Además de los usos mencionados, estas especies son utilizadas para obtener un mayor rendimiento, disminuir la pérdida de cultivos, proporcionar mayor vida útil y mejorar las características organolépticas de los alimentos ⁽¹²⁾.

En 1994, en Estados Unidos se comercializó el primer alimento transgénico: el tomate Flavr-Savr; este se caracterizaba por conservarse maduro durante más tiempo y retrasar su putrefacción. Desde entonces se han introducido otras especies modificadas genéticamente como el maíz, soja, algodón, colza, remolacha azucarera y patata, las cuales se encuentran autorizadas para su comercialización en la Unión Europea ⁽³⁾.

Actualmente, el maíz representa el cereal con mayor producción a nivel mundial, situándose por encima del trigo y el arroz con casi 1160 millones de toneladas métricas (Figura 2). Además de ser un cereal importante para el consumo humano, también es destinado a alimentación animal y utilizado como materia prima para una gran cantidad de productos industriales y biocombustibles ⁽¹⁴⁾. En los países en vía de desarrollo se destina principalmente al consumo humano, mientras que en los países desarrollados se prioriza para la alimentación animal.

Con los avances de la ingeniería genética, se ha incrementado en gran medida el cultivo de maíz modificado genéticamente. Este tipo de maíz comercializado se caracteriza principalmente por su resistencia a insectos y tolerancia a herbicidas, estas propiedades suponen un mayor rendimiento del cultivo al disminuir las pérdidas del mismo.

A pesar de que el maíz transgénico lleva alrededor de tres décadas comercializándose, sigue existiendo controversia en torno a su consumo (al igual que otros alimentos del mismo carácter) y se ha prohibido en países de la Unión Europea como Italia o Polonia, sin contar con una base científica sólida. Por el contrario, en el continente americano hay una mayor aceptación por este tipo de alimentos.

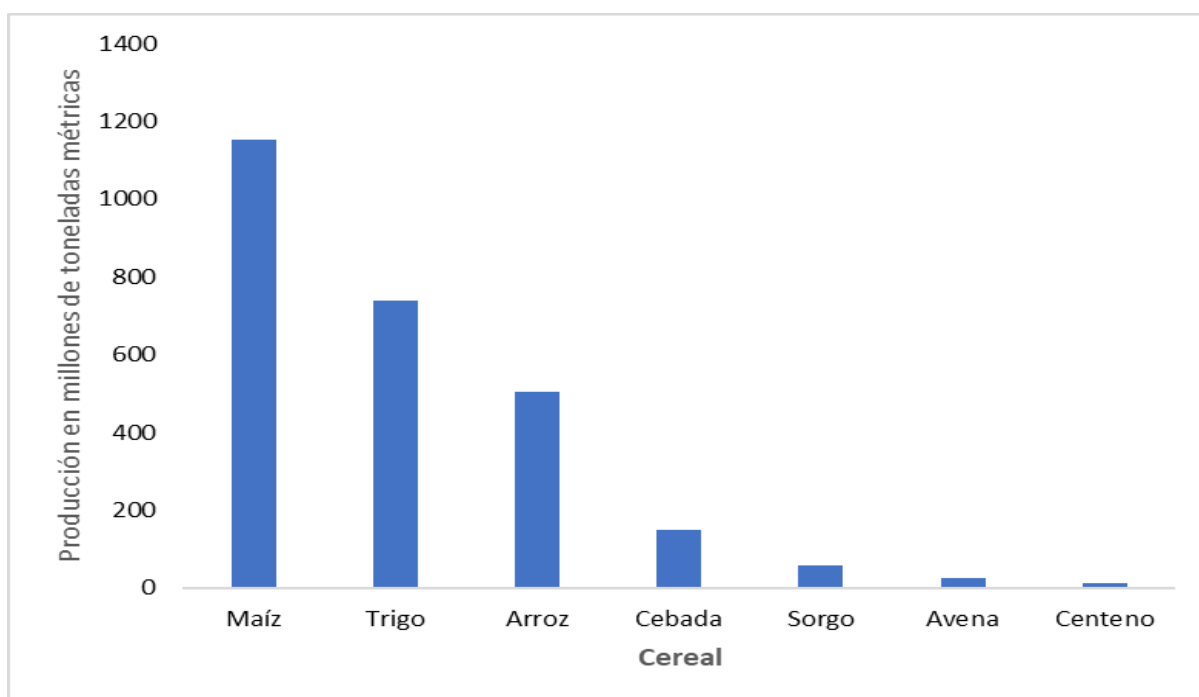


Figura 2. Producción mundial de cereales. Datos expresados en millones de toneladas métricas ⁽³⁵⁾.

II. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El aumento de la prevalencia del hambre, consecuencia de una superpoblación mundial, exige que se empleen estrategias para satisfacer estas demandas. Los alimentos modificados genéticamente son una opción para aumentar la producción de alimentos y, además, aumentar la calidad nutricional de los mismos. El maíz es el principal cereal consumido en el mundo y desde hace varias décadas se ha intentado mejorar sus propiedades mediante la biotecnología, no obstante, sigue existiendo rechazo por los alimentos obtenidos de esta manera como ocurre en la Unión Europea, por diversas causas.

En el presente trabajo se realizará un estudio bibliográfico que permita abordar los siguientes objetivos:

- Realizar una comparación entre el maíz no modificado y su homólogo modificado genéticamente con relación a su cultivo y propiedades nutricionales.
- Discutir los posibles riesgos que pueda implicar el consumo del maíz modificado genéticamente, partiendo de la evidencia científica en materia de seguridad alimentaria.
- Evaluar el impacto ambiental del maíz modificado genéticamente y su sostenibilidad a nivel económico.

III. METODOLOGÍA

Los artículos utilizados para el presente trabajo de revisión bibliográfica fueron obtenidos realizando una búsqueda en la base de datos de PubMed. Las palabras claves y operadores booleanos empleados en la búsqueda fueron los siguientes: (((gmo crops) OR (transgenic maize)) OR (genetically modified maize)) OR (maize biotechnology).

Los artículos fueron filtrados por fecha de publicación desde 2005 hasta 2023 y por tipo de artículo incluyéndose meta-análisis, revisiones sistemáticas, ensayos clínicos aleatorizados y revisiones.

Se obtuvieron 76 resultados, de los cuales se descartaron aquellos artículos que se consideró que no guardaban relación con el tema tras leer el título. La búsqueda fue reducida a 32 artículos.

Posteriormente, se hizo una lectura del resumen de los 35 artículos y fueron excluidos aquellos que no estaban relacionados con el tema de investigación, quedando 20 artículos. De estos últimos, tras ser leídos fueron incluidos 15.

Se buscó información complementaria en Scholar Google empleando las mismas palabras clave y también fueron incluidos informes de organismos nacionales e internacionales para la elaboración de la revisión bibliográfica.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 El maíz como cultivo

El maíz (*Zea mays* L.) pertenece a la familia de las gramíneas (Poaceae), tribu Maydeae. Dentro de esta tribu se encuentran los géneros: *Zea*, *Euchlaena* o teocintle y *Tripsacum*. Tanto *Tripsacum* como *Euchlaena* se consideran parientes silvestres del maíz, aunque algunos autores incluyen al teocintle dentro del género *Zea* ⁽¹⁾.

Existen dos teorías en cuanto al origen geográfico del maíz, una de ellas propone un origen multicéntrico donde el maíz fue domesticado en distintos puntos del mundo, partiendo de diferentes poblaciones de teosinte ⁽¹⁷⁾. La otra teoría sitúa su origen en Mesoamérica, probablemente en la región de Balsas al suroeste de México a partir del teosinte, *Zea mays* L ssp. *parviglumis* ⁽⁴⁾. En ambos casos, la evidencia arqueológica del maíz es imprecisa y se calcula que existe desde hace unos 6.000 a 10.000 años.

Respecto a su origen evolutivo, la hipótesis más aceptada por la comunidad científica indica que el teosinte o teocintle es el ancestro directo del maíz y que evolucionó a partir de este. Otras hipótesis proponen que el maíz es el resultado del cruzamiento entre el teosinte y el género *Tripsacum* o que proviene de una variedad silvestre de maíz tunicado, aunque no cuentan con el mismo apoyo que la primera ⁽¹⁴⁾.

4.1.1 Características morfológicas

El maíz (*Zea mays*) es una gramínea monocotiledónea anual con una altura variable de 1 a 4 metros, que forma un entramado de raíces con un único tallo erecto formado por nudos y entrenudos ⁽⁴⁾. Es una planta monoica de flores unisexuales, donde coexisten flores masculinas y femeninas en la misma planta; la inflorescencia masculina se denomina espiga o panoja y la inflorescencia femenina, mazorca ⁽¹⁷⁾.

