



AGROSAVIA
EDITORIAL

Edición de genes en plantas: definiciones y aplicaciones en el cultivo de la papa en AGROSAVIA y el INTA

Autores

Gina Alessandra Garzón-Martínez
Pablo Edgar Jiménez-Ortega
Gabriela Massa
Sergio Feingold
Luz Stella Barrero



PROCISUR
Cooperación que da resultados



FONTAGRO



Edición de genes en plantas: definiciones y aplicaciones en el cultivo de la papa en AGROSAVIA y el INTA



Autores

Gina Alessandra Garzón-Martínez

Pablo Edgar Jiménez-Ortega

Gabriela Massa

Sergio Feingold

Luz Stella Barrero

Edición de genes en plantas: definiciones y aplicaciones en el cultivo de la papa en AGROSAVIA y el INTA. / Gina Alessandra Garzón Martínez [y otros cuatro] – Mosquera, (Colombia): AGROSAVIA, 2025.

52 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)
Incluye gráficos y tablas.
ISBN e-Book: 978-958-740-798-3

1. *Solanum tuberosum* 2. Cultivo 3. Mejoramiento genético 4. Cruzamiento 5. Tecnología 6. ADN 7. Proteína I. Garzón Martínez, Gina Alessandra II. Jiménez Ortega, Pablo Edgar III. Massa, Gabriela IV. Feingold, Sergio V. Barrero, Luz Stella.

Palabras clave normalizadas según Tesouro Multilingüe de Agricultura -Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).
Centro de Investigación Tibaitatá. Kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera. Código postal 250047, Colombia.

Esta publicación es resultado de investigación del proyecto “Edición génica para el mejoramiento en especies vegetales y animales” (convenio 2076). Programa Cooperativo para el Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (Fontagro) ATN/RF-18757-RG.

Colección: Alianzas AGROSAVIA
Tipología: Cartilla

Fecha de recepción: 10 de julio de 2024
Fecha de evaluación: 23 de agosto de 2024
Fecha de aceptación: 24 de septiembre de 2024

Publicado: marzo de 2025

Preparación editorial
Editorial Agrosavia
editorial@agrosavia.co
Dirección editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz
Edición: Liliana Gaona García
Adecuación pedagógica: Andrea Montoya Carvajal
Corrección de estilo: Nathalie De la cuadra N.
Ilustración: Juan Felipe Martínez Tirado
Diseño: Mónica Cabiativa
Diagramación: María Paula Berón

Citación sugerida: Garzón-Martínez, G. A., Jiménez-Ortega, P. E., Massa, G., Feingold, S., & Barrero, L. S. (2025). Edición de genes en plantas: definiciones y aplicaciones en el cultivo de la papa en AGROSAVIA y el INTA. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7407983>

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones y de la información recogida en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación. Igualmente, expresan que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros, relativa a los derechos de autor u otros derechos que se vulneren como resultado de su contribución.

Este documento se ha realizado con el apoyo financiero de Fontagro. Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista de Fontagro, de su Consejo Directivo, ni de los países que representa.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Contenido

5	Los autores	
9	Agradecimientos	
11	Introducción	
13	Glosario	
15	¿Qué es la edición de genes?	
17	¿Cómo funciona?	
21	¿Cómo se logra en plantas?	
31	¿Convencional o transgénico?	
35	¿Qué aplicaciones hay en la alimentación y agricultura?	
37	¿Qué proyectos CRISPR-Cas desarrollan AGROSAVIA y el INTA en papa?	
	¿Cómo se forma la acrilamida?	37
	¿Cómo se puede reducir la acrilamida por edición de genes?	38
45	Conclusiones y perspectivas	
	Anexo. Estado regulatorio de países del mundo en relación con cultivos editados genéticamente	46
49	Referencias	

Lista de figuras

Figura 1	Mecanismo <i>CRISPR</i> , por el cual las bacterias se defienden de los virus	16
Figura 2	Proceso de edición génica mediante <i>CRISPR-Cas</i> en plantas	18
Figura 3	El <i>ADN</i> , el <i>ARN</i> y las proteínas	19
Figura 4	Cultivo <i>in vitro</i> de plantas en condiciones controladas	22
Figura 5	Proceso de cultivo <i>in vitro</i> en plantas	23
Figura 6	Proceso de cultivo <i>in vitro</i> desde la selección de plantas madre hasta la aclimatación con modificaciones	24
Figura 7	Vectores con componentes del sistema <i>CRISPR-Cas</i>	25
Figura 8	Ribonucleoproteína con componentes del sistema <i>CRISPR-Cas</i>	26
Figura 9	Métodos de introducción de los componentes <i>CRISPR-Cas</i> en plantas	27
Figura 10	Proceso para lograr la edición de genes en plantas	28
Figura 11	Tipos de plantas que se pueden obtener en un proceso de edición con <i>CRISPR</i>	30
Figura 12	Técnicas de mejoramiento de plantas	33
Figura 13	Ejemplos de variedades convencionales obtenidas a base de <i>CRISPR</i>	36
Figura 14	Papas chips cuyo proceso de producción puede producir acrilamida	39
Figura 15	Proceso de aislamiento de protoplastos y regeneración de plantas de papa en <i>AGROSAVIA</i>	40
Figura 16	Comparación de coloración y acumulación de azúcares reductores en chips de líneas editada y sin editar	43
Figura 17	Papas editadas para mejorar su resistencia a los golpes	44

Los autores

Gina Alessandra Garzón-Martínez

Correo electrónico: ggarzon@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5620-9055>

Bióloga de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, magíster en Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Javeriana y doctora en Ciencias Biológicas de la Universidad de Aberystwyth, Reino Unido. Actualmente, se desempeña como investigadora PhD en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Su trabajo se ha centrado en el estudio de la diversidad genética de cultivos de importancia comercial en Colombia, utilizando herramientas moleculares para caracterizar colecciones de germoplasma, crear colecciones núcleo y apoyar programas de mejoramiento genético. Tiene experiencia en el uso de marcadores moleculares para la caracterización de especies como uchuva, palma de aceite, chontaduro y cacao, así como en el empleo de herramientas transcriptómicas y genómicas para estudiar la interacción planta-patógeno y la identificación de genes de interés agronómico. En los últimos años, ha participado en el diseño de experimentos de fenotipado a gran escala y en el desarrollo de herramientas de inteligencia artificial para la evaluación de características agronómicas. Además, ha profundizado en técnicas de edición génica aplicadas al mejoramiento de cultivos.

Pablo Edgar Jiménez-Ortega

Correo electrónico: pjimenez@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8258-2320>

Agrónomo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia. Profesional de apoyo a la investigación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Cuenta con más de 25 años de experiencia en biotecnología vegetal, introducción, multiplicación, enraizamiento, cultivo *in vitro* de plantas mediante embriogénesis somática, crioconservación y biorreactores en diversas especies, que incluyen papa, plátano, banano, yuca, palma, uchuva y cebolla. También tiene experiencia en el uso de marcadores moleculares desde la extracción de DNA hasta su aplicación en especies como papa y palma. Tiene experiencia en el análisis poscosecha en mora, lulo, mango y fresa.

Gabriela Massa

Correo electrónico: massa.gabriela@inta.gob.ar

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9028-1330>

Licenciada en Biotecnología de la Universidad Nacional de Quilmes y doctora de la misma universidad. Es Investigadora del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) desde 2008, investigadora adjunta del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet), y jefa de trabajos prácticos de la materia Bioquímica I, II e Introducción a la Biotecnología de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Tiene funciones de gestión institucional como jefa del Grupo de Recursos Fitogenéticos, Genética y Mejoramiento del área de Agronomía de la EEA-Balcarce. Ha participado en el Proyecto Genoma de la Papa. En la actualidad,



se desempeña en el Laboratorio de Agrobiotecnología. Está abocada a la puesta a punto de la Tecnología de Edición Génica en papa y al estudio de la variabilidad alélica en genes de interés agroindustrial de la papa andina. Sus resultados han sido publicados en revistas de prestigio internacional y cuenta con una activa participación en la formación de recursos humanos.