La panoja tiene posición terminal en la planta y consta de un eje central y ramas laterales, compuestos por espiguillas protegidas por glumas, que a su vez contienen las flores estaminadas donde se desarrollan los granos de polen. La mazorca se encuentra en las yemas axilares de las hojas, es una espiga de forma cilíndrica en la cual se insertan las espiguillas que contienen las flores pistiladas donde germina el polen (Figura 3). Esta última se encuentra cubierta por unas hojas especializadas denominadas cáscaras, cuya función es proteger a la mazorca durante el desarrollo ^(4,17).

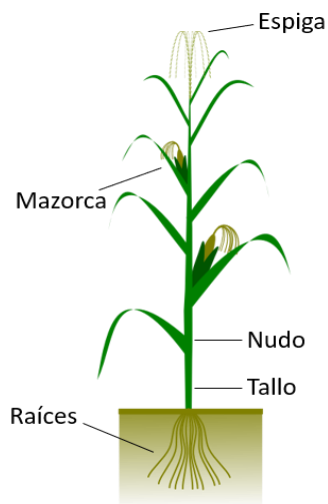


Figura 3. Partes del maíz

La mazorca puede formar alrededor de 400 a 1000 granos organizados en hileras. Cada grano recibe el nombre de cariósipide y son frutos independientes que se insertan en el raquis cilíndrico de la mazorca.

4.1.2 El grano de maíz

El grano de maíz se puede diferenciar en tres partes: pericarpio, endospermo y germen o embrión (Figura 4). El pericarpio es la cubierta más externa del grano y constituye del 5 al 7 % de su peso, a su vez se divide desde fuera hacia dentro en epidermis y mesocarpio. Su grosor es variable según la variedad del maíz y actúa como protección para el embrión y endospermo.

El endospermo constituye más del 80 % del peso del grano y se divide en: capa de aleurona, endospermo periférico y endospermo amiláceo. La capa aleurona es una capa única que recubre todo el endospermo amiláceo y el germen, donde se interrumpe únicamente en la punta del grano. El endospermo periférico es una capa presente algunas variedades de maíz como el maíz dentado y maíz indio, se encuentra debajo de la capa de aleurona y contiene pequeños gránulos de almidón rodeados de una gruesa matriz proteica. El endospermo amiláceo representa la mayor parte del peso seco del grano (alrededor de un 80 %) y como indica su nombre, está constituido principalmente por almidón, donde puede alcanzar un 90 % del peso del grano.

El germen representa del 10 al 12 % del peso seco del maíz y contiene entre un 80 y 85 % de los lípidos del grano, principalmente en forma de triacilglicéridos. Además, actúa como almacén de hormonas y minerales necesarios para el crecimiento del embrión ⁽¹⁵⁾.

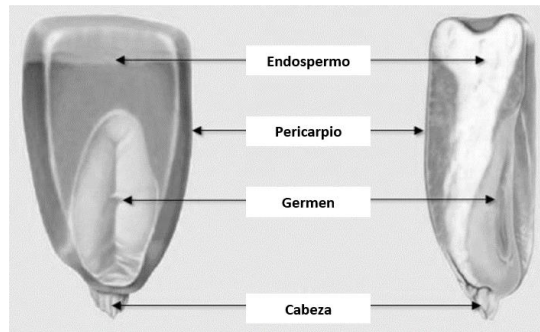


Figura 4. Partes del grano de maíz

4.1.3 Tipos de maíz

Si clasificamos el grano de maíz según la textura o estructura del endospermo podemos distinguir los siguientes tipos ^(1, 32):

- Maíz duro (*Zea mays tunicata*): es de los maíces más primitivos y se caracteriza por estar encerrado en una bráctea o túnica. Tiene poco valor comercial.
- Maíz cristalino (*Zea mays indurata*): presenta granos redondeados y duros al tacto. El almidón del endospermo es vítreo, duro y cristalino. Se emplea tanto en alimentación humana como animal.
- Maíz reventón (*Zea mays everta*): presenta granos pequeños con endospermo cristalino, formado fundamentalmente por almidón córneo. Es el maíz utilizado para hacer las palomitas.
- Maíz amiláceo (*Zea mays amilacea*): se distingue por el gran tamaño del grano. Presenta granos con una gran cantidad de almidón blando.
- Maíz dentado (*Zea mays indentata*): tiene una forma característica de diente. Presenta granos con endospermo que contiene almidón córneo cristalino, en su exterior e interior. Los de color blanco se utilizan en alimentación humana y los de color amarillo en alimentación animal.
- Maíz dulce (*Zea mays saccharata*): presenta un grano dulce y completamente arrugado cuando está maduro. Tiene un alto contenido en azúcar y se cultiva para consumir la mazorca aún verde.
- Maíz ceroso (*Zea mays ceratina* Kul): presenta un aspecto ceroso en el endospermo, el almidón contiene un 100 % de amilopectina lo que le da una textura gomosa.

4.1.4 Composición nutricional

El maíz al igual que el resto de cereales, actúa como fuente de energía para nuestro organismo al estar compuesto fundamentalmente por hidratos de carbono ⁽³⁰⁾. También suministra en menor medida otros nutrientes como proteínas, grasas, vitaminas y minerales (Tabla 1).

Tabla 1. Composición por cada 100 g de maíz comestible. Adaptado de Rouf ⁽²⁹⁾.

Composición por cada 100 g de maíz comestible	
Hidratos de carbono	71,88 g
Proteínas	8,84 g
Grasas	4,57 g
Fibra	2,15 g
Cenizas	2,33 g
Humedad	10,23 g
Fósforo	348 mg
Sodio	15,9 mg
Azufre	114 mg
Riboflavina	0,10 mg
Calcio	10 mg
Hierro	2,3 mg
Potasio	286 mg
Tiamina	0,42 mg
Vitamina C	0,12 mg
Magnesio	139 mg
Cobre	0,14 mg

4.2 El maíz transgénico

Durante las últimas décadas, los avances en biotecnología vegetal han permitido el desarrollo de diversas variedades de maíz modificado genéticamente, lo que ha supuesto un impacto positivo en la agricultura al mejorar el rendimiento del grano ⁽⁴⁰⁾.

Las variedades de este cereal más importantes a nivel comercial, se caracterizan por la tolerancia a herbicidas, resistencia a insectos o ambas características. En menor parte también se comercializan variedades con tolerancia al estrés abiótico, aumento del rendimiento y mejora de la calidad nutricional. Las empresas productoras y comercializadoras más importantes a nivel mundial actualmente son Bayer-Monsanto, Pioneer y Syngenta.

4.2.1 Maíz resistente a insectos

El maíz Bt es un maíz que ha sido modificado genéticamente para defenderse del ataque de insectos lepidópteros como el taladro del maíz (*Ostrinia nubilalis*), el barrenador del maíz del Suroeste (*Diatraea grandiosella*) y el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*). Tal característica se ha conseguido por la introducción de un gen procedente de la bacteria *Bacillus thuringiensis* encargado de expresar proteínas *Cry*.

Las proteínas *Cry* tienen un mecanismo de acción muy específico, resultando tóxicas esencialmente contra las plagas del maíz. Para que la proteína realice su acción, tras ser ingerida deben reunirse los siguientes procesos: la digestión alcalina para la solubilización de la proteína, la acción de determinadas enzimas para liberar la parte activa de la proteína y la existencia de receptores específicos para que se produzca el efecto tóxico. Estos procesos se cumplen únicamente en determinados tipos de insectos, por lo que el consumo del maíz Bt no es nocivo para el ser humano y los animales. Además, las proteínas pertenecientes a este grupo son biodegradables por lo que no producen ningún tipo de contaminación ⁽³⁴⁾.

A este tipo de maíz se le asocian otros beneficios además de la protección del propio cultivo, entre ellos la disminución del uso de pesticidas y, por lo tanto, menor contaminación ambiental; disminuye los niveles de micotoxinas como fumonisinas en los granos, procedentes de hongos que crecen en los túneles cavados por los insectos barrenadores; y reducción del uso de maquinaria agrícola para la aplicación de insecticidas, lo que disminuye los costes de producción del cultivo.

4.2.2 Maíz tolerante a herbicidas

El control de las malezas es importante en la producción del maíz, al competir con el cultivo por los nutrientes puede haber una disminución del rendimiento y la calidad del grano. Para mantener las malezas bajo control se han empleado herbicidas a lo largo de los años, no obstante, el cultivo se puede ver afectado si no tolera adecuadamente el herbicida.

Como solución a este inconveniente, desde hace unas décadas se han desarrollado cultivos con una mayor tolerancia a los herbicidas. Las variedades de maíz tolerantes a herbicidas se centran en el glifosato y el glufosinato de amonio.

El maíz tolerante a glifosato contiene un gen de bacterias del género *Agrobacterium*, que produce la enzima 5-enolpiruvil-shikimato-3-fosfato sintasa (EPSPS) y aumenta la tolerancia a este herbicida. En el maíz convencional, el glifosato inhibe esta enzima responsable de la síntesis de fenilalanina, tirosina y triptófano, limitando el desarrollo de la planta. Las variedades resistentes al glufosinato tienen incorporadas un gen de las bacterias del género *Streptomyces*, encargado de expresar la enzima fosfinotricina N-acetil transferasa (*PAT*) que por acetilación convierte al glufosinato en una sustancia no tóxica ⁽³⁴⁾.

El desarrollo de estas variedades confiere seguridad a la planta del maíz, permite controlar un amplio espectro de malezas, disminuye el impacto ambiental y aumenta el rendimiento del cultivo.

4.2.3 Transformación del maíz

Los factores bióticos y abióticos del suelo representan el primer desafío al momento de incrementar la producción, productividad y calidad del maíz. Para superar estas dificultades, la ingeniería genética ha identificado los genes de interés de la planta para incluirlos en el propio cultivo y obtener variedades con características mejoradas ⁽⁴⁰⁾.

La transformación de cultivos es un proceso en el cual se introducen transgenes en el genoma de la planta. Se pueden emplear distintos métodos en la transformación del maíz como técnicas biolísticas o la transformación genética mediada por *Agrobacterium tumefaciens*, siendo esta última la más habitual. Estos procesos tienen como base los siguientes elementos: la introducción de ADN exógeno y el uso de un gen marcador de selección. La transformación tiene lugar cuando el ADN exógeno es incorporado de forma estable en el genoma de las células y el fenotipo de estas adquiere la característica a dotar; para que ocurra esto, el gen marcador debe expresarse correctamente permitiendo que las células formen callos recombinantes que se regeneren y así obtener la planta transgénica ⁽³³⁾.

El primer paso crítico en la transformación del maíz es la selección de un maíz con un genotipo apto para el cultivo y transformación de tejidos y, por lo tanto, compatible con el gen a introducir. Generalmente, se utiliza el genotipo Hi-II (High type II callus production) para la transformación del maíz debido a su capacidad para formar callos friables y embriogénicos ante la inducción del mismo ⁽³⁹⁾. Una vez seleccionado el maíz según su genotipo se deberá obtener el explante, es decir, el tejido que se aislará de la planta para ser transferido a un medio artificial de crecimiento. Para la obtención del

maíz transgénico se han aislado los explantes a partir de hojas, plántulas, embriones inmaduros, células en suspensión y callos; actualmente, se utilizan de forma general los embriones cigóticos inmaduros ya que pueden inducir callos y llevar a cabo la embriogénesis somática ⁽⁴⁰⁾.

Como medio de cultivo en la transformación del maíz se suele usar N6 o Murashige y Skoog, preparados que contienen los nutrientes y condiciones necesarias para el desarrollo del cultivo transgénico. En el proceso de formación del callo y regeneración del tejido de la planta serán estrictamente controladas las condiciones de crecimiento como la temperatura y luz, además del medio que requiera la planta según su etapa de desarrollo. Una vez regenerada la planta, será transferida a un invernadero para su crecimiento y obtención de las semillas transgénicas ⁽⁴⁰⁾. En la Figura 5 se resume el proceso de transformación del maíz.

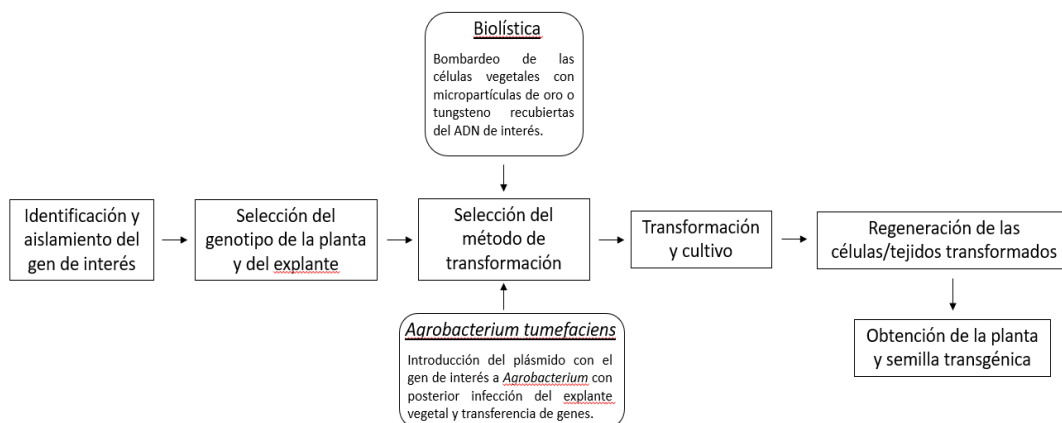


Figura 5. Transformación genética de las plantas.

4.3 El maíz transgénico en el ámbito nutricional

Los cultivos transgénicos fueron introducidos inicialmente en el mercado como una solución al daño provocado por herbicidas, plagas o enfermedades. En el presente, las investigaciones también se dirigen a la obtención de cultivos con una mejora del perfil nutricional y como resultado, mayores beneficios para la salud.

Tradicionalmente, se ha mejorado el valor nutricional de los cereales mediante prácticas de fortificación como el fitomejoramiento convencional o la adición de compuestos de interés en el propio fertilizante, para aumentar el contenido de vitaminas y minerales. El método más sencillo es el uso de fertilizantes enriquecidos en micronutrientes, no obstante, se pueden presentar diferencias en la movilidad y acumulación de estos compuestos entre las distintas especies de plantas, así como influye la ubicación geográfica del suelo.

Aunque la generación de la planta transgénica requiera de cierta dedicación inicialmente, la biotecnología nos permite obtener cultivos biofortificados de forma más rentable y sostenible. La introducción del gen de interés en el genoma de la planta actuará a nivel de las vías metabólicas, produciendo metabolitos primarios y secundarios, para posteriormente dar compuestos de interés tales como aminoácidos, ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga, vitaminas y minerales ⁽⁴⁰⁾.

4.3.1 Aminoácidos

Los aminoácidos esenciales son aquellos que deben ser aportados en la dieta debido a que no pueden ser sintetizados por el organismo, entre ellos se encuentran la histidina (salvo en adultos), isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina. El maíz como el resto de cereales, se caracteriza por tener un perfil de aminoácidos incompleto, al no aportar aminoácidos esenciales como lisina y triptófano.

Las proteínas del grano de maíz están constituidas aproximadamente por un 50% de prolaminas llamadas zeínas, localizadas principalmente en el endospermo; un 25% de glutelinas, presentes tanto en el endospermo como en el germen; y el resto lo constituyen albúminas y globulinas, concentradas en el germen ⁽³¹⁾. Las mutaciones en este cereal han dado variedades con un contenido mayor en lisina como el maíz opaco-2 (o2) y maíz harinoso-2 (fl2), y se cree que se debe a su mayor contenido de glutelinas, albúminas y globulinas a expensas de un menor contenido de zeínas. A través de tecnología de ADN recombinante se ha conseguido en un estudio experimental, un maíz transgénico reducido en α -zeína (fracción mayoritaria de la proteína) resultando en un aumento del contenido en lisina. No hubo grandes diferencias en la composición del grano transgénico respecto al convencional, aunque sí fueron estadísticamente significativas, habiendo un menor contenido de almidón y mayor de humedad; el contenido proteico se mantuvo constante (Tabla 2).

Tabla 2. Composición del maíz convencional y variedades transgénicas con contenido disminuido de α -zeína. Expresado en % y desviación estándar. Adaptado de Huang ⁽¹⁶⁾.