Sergio Feingold

Correo electrónico: feingold.sergio@inta.gob.ar

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7107-4651>

Ingeniero agrónomo de la Universidad de Buenos Aires, con maestría y doctorado en proteínas de reserva relacionadas con la calidad en trigo. Fue uno de los pioneros en Argentina en el uso de marcadores moleculares y mapas genéticos aplicados al mejoramiento vegetal, tanto en el ámbito público como privado. Desde 1999 es responsable del Laboratorio de Agrobiotecnología del Área de Investigación en Agronomía del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de la Estación Experimental Agropecuaria de Balcarce, y se especializa en genómica funcional en *Solanum* sp. Ha sido el investigador responsable para Argentina en el Consorcio de Secuenciación del Genoma de la Papa. Los proyectos actuales de su equipo de investigación se orientan al estudio de genes responsables de la calidad industrial y nutricional de la papa, la síntesis de metabolitos secundarios y la adaptación y el uso de nuevas tecnologías de edición génica en plantas. Desde 2014 coordina el Programa Nacional de Biotecnología del INTA de Argentina.



Luz Stella Barrero

Correo electrónico: lbarrero@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2138-8705>

Investigadora PhD senior de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), reconocida como investigadora senior por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (MinCiencias), y profesora asociada adjunta en el Boyce Thompson Institute (Estados Unidos). Cuenta con más de 25 años de experiencia en diversidad genética, mapeo de loci de características cuantitativas, mapeo por asociación y, en los últimos años, edición de genes para el avance de la genética y el mejoramiento de cultivos; también ha contribuido al desarrollo de variedades de uchuva. Ha recibido varios reconocimientos y ha realizado estancias posdoctorales y como investigadora visitante en la Universidad de Cornell y el Boyce Thompson Institute (Estados Unidos). Ha sido docente y ha dirigido investigaciones de estudiantes de pregrado y posgrado, jóvenes investigadores y técnicos. En AGROSAVIA, ha sido jefe del Departamento de Agrobiodiversidad, consultora de la Dirección Nacional de Investigación, directora del Laboratorio de Genética Molecular Vegetal y miembro del Comité de Coordinación del Programa Nacional de Bioprospección del Sector Agropecuario de Colombia.



Agradecimientos

Al proyecto ATN/RF-18757-RG: “Edición génica para el mejoramiento en especies vegetales y animales”, financiado por el Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (Fontagro) y el Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y AgroIndustrial del Cono Sur (Procisur). A Félix Eugenio Enciso y Víctor Núñez (q. e. p. d), por sus aportes conceptuales al proyecto. Al Laboratorio de Producción Vegetal de AGROSAVIA, en particular a Linda Gómez, Yolanda Torres y Sandra Valbuena, por su apoyo en el suministro de plántulas de papa *in vitro*.

Parda Pastusa
S. 23
S.V.

Parda Pastusa
S. 23
S.V.

Introducción

Gracias al continuo progreso en el mejoramiento de plantas, en la actualidad se puede encontrar en el mercado gran diversidad de cultivos con mayores rendimientos y nutrientes esenciales para satisfacer a los agricultores y consumidores. Aunque nuestros ancestros usaban métodos tradicionales de selección y cruzamientos para elegir plantas que se ajustaran a las necesidades del ser humano, los recientes avances científicos han hecho posible el desarrollo de métodos biotecnológicos eficientes y rápidos para la generación de variedades con características específicas.

Los agricultores buscan **cultivos que sean productivos, resistentes a plagas y enfermedades**, que puedan tolerar condiciones climáticas cambiantes y que proporcionen alimentos más saludables, sabrosos y frescos para los consumidores. Sería ideal poder disfrutar papas más saludables, que no generen ningún componente tóxico al freírlas, o cultivos de arroz producidos con menores costos de fertilización de manera más sostenible para el ambiente, u otro tipo de cultivo mejorado.

En esta cartilla, te explicamos de forma sencilla **la tecnología más reciente** que está revolucionando la agricultura moderna: **la edición de genes**, que es una forma de mejorar los cultivos de manera rápida y precisa.

Te mostraremos, además, cómo la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) están liderando iniciativas que buscan generar beneficios para los productores y para los consumidores.



Glosario

Este glosario contiene términos que serán útiles durante la lectura de esta cartilla; cada vez que lo consideres necesario vuelve aquí para revisar y repasar algún término.

Acrilamida: compuesto tóxico que puede producir efectos dañinos para la salud.

ADN: molécula que guarda la información genética de los seres vivos (ver figura 3).

ADN foráneo: ADN de otra especie insertado en una planta para darle nuevos rasgos.

Aminoácidos: unidades básicas que forman las proteínas; una de estas es la asparagina.

ARN: molécula que convierte la información del ADN en proteínas (ver figura 3).

Azúcares reductores: carbohidratos como la glucosa y fructosa que pueden reaccionar con otras sustancias.

Callos: células no diferenciadas en constante división celular, que pueden regenerar plantas cuando se cultivan *in vitro* en el medio adecuado.

Célula: unidad básica de todos los seres vivos que realiza funciones esenciales para la vida.

CRISPR-Cas: sistema de edición de genes. CRISPR es el acrónimo de “*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*”, en español: repeticiones cortas de ADN espaciadas de forma regular que se acoplan a proteínas conocidas como Cas.

Enzima: proteína que acelera las reacciones químicas en las células.

Explantos: órgano, tejido o segmento de tejido usado para iniciar el cultivo *in vitro*. Estos pueden obtenerse de diferentes partes de la planta, como hojas, tallos, raíces, semillas o embriones.

Gen: pequeña parte del ADN, que contiene la información para que las células hagan proteínas o controlen ciertos rasgos que son heredados.

Invertasa vacuolar: enzima que convierte la sacarosa en glucosa y fructosa.

Mutaciones: cambio en la secuencia de ADN que puede alterar la función de un gen.

PPO: polifenol oxidasa, enzima que produce oxidación en tubérculos.

Proteína: molécula que cumple funciones esenciales en las células (ver figura 3).

Protoplastos: células vegetales sin pared celular.

Rasgo: característica de una planta, como el color del fruto que se puede mejorar (ver figura 3).

RNP: complejos de ribonucleoproteína, que consisten en la proteína Cas y el ARN; estos producen la edición génica sin integrarse al ADN de las células vegetales.

Transgénesis: técnica que produce transgénicos u organismos genéticamente modificados (OGM), incorporando uno o más genes de otra especie con el fin de conferirle nuevas características, como resistencia a plagas, tolerancia a herbicidas o mejoras en calidad nutricional.

Vector: molécula de ADN. Para efectos de edición de genes, el vector contiene componentes del sistema CRISPR-Cas para modificar el ADN de las células vegetales.

¿Qué es la edición de genes?

La edición de genes es una **técnica** que permite a los científicos **acceder a regiones específicas del genoma y cambiar el ADN** de un organismo vivo de forma rápida y eficiente. Hay varios métodos de edición de genes, pero aquí nos referiremos al más utilizado, que es conocido como **CRISPR-Cas**.

El científico español Francis Mojica, en 1993, descubrió el mecanismo por el cual las **bacterias se defienden de los virus** y lo llamó el sistema CRISPR. Este sistema consiste en regiones repetidas en el ADN de la bacteria, junto con pequeños fragmentos o secuencias de ADN de virus invasores que la bacteria inserta en su propio ADN con el fin de recordar y desactivar dichos virus mediante una proteína llamada Cas; de esta forma, la bacteria se defiende de estos invasores. Veamos en la figura 1 cómo es este mecanismo.

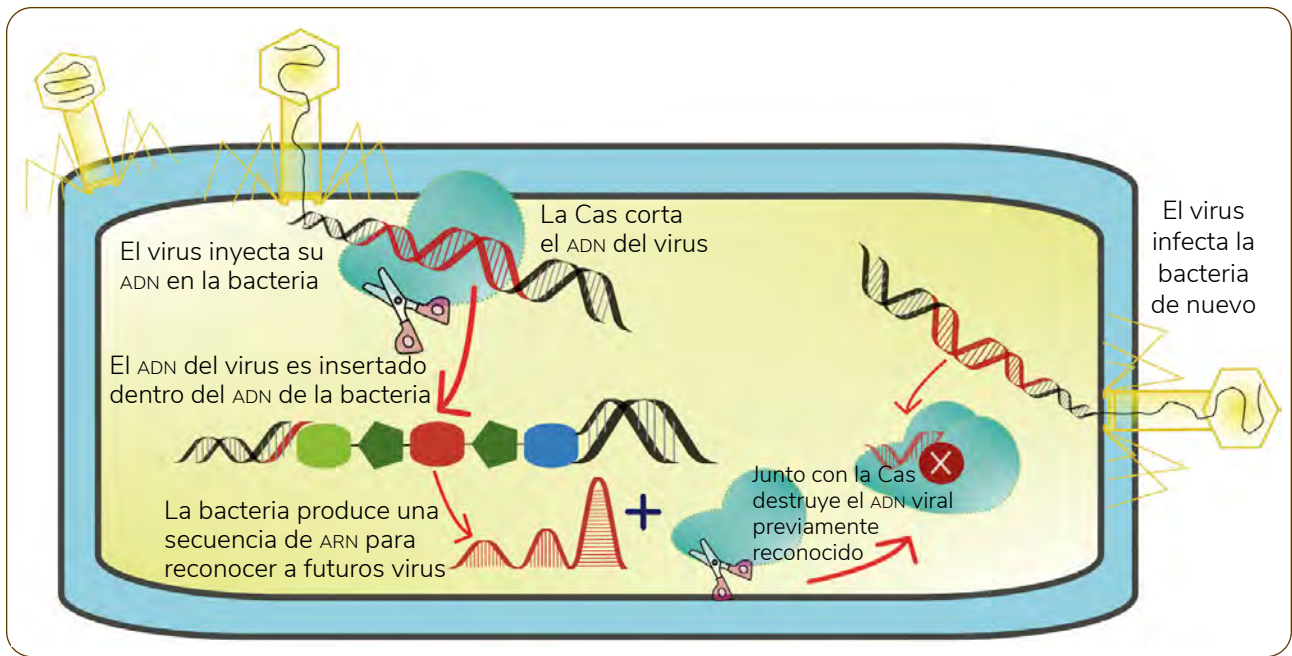


Figura 1. Mecanismo CRISPR, por el cual las bacterias se defienden de los virus.

Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez

El gran potencial de este mecanismo inspiró a dos investigadoras en 2012, Jennifer Doudna y Emmanuelle Charpentier, para simplificar este sistema y adaptarlo, con el fin de reconocer y cortar el ADN en sitios específicos de otros organismos, entre ellos las plantas.

¿Sabías que las “tijeras moleculares CRISPR-Cas” están transformando la medicina y la agricultura?

¡Es uno de los avances más grandes de este siglo!



¿Cómo funciona?

El **proceso de edición génica** mediante CRISPR-Cas necesita tres componentes principales: 1) una **secuencia de ADN** o gen que se quiere modificar; 2) una **secuencia de ARN** que sirve de guía para reconocer el gen, y 3) la **proteína Cas** o “tijera molecular” para realizar los cortes del ADN. Hay varias proteínas Cas, y la Cas9 es una de las más usadas.

Estos tres componentes permiten que el **ARN guía** reconozca el gen o la secuencia específica que se va a editar. Luego, las tijeras moleculares cortan el gen para eliminarlo, repararlo o adicionar un fragmento de ADN para modificarlo. Por último, la célula repara, de manera natural, el corte realizado y pega las puntas sueltas. Veamos en la figura 2 cómo se realiza el proceso de edición.

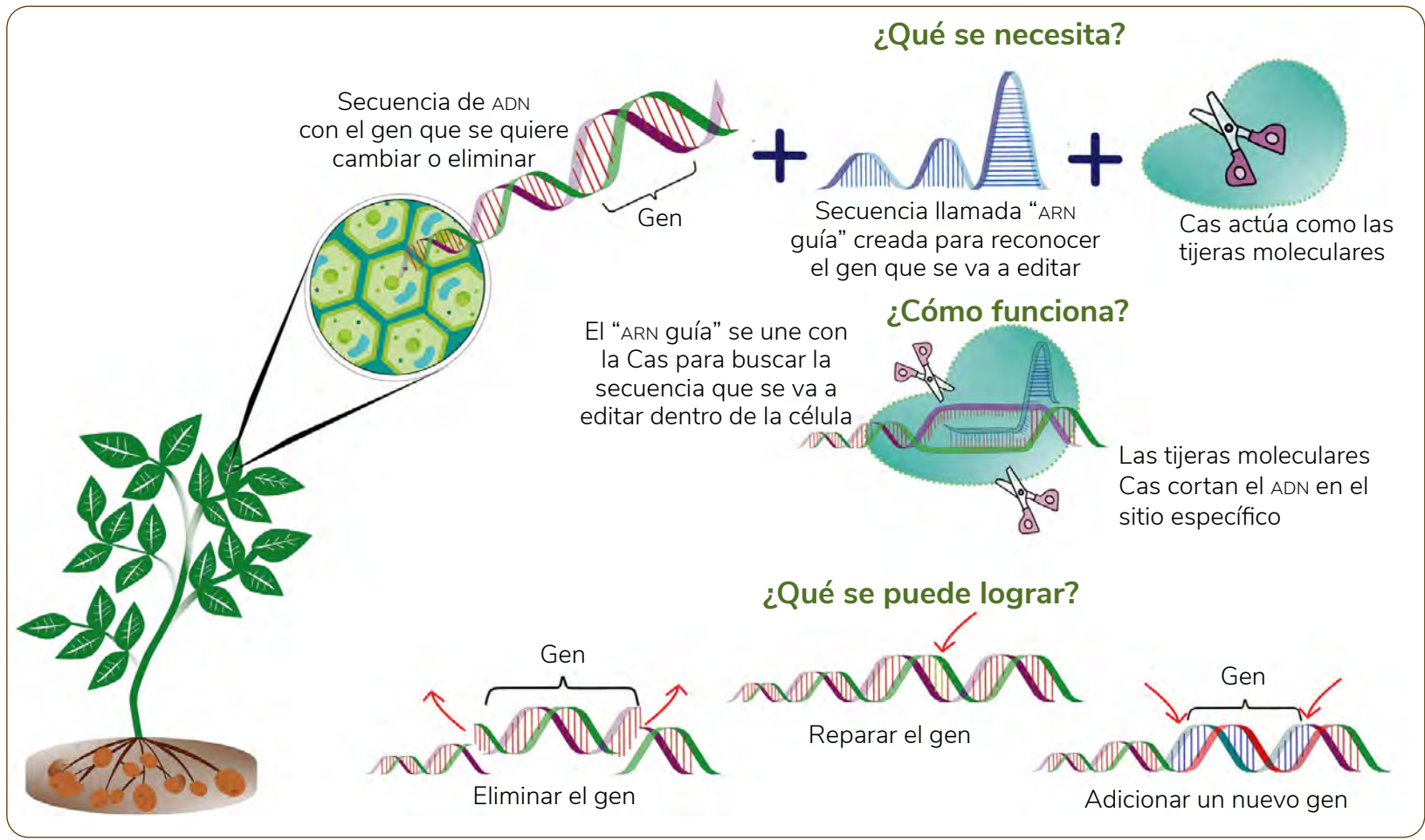


Figura 2. Proceso de edición génica mediante CRISPR-Cas en plantas.
Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez

Recordemos

Es importante recordar los componentes que contribuyen a determinar los rasgos de los seres vivos. Revisa la información que se muestra en la figura 3.