	Maíz convencional	pMON73566		pMON73567	
		M80780	M80791	M80442	M82186
Lípidos	3,8 ± 0,3	4,1 ± 0,2	4,4 ± 0,1	4,4 ± 0,1	5,2 ± 0,5
Proteínas	9,6 ± 1,1	8,7 ± 1,0	9,9 ± 1,2	9,3 ± 1,0	10,0 ± 0,7
Almidón	70,4 ± 0,9	68,7 ± 0,4	67,3 ± 0,3	68,5 ± 0,6	67,8 ± 1,0
Humedad	9,0 ± 0,4	10,5 ± 0,2	10,4 ± 0,3	10,5 ± 0,2	10,5 ± 0,7

En cuanto al perfil de aminoácidos, el contenido de lisina y triptófano fue superior en todas las variedades transgénicas ⁽¹⁶⁾, siendo casi el doble en una de las variedades (Tabla 3).

Tabla 3. Perfil de aminoácidos de maíz convencional y variedades transgénicas con contenido disminuido de α -zeína. Los valores se encuentran expresados en partes por millón. Adaptado de Huang ⁽¹⁶⁾

Aminoácidos	Maíz convencional	pMON73566		pMON73567	
		M80780	M80791	M80442	M82186
ALA	6687 ± 594	5497 ± 631	6417 ± 855	5862 ± 999	6458 ± 322
ARG	4342 ± 293	6060 ± 708	7313 ± 1048	6665 ± 1203	7165 ± 655
ASN + ASP	5555 ± 377	8928 ± 1651	11977 ± 2034	10253 ± 2803	11143 ± 886
GLU + GLN	17788 ± 1623	15873 ± 2421	18610 ± 2762	16860 ± 3617	18603 ± 1322
GLY	3400 ± 166	4537 ± 463	5377 ± 770	4973 ± 783	5290 ± 410
HIS	1498 ± 126	2350 ± 234	2253 ± 441	2305 ± 518	2470 ± 160
ILE	3265 ± 255	3030 ± 368	3700 ± 678	3373 ± 587	3578 ± 261
LEU	11265 ± 1074	7318 ± 788	8327 ± 1106	7718 ± 1264	8270 ± 497
LYS	2438 ± 132	4035 ± 574	5003 ± 866	4533 ± 780	4800 ± 443
PHE	3760 ± 282	3032 ± 295	3637 ± 506	3288 ± 571	3455 ± 260
SER	4067 ± 364	4235 ± 465	4620 ± 425	4355 ± 779	4785 ± 325
THR	3062 ± 226	3572 ± 406	4047 ± 446	3783 ± 676	4130 ± 279
TRP	598 ± 48	877 ± 117	1087 ± 158	940 ± 201	1040 ± 96
TYR	3720 ± 307	3430 ± 414	4093 ± 432	3652 ± 624	4045 ± 270
VAL	4710 ± 325	5312 ± 598	6553 ± 1068	5977 ± 1030	6293 ± 483
Total	76155 ± 5996	78087 ± 10057	93013 ± 12760	84535 ± 16220	91533 ± 6286

Entre otros experimentos realizados para aumentar el contenido de lisina en maíz, se ha aislado de una patata silvestre (*Solanum berthaultii*), el gen sb401 responsable de codificar una proteína del polen de 240 aminoácidos con 40 unidades de lisina y se ha integrado en el genoma del maíz, aumentando su contenido en lisina y proteína total ⁽³⁷⁾. Al comparar maíz transgénico (línea pura 642 e híbrida Y642) modificado con este gen frente a maíz de alta calidad proteica (maíz Nongda 108), se obtuvo que el contenido en lisina en las variedades transgénicas era superior y consecuentemente, se mejoró el perfil de aminoácidos y el valor nutricional del maíz. También fueron comparados los resultados de las variedades transgénicas frente a valores de referencia del maíz opaco-2, siendo de la misma manera superiores a este último (Tabla 4).

Tabla 4. Perfil aminoacídico de maíz convencional y variedades transgénicas con contenido reducido de α -zeína. Los valores se encuentran expresados en partes por millón. Adaptado de Tang ⁽³⁷⁾.

Aminoácidos	642	Y642	Nongda 108	Maíz o2
ALA	8,68 ± 0,17	7,53 ± 0,02	6,10 ± 0,10	8,45
ARG	6,53 ± 0,32	4,70 ± 0,02	4,34 ± 0,02	5,1
ASP	0,99 ± 0,05	0,724 ± 0,01	0,708 ± 0,01	2,35
GLU	31,37 ± 0,60	26,34 ± 0,02	21,83 ± 0,40	19,1
GLY	7,80 ± 0,18	6,50 ± 0,11	5,46 ± 0,17	4,96
HIS	3,28 ± 0,10	2,98 ± 0,03	2,66 ± 0,04	3,35
ILE	4,95 ± 0,17	4,34 ± 0,06	3,46 ± 0,05	3,91
LEU	8,56 ± 0,13	8,83 ± 0,32	7,25 ± 0,26	11,6
LYS	4,20 ± 0,04	3,40 ± 0,01	2,50 ± 0,02	3,39
MET	1,51 ± 0,03	1,65 ± 0,02	1,47 ± 0,04	2
PHE	11,0 ± 0,19	9,67 ± 0,06	8,05 ± 0,14	9,36
PRO	6,26 ± 0,18	5,45 ± 0,12	4,64 ± 0,05	4,99
SER	4,39 ± 0,01	4,33 ± 0,02	3,79 ± 0,05	3,9
THR	10,1 ± 0,17	8,56 ± 0,03	7,07 ± 0,13	6,99
TYR	6,08 ± 0,06	4,74 ± 0,11	4,34 ± 0,03	4,7
VAL	6,01 ± 0,03	5,22 ± 0,05	4,42 ± 0,08	4,89
Total	121,67	104,93	88,09	99,04

4.3.2 Ácidos grasos poliinsaturados

La biotecnología permite la producción de cereales enriquecidos en determinados componentes nutricionales como los que se describen en este trabajo. No obstante, para la obtención de cereales ricos en ácidos grasos poliinsaturados (AGPI), especialmente en aquellos de cadena larga, se han encontrado ciertas limitaciones y se requiere de más investigación. Estas biomoléculas de naturaleza lipídica son importantes porque forman parte de las membranas estructurales del ser humano, están relacionadas a la salud cardiovascular y tienen actividad antiinflamatoria.

El ácido graso predominante en los cereales es el ácido linoleico (LA) de la serie ω -6, representando alrededor de un 50% del total de ácidos grasos. El ácido linoleico junto al ácido α -linolénico (ALA) de la serie ω -3, actúan como precursores de los AGPI de cadena larga (AGPI-CL) como el ácido eicosapentaenoico, ácido docosahexaenoico, ácido γ -linolénico y ácido araquidónico. Para la síntesis de los AGPI-CL es necesaria la actuación de una serie de enzimas, en el caso de los cereales, no se encuentra presente la enzima Δ 6-desaturasa, clave en la ruta metabólica de estos ácidos grasos (Figura 6).

Siguiendo los fundamentos de la ingeniería genética, la solución radicaría en incorporar el gen que codifica la enzima Δ 6-desaturasa en el cereal de interés, obteniéndolo de organismos donantes como algas, hongos o bacterias. La mayoría de experimentos enfocados a la síntesis de AGPI-CL en cereales hasta la fecha, se han llevado a cabo en el arroz. Respecto al maíz, se ha conseguido aumentar el contenido de ácido eicosapentaenoico y otros AGPI únicamente en la hoja de la planta y no en el grano ⁽¹⁹⁾.

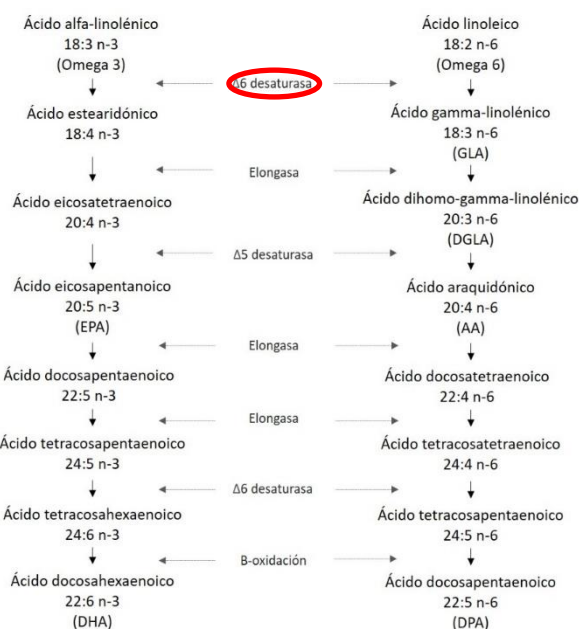


Figura 6. Biosíntesis de los ácidos grasos poliinsaturados. Imagen elaborada en ChemDraw Pro.