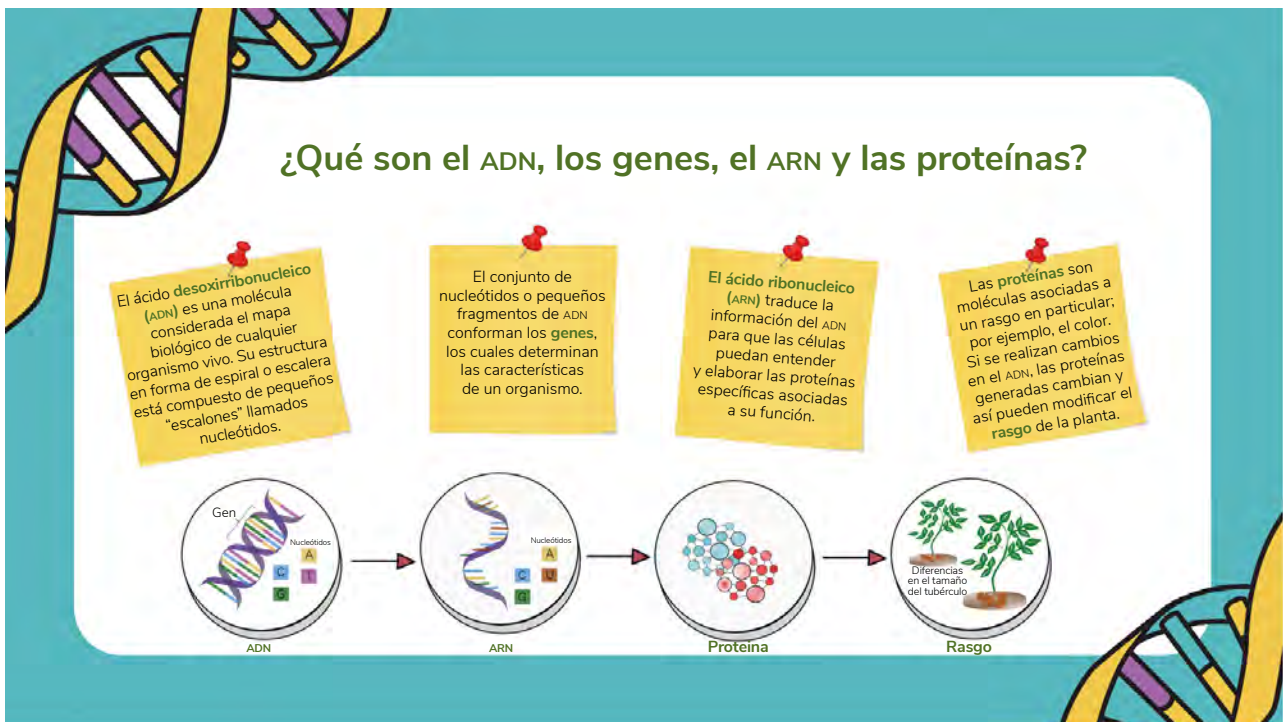


Figura 3. El ADN, el ARN y las proteínas.

Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez





¿Cómo se logra en plantas?

El **proceso de edición de genes** se realiza dentro de una célula. Desde hace varias décadas, mediante técnicas biotecnológicas, es posible regenerar plantas completas a partir de una o más células. El desafío para editar un gen de una planta se encuentra en **lograr la regeneración de la planta** completa a partir de un grupo de células usando la técnica de cultivo *in vitro*. Luego, es necesario identificar cuáles de las plantas regeneradas tienen el gen modificado.

A. ¿Cómo se logra la regeneración de plantas a partir de cultivo *in vitro*?

El **cultivo *in vitro*** es una técnica que permite **el crecimiento de plantas en un medio artificial**, fuera de su entorno natural. Se utiliza para la **propagación de especies**, la conservación de las que estén en peligro de extinción y el desarrollo de nuevas variedades. Además, es una **técnica fundamental** para realizar **edición de genes**, como se explicará más adelante en las secciones B y C. Este proceso **se lleva a cabo en un ambiente controlado** (temperatura, luz, humedad y atmósfera), donde se proporcionan las condiciones necesarias para que crezcan las plantas. En la figura 4 puedes observar plantas en cultivo *in vitro*.



Figura 4. Cultivo *in vitro* de plantas en condiciones controladas.
Foto: Franklin Barrios Ortiz

El proceso de cultivo *in vitro* se puede dividir en las siguientes etapas (figura 5):

Selección de plantas madre: los explantes se obtienen de plantas madre con las mejores características genéticas y de producción (figura 5a).

Desinfección: los explantes deben ser preparados antes de iniciar el cultivo *in vitro*. Esto implica limpiarlos de cualquier contaminante, como bacterias, hongos o virus (figura 5b).

Introducción: con ayuda de un microscopio, se realiza la introducción *in vitro* de los explantes que se cultivan en un medio apropiado (figura 5c).

Multiplificación: las plantas *in vitro* se cultivan en un nuevo medio de cultivo, el cual contiene los nutrientes y las hormonas necesarias para que las células o los tejidos se dividan y regeneren nuevas plantas (figura 5d).

Enraizado de las plantas: después de que las plantas hayan crecido lo suficiente, se debe promover el desarrollo de la raíz. El enraizamiento se puede realizar en un medio de cultivo con hormonas que promuevan dicho proceso (figura 5e).

Aclimatación de las plantas: las plantas enraizadas deben ser aclimatadas a las condiciones ambientales antes de plantarlas en el suelo. La aclimatación se realiza gradualmente, exponiendo las plantas a condiciones de luz, temperatura y humedad cada vez más similares a las condiciones del entorno natural (figura 5f).



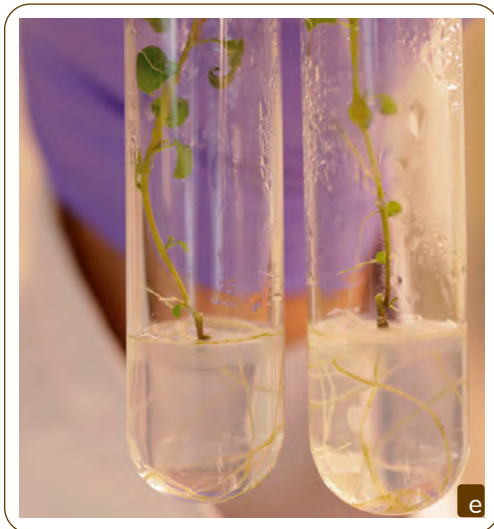
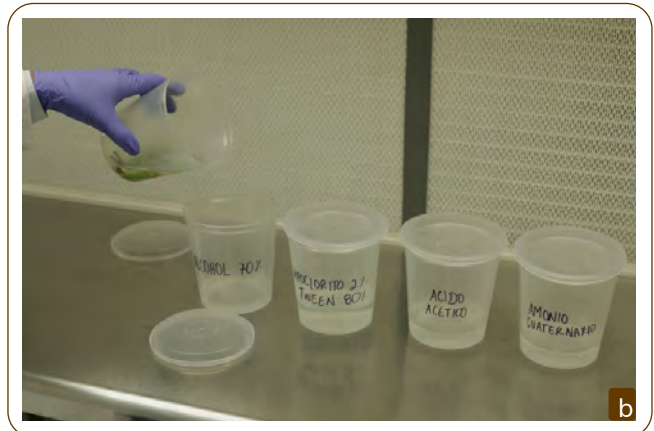


Figura 5. Proceso de cultivo *in vitro* en plantas. a. Selección de plantas madre; b. Desinfección de explantes; c. Introducción *in vitro* de explantes; d. Multiplicación *in vitro* de plantas; e. Enraizamiento *in vitro* de plantas; f. Aclimatación de plantas.

Fotos: Franklin Barrios Ortiz



El proceso de cultivo *in vitro*, desde la selección de plantas madre hasta la aclimatación de plantas para posterior cultivo, puede tener modificaciones. Por ejemplo, se pueden utilizar protoplastos que se aíslan usando hojas de plantas *in vitro* para regenerar callos y luego, plantas completas. En la figura 6, puedes identificar el detalle del proceso.