4.3.3 Vitaminas

Las vitaminas son micronutrientes esenciales para el crecimiento, el metabolismo y la reproducción que deben aportarse a través de la dieta ya que su déficit puede dar lugar a enfermedades carenciales. Estas se clasifican según su solubilidad en vitaminas hidrosolubles (B y C) y liposolubles (A, D, E y K). Los cereales nos aportan principalmente vitaminas del grupo B, con un contenido variable dependiendo de la forma de consumo (enteros o procesados).

Para la obtención de productos derivados de cereales como la harina, el pan, pasta, galletas o cereales de desayuno, los granos son sometidos a procesos como la molienda o métodos de tratamiento térmico en los cuales se produce una pérdida significativa del contenido en vitaminas, ya sea por la sensibilidad de estas al calor o por separación de las partes del grano. Para compensar estas pérdidas, la ingeniería genética permite que partamos de un contenido superior de vitaminas en el grano previamente al procesado y así aportar cantidades más adecuadas durante el consumo ⁽¹³⁾.

La ingeniería genética frente a las técnicas de mejoramiento vegetal convencional, nos permite tener un cultivo mejorado en menor tiempo, a la vez que se manipulan diversas características nutricionales del grano. En el estudio realizado por Naqvi *et al.* ⁽²⁵⁾ se consiguió trabajar simultáneamente en distintas vías metabólicas para producir un maíz transgénico con un valor nutricional superior a su homólogo convencional, aumentando los niveles de β -caroteno, ácido ascórbico y folato en el endospermo.

La vitamina A es una vitamina liposoluble presente en los alimentos de forma natural y de especial importancia para la visión, el sistema inmunitario, reproducción, así como el crecimiento y desarrollo. En alimentos de origen vegetal podemos encontrar precursores de la vitamina A llamados carotenoides provitamina A. Entre estos carotenoides se encuentran el α -caroteno, β -caroteno y β -criptoxantina; existen otros carotenoides no precursores como el licopeno, luteína y zeaxantina, pero cuyo consumo está relacionado con beneficios para la salud ⁽¹³⁾. El contenido de estos pigmentos aporta color al grano de maíz y varía según la especie, destacando el maíz blanco con un aporte deficiente de carotenoides y, por el contrario, el maíz amarillo con un contenido elevado.

Para incrementar el contenido de carotenoides en el maíz blanco se ha intentado expresar el gen *psy1* del maíz (no se suele expresar en esta variedad) y el gen *crtI* de *Pantoea ananatis*, que codifican las enzimas fitoeno sintasa y fitoeno desaturasa respectivamente, ambas participantes en la síntesis del β -caroteno (Figura 7).

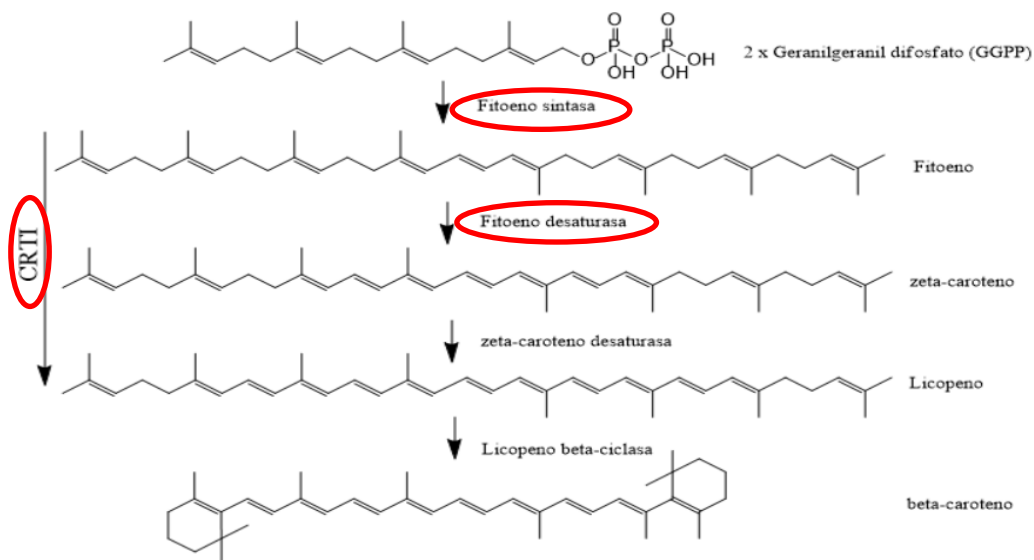


Figura 7. Biosíntesis de beta-caroteno. Imagen elaborada en ChemDraw Pro.

Como resultado, en la variedad transgénica se obtuvo un contenido 100 veces superior de carotenoides respecto al homólogo convencional ⁽²⁵⁾.

Los valores de ascorbato en la variedad transgénica fueron 6 veces superior a su homólogo convencional (Tabla 5).

Tabla 5. Contenido de vitaminas en maíz convencional y transgénico. Los valores se encuentran expresados por cada 100 gramos de maíz. Los porcentajes de ingestas recomendadas se ha calculado utilizando la tabla de composición de alimentos de Moreiras *et al.* ⁽²²⁾ Adaptado de Naqvi ⁽²⁵⁾.

	Maíz blanco de Sudáfrica (M37W)	M37W transgénico
Licopeno (µg)	0	2278 ± 256
γ-caroteno (µg)	9,0 ± 2,0	479 ± 108
α-caroteno (µg)	12,0 ± 5,0	726 ± 87
β-caroteno (µg)	35 ± 6 (0,48 % - 0,68 %) IR	5932 ± 365 (92,7 % - 105 %) IR
α-criptoxantina (µg)	-	1342 ± 200
β-criptoxantina (µg)	-	528 ± 84
Luteína (µg)	57 ± 18	1468 ± 216
Zeaxantina (µg)	32 ± 5	3576 ± 435
Total carotenoides (µg)	145 ± 21	16329 ± 861
Ácido ascórbico (mg)	1,75 ± 0,29 (2,4 % - 3,4 %) IR	10,7 ± 0,75 (16,6 % - 19,1 %) IR
Folato (µg)	93 ± 32 (15,2 % - 31,2 %) IR	194 ± 17 (44,2 % - 52,8 %) IR

El ácido ascórbico es una vitamina hidrosoluble implicada en la formación de colágeno, componente de vasos sanguíneos, tendones, ligamentos, huesos y piel. Tiene función antioxidante y participa en la absorción del hierro de origen vegetal. Su déficit puede dar lugar a una enfermedad llamada escorbuto en la que se encuentran los siguientes síntomas: cansancio, gingivitis, anemia y hemorragias. Para aumentar el contenido de esta vitamina en el maíz blanco, Naqvi *et al.* ⁽²⁵⁾ han introducido un gen procedente de cebada que expresa la enzima dehidroascorbato reductasa (dhar). En la síntesis del ácido ascórbico convergen por lo menos tres rutas metabólicas, la acumulación de metabolitos puede provocar la oxidación de la vitamina, dando ácido dehidroascórbico.

La sobreexpresión de la dhar facilita la regeneración de la vitamina a su forma activa (Figura 8).

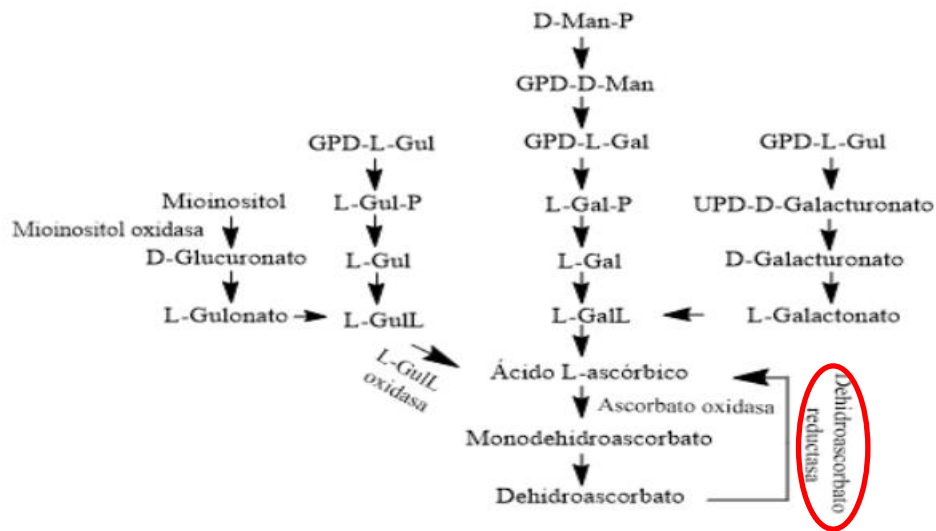


Figura 8. Biosíntesis del ácido L-ascórbico. Imagen elaborada en ChemDraw Pro.