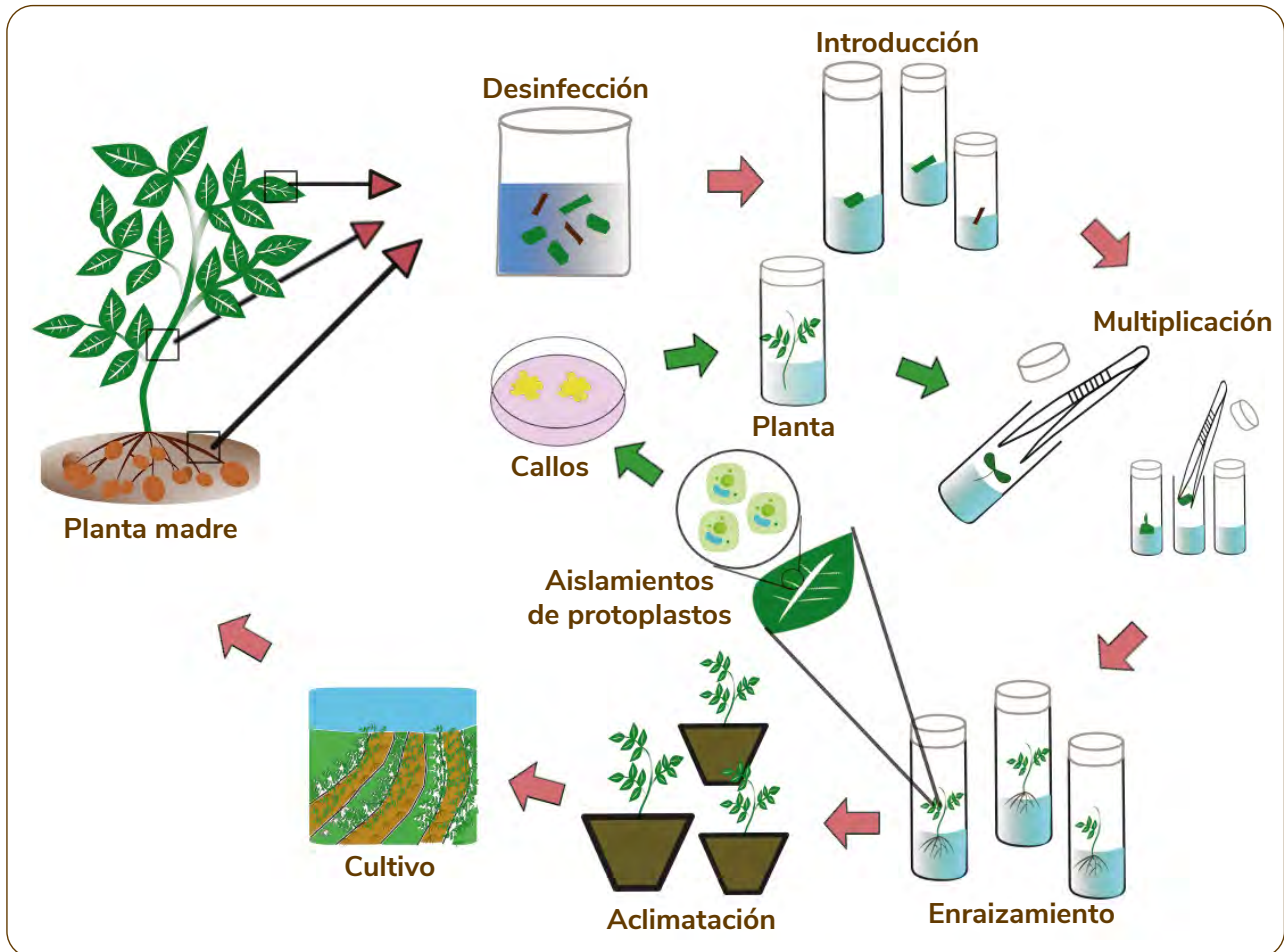


Figura 6. Proceso de cultivo *in vitro* desde la selección de plantas madre hasta la aclimatación con modificaciones.

Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez

B. ¿Cómo se introducen los componentes de edición de genes en plantas?

Después de definir el método para regenerar plantas de cultivo *in vitro*, se introducen los componentes de edición de genes para obtener plantas editadas, lo cual se puede hacer de las siguientes maneras:

- Una **molécula de ADN**, o también llamado vector, que contiene componentes del sistema CRISPR-Cas, que son la proteína Cas, el ARN guía y, en algunos casos, el gen que se quiere insertar o adicionar a la planta (figura 7). El vector puede tener elementos que le permiten integrarse al ADN de la planta, y así diferenciar vectores que se integran y vectores que no lo hacen.

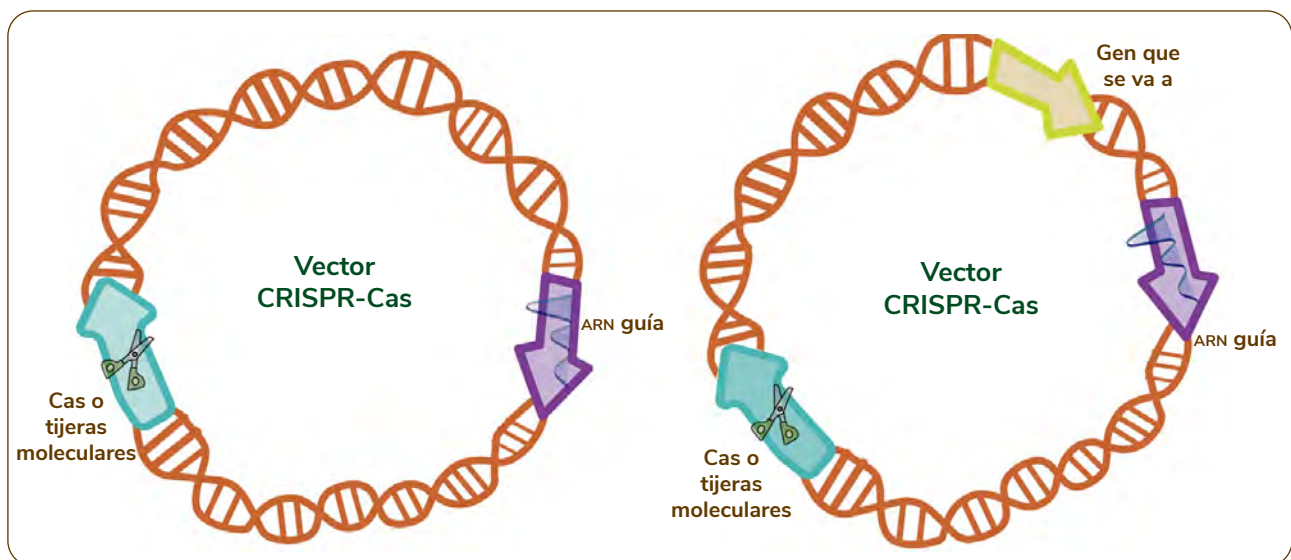


Figura 7. Vectores con componentes del sistema CRISPR-Cas.

Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez

- **Complejos conocidos como ribonucleoproteína o RNP**, que son la proteína Cas y el ARN guía, los cuales son generados en condiciones *in vitro*; es decir, fuera de la célula (figura 8). Estos complejos producen la edición deseada, sin integrarse al ADN de las células vegetales.



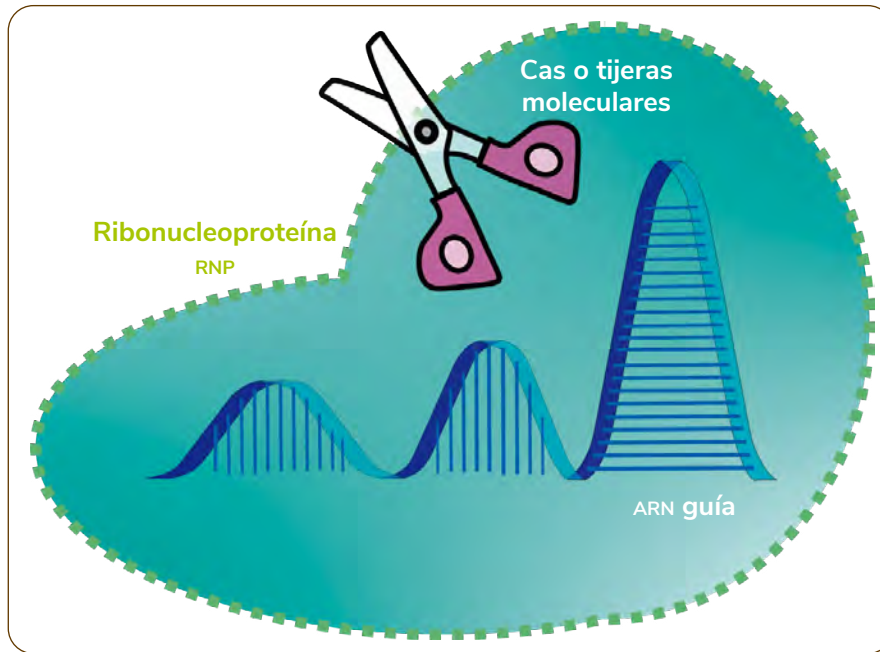


Figura 8. Ribonucleoproteína con componentes del sistema CRISPR-Cas.
Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez

El **vector o los complejos RNP** se introducen a las células de las plantas mediante el uso de protoplastos, callos, embriones u otros explantes, dependiendo del método de regeneración de plantas más adecuado para el cultivo de interés.

Existen diferentes **métodos de introducción** de los componentes CRISPR-Cas en plantas, los más usados incluyen lo siguiente:

- **Biolística:** también conocida como **bombardeo de partículas**. Es un método que usa partículas de metal (por ejemplo, oro) cubiertas con el vector o los complejos RNP. Estos se introducen a altas velocidades (por ejemplo, usando presión de helio) en células de plantas con pared celular (como embriones). El método utiliza un equipo conocido como “pistola genética”.
- **Bacterias:** el método que más se emplea utiliza la bacteria conocida como *Agrobacterium*. Esta transfiere el vector con los componentes CRISPR dentro de las células de las plantas. Este método no usa complejos RNP.

- **Polietilenglicol o PEG:** el método usa el compuesto PEG, que se mezcla con el vector o los complejos RNP para permitir su entrada a células sin pared celular (por ejemplo, protoplastos).

Veamos estos métodos en la figura 9.

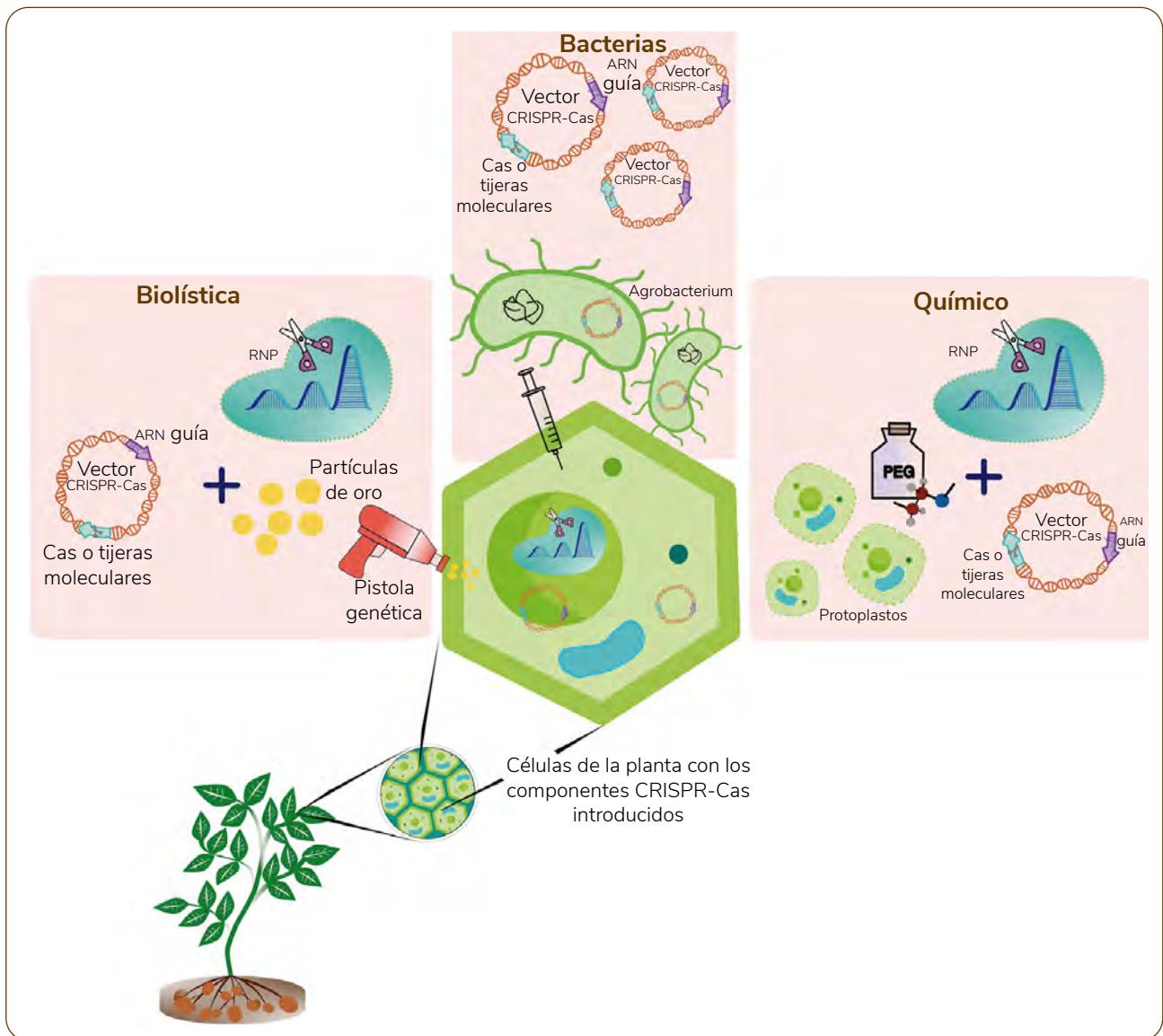


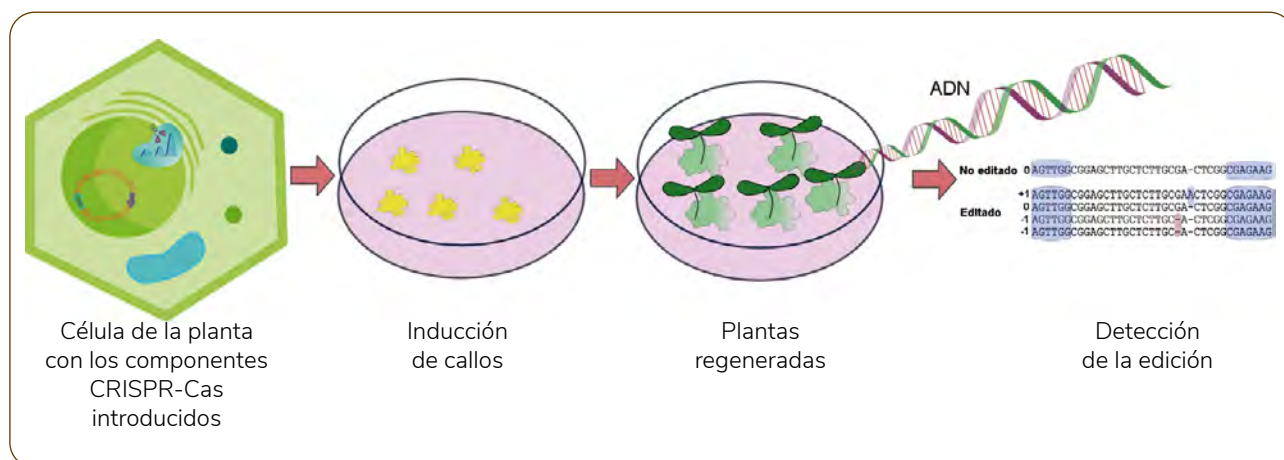
Figura 9. Métodos de introducción de los componentes CRISPR-Cas en plantas.

Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez



C. ¿Cómo se logra la edición de genes después de introducir los componentes CRISPR-Cas en plantas?

Después de introducir el vector o los complejos RNP a la célula vegetal por cualquier método, se utilizan medios y condiciones apropiadas para el cultivo *in vitro* para inducir callos y regenerar plantas. Estas son evaluadas para detectar si contienen la edición deseada usando su ADN (figura 10).



Nota: Se ilustra un ejemplo de cambios en la secuencia de nucleótidos que conforman el ADN en plantas editadas por adición (+1) o eliminación (-1) de un nucleótido comparado con plantas no editadas (0).

Figura 10. Proceso para lograr la edición de genes en plantas.

Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez

La selección de uno u otro método depende del cultivo. Por ejemplo, en arroz se pueden regenerar plantas editadas a partir de callos a los que se les introduce el vector usando *Agrobacterium* o a partir de embriones inmaduros a los que se les introduce el vector o los complejos RNP por medio del uso de biolística. En papa, se pueden regenerar plantas editadas a partir de protoplastos a los que se les introduce el vector o los complejos RNP mediante el uso de PEG o de *Agrobacterium*.



D. ¿Qué tipos de plantas editadas se pueden obtener?

Hay dos tipos de plantas editadas que se pueden obtener:

Plantas editadas con ADN foráneo: se pueden producir cuando se introducen vectores a las plantas. Estas plantas contienen en su ADN la edición deseada y el ADN foráneo; es decir, elementos del vector como la Cas (figura 11). CRISPR-Cas se puede usar para introducir ADN foráneo intencionalmente, pero este ADN también se puede eliminar mediante el cruce de una planta con ella misma o con otra planta, lo cual puede dar lugar a plantas libres de ADN foráneo en siguientes generaciones. Esto es factible en cultivos de ciclo corto de reproducción sexual como el arroz.

Plantas editadas únicamente: se producen cuando se introducen complejos de RNP o métodos libres de ADN (es decir, sin vectores) en las plantas. Estas contienen en su genoma la edición deseada únicamente (figura 11). Aquí no hay integración de ADN foráneo en su genoma. Los complejos RNP se degradan en las células de las plantas, lo cual es conveniente para cualquier cultivo, en particular, para los de ciclo largo o de reproducción asexual.



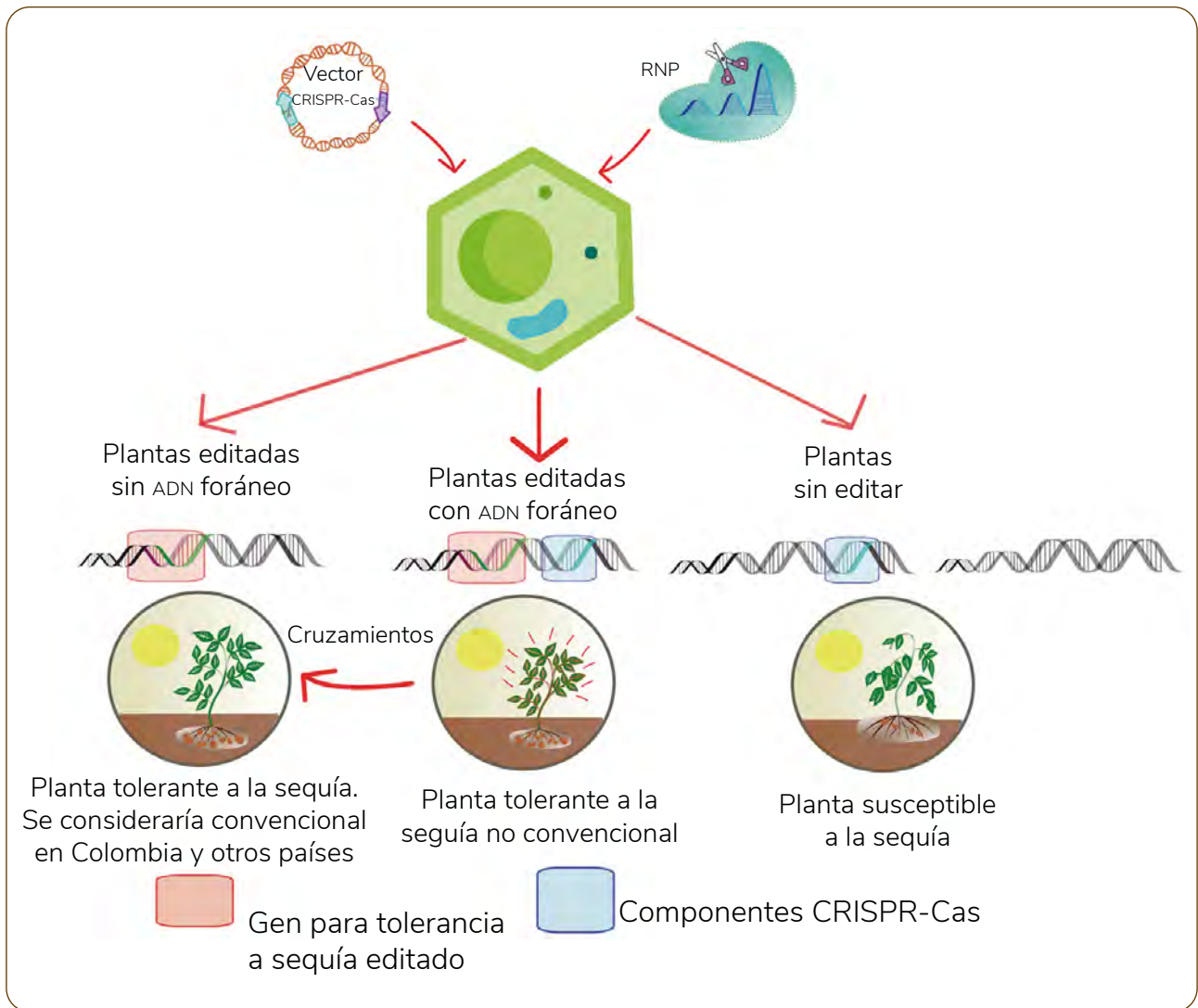


Figura 11. Tipos de plantas que se pueden obtener en un proceso de edición con CRISPR.

Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez

¿Convencional o transgénico?

Hay diferentes **técnicas de mejoramiento de plantas**, desde la selección clásica hasta la edición de genes (figura 12), las cuales incluyen métodos convencionales como los cruzamientos, la inducción de mutaciones con uso de agentes químicos o físicos, la transgénesis o la selección asistida gracias al conocimiento de la secuencia de nucleótidos del ADN (figura 3).

Basadas en los **mecanismos creados por la naturaleza**, las técnicas más recientes incluyen la edición de genes que permite una mayor precisión en comparación con otras técnicas. Así, los cruzamientos dentro de la misma especie de cultivo o con especies silvestres pueden introducir de miles a millones de cambios en el ADN; de igual forma, la inducción de mutaciones químicas puede introducir miles de cambios, mientras que la edición de genes bien diseñada puede introducir un único cambio en una ubicación precisa y predeterminada del ADN (Graham et al., 2020).

¿Sabías que para que una planta editada se considere convencional en Colombia y Argentina no debe tener ADN de otra especie?



Las **técnicas como la transgénesis**, por la cual se generan los transgénicos u organismos genéticamente modificados (OGM), insertan ADN foráneo que normalmente no se puede introducir por cruzamiento tradicional; por su parte, la técnica de edición de genes permite generar organismos libres de ADN de otra especie (figura 11).

Como la edición de genes que genera productos sin ADN foráneo es similar a los cambios en el ADN que podrían ocurrir de manera natural o convencional, las agencias reguladoras en varios países (como el Instituto Colombiano Agropecuario [ICA] en Colombia, con la Resolución 00022991 de 2022) consideran los cultivos generados con esta técnica como **cultivos convencionales**.

Recordemos

¿Qué técnicas de mejoramiento de cultivos existen?