El folato o vitamina B9 participa en la síntesis de ADN, formación de glóbulos rojos y cobra importancia su ingesta durante el embarazo para el desarrollo del tubo neural y la prevención de enfermedades congénitas. Existen múltiples vías por las cuales se podría aumentar el contenido de esta vitamina en cereales mediante ingeniería genética, ya que su síntesis se produce desde tres compartimentos celulares diferentes: citosol, plastos y mitocondrias (Figura 9).

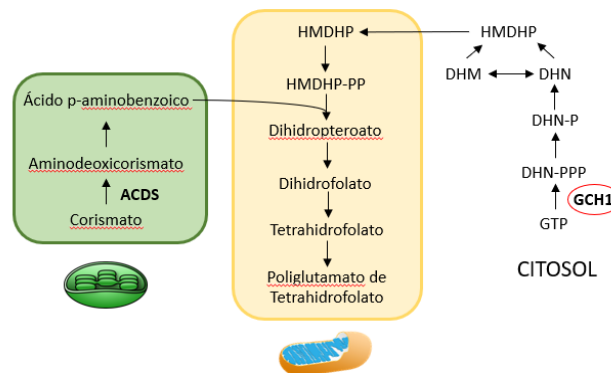


Figura 9. Biosíntesis del folato.

Su estructura consiste en un anillo de pteridina unido a un residuo de ácido p-aminobenzoico (PABA), que a su vez se une a un residuo de ácido glutámico; cada uno de estos componentes parten de una vía metabólica distinta en los compartimentos mencionados, para luego unirse y formar el folato.

En el mismo experimento donde se aumentó la concentración de ácido ascórbico y β -caroteno en el maíz ⁽²⁵⁾, se consiguió duplicar el contenido en folato (Tabla 5) tras expresar el gen *folE* de *Escherichia coli*. Este gen aumenta la actividad enzimática de la GTP ciclohidrolasa 1 (GCH1), enzima presente en el citosol y que actúa en la vía metabólica correspondiente a las pteridinas.

4.3.4 Minerales

La obtención de cereales enriquecidos en minerales de forma transgénica requiere de un abordaje distinto al de los componentes nutricionales descritos anteriormente. Estos micronutrientes son captados del suelo en lugar de ser sintetizados por la planta y para aumentar su contenido en cereales se pueden seguir dos estrategias: mejorar la eficiencia de absorción y transporte a los tejidos del cultivo o aumentar la cantidad de mineral biodisponible acumulado en la planta. Los estudios actuales se centran principalmente en aumentar el contenido de hierro y zinc.

El hierro se encuentra en el suelo principalmente en su forma oxidada (Fe^{3+}) y para ser absorbido por las gramíneas debe encontrarse en su forma reducida (Fe^{2+}). Este tipo de plantas no posee reductasas que permitan la absorción del hierro, para transportar este mineral a su interior segregan unos compuestos quelantes denominados fitosideróforos que atrapan el Fe^{3+} , formando complejos que pueden ser absorbidos por la planta. Considerando lo anterior, es posible aumentar el contenido de hierro en cereales incorporando genes que aumenten la producción de fitosideróforos; esto se ha conseguido en el arroz al incorporar los genes *naat-A* y *naat-B* procedentes de cebada que expresan nicotianaminas aminotransferasas, implicadas en la síntesis de fitosideróforos. Al aumentar la producción de estas enzimas y el contenido de hierro como resultado, también se ha observado un incremento en la acumulación del zinc ⁽⁴¹⁾.

Para aumentar el contenido de minerales en cereales mediante la ingeniería genética, también se puede recurrir a genes que sobreexpresen proteínas con función de almacenamiento como la ferritina que almacena hierro. Aunque el contenido de minerales sea un aspecto importante en la calidad nutricional del cereal, lo realmente relevante es la biodisponibilidad del mismo. En cereales nos encontramos antinutrientes como el ácido fítico que quelan minerales e impiden su absorción. En el maíz se ha logrado incorporar simultáneamente genes que expresan la ferritina y la fitasa (hidroliza el ácido fítico), obteniéndose un grano de maíz con mayor contenido de hierro y a su vez, más biodisponible ⁽⁴¹⁾.

4.4 Seguridad alimentaria del maíz transgénico

Para que los cultivos modificados genéticamente y los productos derivados de estos sean considerados seguros, deben ser sometidos a un proceso de evaluación del riesgo para poder ser comercializados ⁽⁶⁾.

Las variedades más comercializadas de maíz transgénico se caracterizan por la resistencia a insectos y tolerancia a herbicidas o ambas. Dentro de estas variedades, la proteína expresada *Cry* actúa en contra del ataque de insectos, mientras que las proteínas *PAT* y *CP4 EPSPS* confieren tolerancia a los herbicidas a base de glufosinato y glifosato respectivamente. Se ha planteado que el consumo de estas proteínas pueda suponer un peligro para la salud humana, por lo que han sido evaluadas en distintos estudios. En alimentos transgénicos se evalúa principalmente la alergenicidad y toxicidad de la proteína expresada por el gen incorporado.

4.4.1 Alergenicidad

La evaluación de la capacidad alergénica de una proteína tiene como base la similitud de la secuencia de aminoácidos de alérgenos conocidos, la termolabilidad y su digestibilidad en pepsina. Estos aspectos se han evaluado en distintas proteínas presentes en variedades maíz transgénico como las proteínas *Cry*, *PAT* y *CP4 EPSPS* ^(5, 9).

Al comparar la secuencia de aminoácidos de las proteínas *Cry1F*, *PAT* y *CP4 EPSPS* con la secuencia de proteínas alérgicas de la base de datos, no se observaron similitudes a nivel cuantitativo (menos de 35% de aminoácidos en común) ni coincidencias en la secuencia (menos de 8 aminoácidos).

Se considera que las proteínas que se desnaturalizan fácilmente al ser sometidas a un aumento de temperatura tienen menor tendencia a producir alergias. Para evaluar la termolabilidad de las proteínas *Cry1F* y *PAT*, se tomaron alícuotas de estas y fueron calentadas a temperaturas relativamente bajas (75 °C durante 30 minutos y 55 °C durante 10 minutos respectivamente) para desnaturalizarlas, observándose una disminución de la actividad enzimática al ser aplicada en insectos.

Los alérgenos tienden a ser resistentes a la actuación de la pepsina, debido a esto se utiliza su actividad enzimática como referencia para identificar proteínas alérgicas. Al introducir alícuotas de *Cry1F* y *PAT* en un medio que simulaba el fluido gástrico incluyendo pepsina en él, se obtuvo que la proteína *Cry1F* fue degradada en menos de

un minuto, mientras que la *PAT* fue digerida a concentraciones no detectables en tan solo 5 segundos.

El hecho de que estas proteínas sean termolábiles, fácilmente digeribles por la pepsina y no tengan una secuencia de aminoácidos comparable a la de alérgenos conocidos, nos sugiere que no poseen capacidad alérgica o que al menos, es muy baja.

4.4.2 Toxicidad

Tras realizarse ensayos de dos semanas para determinar la toxicidad oral aguda de las proteínas *Cry1F* y *PAT* en ratones, se han obtenido resultados similares. La proteína *Cry1F* no produjo mortalidad ni signos clínicos o conductuales en los ratones de estudio a dosis elevadas. No se observaron efectos adversos ante dosis que alcanzaban los 500 mg/Kg de peso corporal, extrapolado a seres humanos equivaldría a una dosis pura de proteína *Cry1F* de por lo menos 30 gramos y para obtener esa cantidad del maíz sería necesario consumir mínimo 9 Kg del cereal ⁽⁵⁾. Siendo poco probable el consumo de tal cantidad de maíz, los estudios sugieren que el consumo de maíz *Bt* no resulta tóxico para animales o humanos. En el caso de la proteína *PAT*, también se realizó un ensayo de dos semanas en el cual sobrevivieron todos los ratones y se observó ganancia de peso en todos ellos. En este ensayo también fue determinada la dosis letal media, resultando superior a 6000 mg/kg de peso corporal. Otras investigaciones sugieren que las proteínas que son tóxicas lo suelen ser a bajas dosis, lo que sugiere que las proteínas *Cry1F* y *PAT* no suponen un riesgo para la salud ^(5, 6).

Habitualmente, agencias reguladoras como la EFSA solicitan estudios subcrónicos (90 días) en roedores donde se les administre granos del cereal transgénico o derivados de este, con el fin de detectar los posibles efectos toxicológicos en comparación a una dieta control. En un estudio realizado en ratas, se le administró granos de maíz *TC1507* (variedad resistente a insectos y tolerante a herbicidas) durante 90 días a uno de los grupos de estudio y al grupo control le fue administrado maíz no modificado con similar composición de aminoácidos, minerales, antinutrientes y metabolitos secundarios. No hubo diferencias significativas de peso corporal entre ambos grupos ni diferencias en la ingesta. Tampoco se produjeron muertes ni hubo signos clínicos de toxicidad en ninguno de los grupos. Estos resultados indican que el consumo de maíz transgénico no supone un riesgo para la salud humana y animal ⁽⁶⁾.

4.5 Sostenibilidad ambiental del maíz transgénico

La Comisión Mundial sobre Medioambiente y Desarrollo de la ONU define la sostenibilidad ambiental como: “la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Para que se cumpla esta premisa debe haber armonía entre el desarrollo económico y social y preservación de la naturaleza, utilizando de manera adecuada los recursos naturales para que las próximas generaciones puedan utilizarlo.

Existe la preocupación de que la producción de cultivos transgénicos no sea compatible con la sostenibilidad ambiental porque pueda implicar el flujo genético entre parientes silvestres compatibles, propagación de malezas o que produzcan daño a organismos no objetivos como insectos que no sean perjudiciales para las plantas ⁽⁵⁾. Por el contrario, se han descrito beneficios tanto para el agricultor (mayor rendimiento del grano) como para el medio ambiente ⁽²⁾.

4.5.1 Flujo genético

El maíz presenta una alta tasa de cruzamiento y puede polinizar a otras variedades o híbridos con los que sea sexualmente compatibles, como consecuencia se puede producir un cruzamiento involuntario entre cultivos transgénicos y no modificados. Algunos autores indican que el flujo genético se encuentra limitado por barreras ambientales como la viabilidad, dispersión y proximidad del polen; y por barreras genéticas como la capacidad de reproducción ⁽²⁾. En contraposición, otros autores indican que es más probable que se produzca el cruzamiento entre variedades, ya que el ser humano no puede controlar determinados parámetros como la lluvia o dirección y velocidad del viento ⁽²⁷⁾. Las modificaciones realizadas en las principales variedades de maíz transgénico no buscan alterar la composición del maíz y en caso de que las características agronómicas del maíz y su homólogo transgénico tengan características comparables, no se puede decir que tengan un ciclo reproductivo distinto que facilite su proliferación en el campo.

4.5.2 Impacto en organismos no objetivos

Se ha demostrado la eficacia del maíz *Bt* en contra de insectos lepidópteros como el taladro del maíz o coleópteros como *Diabrotica virgifera*, ambos insectos objetivos. Esto ha planteado el que esta variedad de maíz pueda ser nociva también para insectos que no se consideran plagas de este cultivo.

Pellegrino *et al.* realizaron un meta-análisis en el que se evaluaba el daño a familias de insectos no objetivos como *Anthorocoridae*, *Araneae* y *Coccinellidae*, entre otras. En la mayoría de los casos no hubo afectación de los insectos, por lo que no debería representar un peligro para la sostenibilidad ambiental ⁽²⁷⁾.

4.5.3 Beneficios ambientales y económicos

El cultivo de maíz modificado genéticamente puede contribuir positivamente en términos de sostenibilidad. Los agricultores han mostrado bastante aceptación al usar variedades como el maíz *Bt* al suponer un mayor rendimiento del grano y calidad del mismo debido al control del barrenador del maíz.

Además, el uso de estos cultivos conlleva un menor uso de pesticidas que se traduce en menos emisiones para el medioambiente y por lo tanto, menor impacto ambiental. El uso de maíz *Bt* ha supuesto una reducción del 37 % de insecticidas en contra del barrenador del maíz entre los años 1996 y 2010 ⁽²⁷⁾.

Con el cultivo de esta variedad también se ha observado una mejora de la huella hídrica, indicador que en este caso sirve para estimar el volumen de agua dulce necesario para la producción del maíz. Al tener un mayor rendimiento que el maíz convencional, se ha evitado el gasto de 93 millones de metros cúbicos de agua entre los años 1998 y 2021 ⁽²⁷⁾.

V. CONCLUSIONES

La aplicación de la biotecnología en la agricultura ha hecho posible la obtención de variedades de maíz con características mejoradas, como la resistencia a insectos, tolerancia a herbicidas o mejora de la calidad nutricional. Tras haber explicado brevemente como se obtienen estas variedades y sus aplicaciones en el ámbito de la nutrición, seguridad alimentaria y medio ambiente, podemos concluir lo siguiente:

- El rechazo a este tipo de alimentos puede deberse al desconocimiento de los métodos de obtención. Esto haría de especial interés la difusión de información del origen de estos alimentos de forma objetiva y sencilla, para fomentar el pensamiento crítico hacia los mismos y que sean considerados como una fuente viable de alimentación.

- La manipulación de diversas vías metabólicas nos permite obtener un maíz enriquecido en distintos componentes como se observó en el caso del maíz enriquecido en ácido ascórbico, beta-caroteno y folato. Por el contrario, las limitaciones halladas en la síntesis de ácidos grasos poliinsaturados por manipulación genética, invita a que se sigan realizando investigaciones.

- De acuerdo a las propiedades físico-químicas de las principales proteínas expresadas en el maíz transgénico (*Cry* y *PAT*), la capacidad alergénica de estas proteínas no debería suponer tema de preocupación. Mientras que la administración de dosis muy elevadas de estas proteínas en ratones sin efectos adversos, sugiere que no son tóxicas.

- Las opiniones del maíz transgénico en materia de sostenibilidad alimentaria están polarizadas, pudiendo haber conflictos de interés de por medio. No obstante, no se cuenta con una evidencia científica lo suficientemente sólida para justificar que no se cultive.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Acosta, R. (2009). El cultivo del maíz, su origen y clasificación. *El maíz en Cuba. Cultivos tropicales*, 30(2), 113-120.
- 2- Areal, F. J., & Riesgo, L. (2022). Sustainability of Bt maize in Spain (1998-2021): An economic, social and environmental analysis. Fundación Antama, Madrid.
- 3- AESAN (2020). Alimentos y piensos modificados genéticamente autorizados en la UE. Disponible en: https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/seguridad_alimentaria/subdetalle/alimentos_omg_autorizados_UE.htm
- 4- Australian Government Department of Health (2008). The Biology of Zea mays L. spp mays (maize or corn). Disponible en: <https://www.ogtr.gov.au/resources/publications/biology-zea-mays-l-ssp-mays-maize-or-corn>
- 5- Baktavachalam, G. B., Delaney, B., Fisher, T. L., Ladics, G. S., Layton, R. J., Locke, M. E., Schmidt, J., Anderson, J. A., Weber, N. N., Herman, R. A., & Evans, S. L. (2015). Transgenic maize event TC1507: Global status of food, feed, and environmental safety. *GM crops & food*, 6(2), 80–102.
- 6- Carzoli, A. K., Aboobucker, S. I., Sandall, L. L., Lübberstedt, T. T., & Suza, W. P. (2018). Risks and opportunities of GM crops: Bt maize example. *Global Food Security*, 19, 84-91.
- 7- DIRECTIVA 2001/18/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 12 de marzo de 2001 sobre la liberación intencional en el medio ambiente de organismos modificados genéticamente y por la que se deroga la Directiva 90/220/CEE del Consejo.
- 8- Devos, Y., Reheul, D., & De Schrijver, A. (2005). The co-existence between transgenic and non-transgenic maize in the European Union: a focus on pollen flow and cross-fertilization. *Environmental biosafety research*, 4(2), 71–87.
- 9- EFSA GMO Panel, (2022). Scientific Opinion on the assessment of genetically modified Maize MON 87429 for food and feed uses, under Regulation (EC) No 1829/2003 (application EFSA-GMO-NL-2019-161). *EFSA Journal* 2022; 20(11):7589, 40 pp.

- 10- FAO (2022). Hambre e inseguridad alimentaria. Disponible en: <https://www.fao.org/hunger/es/>
- 11- FAO, FIDA, UNICEF, PMA y OMS (2022). El estado de la seguridad alimentaria y nutrición en el mundo. Adaptación de las políticas alimentarias y agrícolas para hacer las dietas saludables más asequibles. Roma, FAO.
- 12- FDA (2023). How GMO Crops Impact Our World. Disponible en: <https://www.fda.gov/food/agricultural-biotechnology/how-gmo-crops-impact-our-world>
- 13- Garg, M., Sharma, A., Vats, S., Tiwari, V., Kumari, A., Mishra, V., & Krishania, M. (2021). Vitamins in Cereals: A Critical Review of Content, Health Effects, Processing Losses, Bioaccessibility, Fortification, and Biofortification Strategies for Their Improvement. *Frontiers in nutrition*, 8, 586815. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.586815>
- 14- García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S. (2019). Chapter 1- Corn History and Culture. *Corn* (Third Edition), AACCI International Press, 1-18.
- 15- García-Lara, S., Chuck-Hernández, C., & Serna-Saldivar, S. (2019). Development and Structure of the Corn Kernel. , (), 147–163.
- 16- Huang, S., Frizzi, A., Florida, C. A., Kruger, D. E., & Luethy, M. H. (2006). High lysine and high tryptophan transgenic maize resulting from the reduction of both 19- and 22-kD alpha-zeins. *Plant molecular biology*, 61(3), 525–535.
- 17- Kato-Yamakake, T. A., Mapes-Sanchez, C., Mera-Ovando, L. M., Serratos-Hernández, J. A., & Bye-Boettler, R. A. (2009). Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 116 pp. México, D.F.
- 18- Kausch, A.P., Nelson-Vasilchik, K., Tilelli, M., & Hague, J. P. (2021). Maize tissue culture, transformation, and genome editing. *In Vitro Cell.Dev.Biol.-Plant* 57, 653–671.
- 19- Kraic, J., Mihálik, D., Klčová, L., Gubišová, M., Klempová, T., Hudcovicová, M., Ondřejčková, K., Mrkvová, M., Havrlentová, M., Gubiš, J., & Čertík, M. (2018). Progress in the genetic engineering of cereals to produce essential polyunsaturated fatty acids. *Journal of biotechnology*, 284, 115–122.

- 20- Lee, H., & Zhang, Z. J. (2014). Agrobacterium-mediated transformation of maize (*Zea mays*) immature embryos. *Methods in molecular biology* (Clifton, N.J.), 1099, 273–280.
- 21- Maqbool, M. A., Beshir-Issa, A., & Khokhar, E. S. (2021). Quality protein maize (QPM): Importance, genetics, timeline of different events, breeding strategies and varietal adoption. *Plant Breed* 140: 375– 399.
- 22- Moreiras, O., Carbajal, A., Cabrera, L., & Cuadrado, C. (2016). *Tablas de composición de alimentos*. Ediciones Pirámide (Grupo Anaya, SA). 18ª edición.
- 23- Naciones Unidas (2022). *Desafíos globales*. Disponible en: <https://www.un.org/es/global-issues/population>.
- 24- Nandula V. K. (2019). Herbicide Resistance Traits in Maize and Soybean: Current Status and Future Outlook. *Plants* (Basel, Switzerland), 8(9), 337.
- 25- Naqvi, S., Zhu, C., Farre, G., Ramessar, K., Bassie, L., Breitenbach, J., Perez Conesa, D., Ros, G., Sandmann, G., Capell, T., & Christou, P. (2009). Transgenic multivitamin corn through biofortification of endosperm with three vitamins representing three distinct metabolic pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(19), 7762–7767.
- 26- Oliver M. J. (2014). Why we need GMO crops in agriculture. *Missouri medicine*, 111(6), 492–507.
- 27- Pellegrino, E., Bedini, S., & Nuti, M. (2018) Impact of genetically engineered maize on agronomic, environmental and toxicological traits: a meta-analysis of 21 years of field data. *Sci Rep* 8, 3113.
- 28- REGLAMENTO (CE) No 1829/2003 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 22 de septiembre de 2003 sobre alimentos y piensos modificados genéticamente.
- 29- Rouf, T. R. & Prasad, Kamlesh & Kumar, Pradyuman. (2016). Maize. A potential source of human nutrition and health: A review. *Cogent-Food and Agriculture*.
- 30- Saeed, M. S., & Saeed, A. (2020). Health benefits of maize crop. An overview. *Current Research in Agriculture and Farming*, 1(3), 5-8.

- 31- Sánchez, F. C, Salinas, M. Y, Vázquez, C. M. G, Velázquez, C. G.A, & Aguilar, G. N. (2007). Efecto de las prolaminas del grano de maíz (*Zea mays* L.) sobre la textura de la tortilla. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57(3), 295-301.
- 32- Sánchez-Ortega, I. (2014). Maíz I (*Zea mays*). *Reduca (Biología)*. Serie Botánica. 7 (2): 151-171.
- 33- Scott, M. P., & Pollak, L. M. (2005). Transgenic Maize. *Starch*, 57, 187-195.
- 34- Silva-Castro, C. A. (2005). Maíz genéticamente modificado. Bogotá. Colombia: AGRO -BIO.
- 35- Statista (2023). World grain production by type. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/>
- 36- Smyth S. J. (2020). The human health benefits from GM crops. *Plant biotechnology journal*, 18(4), 887–888.
- 37- Tang, M., He, X., Luo, Y., Ma, L., Tang, X., & Huang, K. (2013). Nutritional assessment of transgenic lysine-rich maize compared with conventional quality protein maize. *Journal of the science of food and agriculture*, 93(5), 1049–1054.
- 38- Venneria, E., Fanasca, S., Monastra, G., Finotti, E., Ambra, R., Azzini, E., Durazzo, A., Foddai, M. S., & Maiani, G. (2008). Assessment of the nutritional values of genetically modified wheat, corn, and tomato crops. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(19), 9206–9214.
- 39- Yadava, P., Abhishek, A., Singh, R., Singh, I., Kaul, T., Pattanayak, A., & Agrawal, P. K. (2017). Advances in Maize Transformation Technologies and Development of Transgenic Maize. *Frontiers in plant science*, 7, 1949.
- 40- Yassitepe, J. E. C. T., da Silva, V. C. H., Hernandez-Lopes, J., Dante, R. A., Gerhardt, I. R., Fernandes, F. R., da Silva, P. A., Vieira, L. R., Bonatti, V., & Arruda, P. (2021). Maize Transformation: From Plant Material to the Release of Genetically Modified and Edited Varieties. *Frontiers in plant science*, 12, 766702.
- 41- Zhu, C., Naqvi, S., Gomez-Galera, S., Pelacho, A. M., Capell, T., & Christou, P. (2007). Transgenic strategies for the nutritional enhancement of plants. *Trends in plant science*, 12(12), 548–555.

VII. ANEXOS

7.1 Lista de abreviaturas

ADN: ácido desoxirribonucleico

AGPI: ácido graso poliinsaturado

AGPI-CL: ácido graso poliinsaturado de cadena larga

Bt: Bacillus thuringiensis

crtl: fitoeno desaturasa de origen bacteriano

Cry: pesticidal crystal protein

CP4 EPSPS: 5-enolpiruvilsikimato-3-fosfato sintetasa

dhar: dehidroascorbato reductasa

EFSA: Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria

GCH1: GTP ciclohidrolasa I

Hi-II: High type II callus production

LA: ácido linoleico

ALA: ácido α -linolénico

Maíz o2: maíz opaco-2

Maíz fl2: maíz harinoso-2

naat: nicotianamina transferasa

OMG: organismo modificado genéticamente

PABA: ácido p-aminobenzoico

PAT: fosfinotricina N-acetil transferasa

psy: fitoeno sintasa

sb401: gen de *Solanum berthaultii*

7.2 Índice de figuras

Figura 3. Evolución de la población mundial en la última década y prevalencia de hambre en el mundo.

Figura 4. Producción mundial de cereales.

Figura 3. Partes del maíz

Figura 4. Partes del grano de maíz

Figura 5. Transformación genética de las plantas.

Figura 6. Biosíntesis de los ácidos grasos poliinsaturados.

Figura 7. Biosíntesis de beta-caroteno.

Figura 8. Biosíntesis del ácido L-ascórbico

Figura 9. Biosíntesis del folato.

7.3 Índice de tablas

Tabla 2. Composición por cada 100 g de maíz comestible.

Tabla 2. Composición del maíz convencional y variedades transgénicas con contenido disminuido de α -zeína.

Tabla 3. Perfil de aminoácidos de maíz convencional y variedades transgénicas con contenido disminuido de α -zeína.

Tabla 4. Perfil aminoacídico de maíz convencional y variedades transgénicas con contenido reducido de α -zeína.

Tabla 5. Contenido de vitaminas en maíz convencional y transgénico