A lo largo de los siglos, el ser humano ha transformado las especies silvestres de plantas en variedades agrícolas con características útiles, como mayor rendimiento, mejor sabor y tamaño del fruto, mayor calidad nutricional o menor contenido de sustancias tóxicas, además de tolerancia a sequía o a diferentes enfermedades. Este proceso se ha llevado a cabo mediante diferentes técnicas, algunas de las cuales se muestran en la figura 12.





Figura 12. Técnicas de mejoramiento de plantas.
Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez





¿Qué aplicaciones hay en la alimentación y agricultura?

Hay diversos productos a base de edición de genes para la medicina y la industria. En la alimentación y la agricultura, las aplicaciones van desde la **mejora de la resistencia a plagas, enfermedades, sequía, salinidad** y contaminación por metales pesados hasta la **producción de los cultivos** y la calidad de sus productos alimenticios.

Se han desarrollado variedades mejoradas mediante edición de genes no sujetas a regulación alrededor del mundo; es decir, consideradas convencionales por parte de las agencias gubernamentales de varios países (Buchholzer et al., 2022). En estos casos, se ha demostrado que las variedades no tienen ADN foráneo. En la figura 13, se presentan seis ejemplos de variedades convencionales obtenidas a base de CRISPR en Norte América y dos ejemplos en Argentina y Colombia.

Productos mejorados a base de CRISPR considerados convencionales

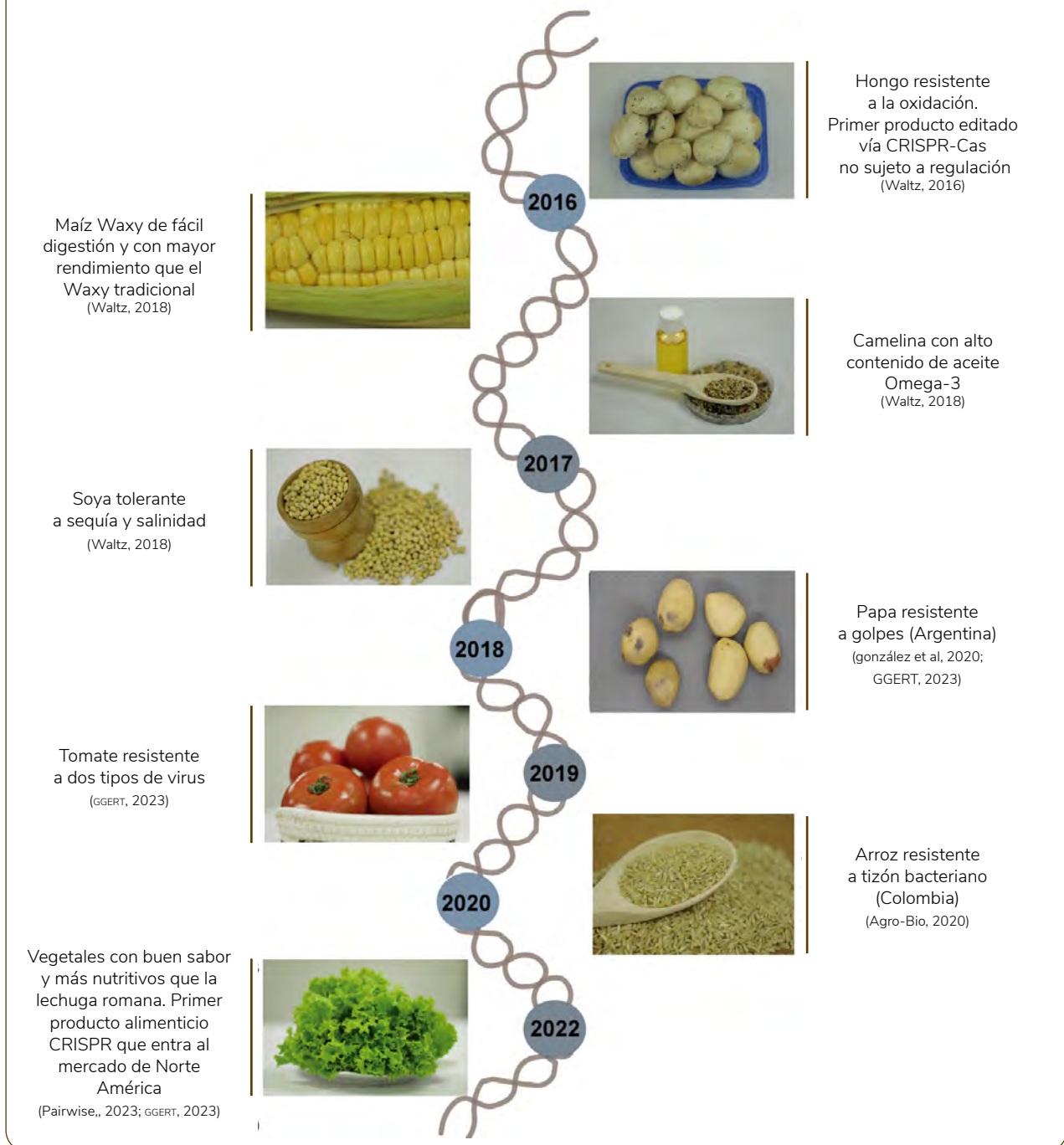


Figura 13. Ejemplos de variedades convencionales obtenidas a base de CRISPR.

Fotos: Franklin Barrios Ortiz

Fuente: AGROSAVIA



¿Qué proyectos CRISPR-Cas desarrollan AGROSAVIA y el INTA en papa?

AGROSAVIA ha venido desarrollando proyectos con dos especies de importancia para Colombia: el arroz (Barrero et al., 2022) y la papa. Para esto, ha usado la técnica de edición de genes CRISPR-Cas, lo cual abre las puertas para mejorar diversos rasgos en estos y otros cultivos. A continuación, nos enfocaremos en el caso de la papa.

Para la papa, AGROSAVIA, en colaboración con el INTA de Argentina y como parte del programa cooperativo para el Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (Fontagro), está llevando a cabo una investigación para reducir la formación de compuestos tóxicos conocidos como acrilamida.

¿Cómo se forma la acrilamida?

El **almacenamiento de los tubérculos** a bajas temperaturas es necesario para reducir la pérdida de agua, el envejecimiento, el brotado y la actividad de los patógenos (Sáenz-Baños et al. 2022). Sin embargo, este proceso afecta la calidad, ya que la sacarosa, a temperaturas más bajas de 10 °C, es convertida por la invertasa vacuolar a glucosa y fructosa (azúcares reductores), que se acumulan en los tubérculos. Este fenómeno se conoce como endulzamiento inducido por frío y altera la calidad de las papas destinadas al procesamiento y al consumo fresco (Datir, 2020).

Durante el fritado para la producción de papas chips o en bastón, los azúcares reductores reaccionan con aminoácidos como la asparagina, que generan pigmentos de color marrón oscuro y compuestos intermedios perjudiciales para la salud, como la acrilamida (Orsák et al., 2022).

¿Cómo se puede reducir la acrilamida por edición de genes?

La **formación de este compuesto tóxico** se puede reducir apagando el gen de la invertasa vacuolar (*InvVac*), que es la responsable de la acumulación de azúcares reductores, mediante el uso de CRISPR-Cas en variedades de interés (figura 14).

En AGROSAVIA, se están haciendo investigaciones respecto a apagar el gen *InvVac* en dos variedades de papa de importancia para Colombia: **Diacol Capiro (R12)** y **Parda Pastusa**. La variedad **Parda Pastusa** se consume en fresco, ya que sus altos niveles de azúcares reductores (0,25 mg/g de peso fresco) no la hacen ideal para su uso en papa frita, pero si estos niveles se reducen, puede tener potencial para el procesamiento. Por su parte, la **Diacol Capiro** es ideal para el procesamiento de papas fritas y en bastón, aunque se ha reportado variación del contenido de azúcares reductores ($\approx 0,1$ mg/g de peso fresco), lo cual limita su rendimiento (Moreno Mendoza, 2000).





Figura 14. Papas chips cuyo proceso de producción puede producir acrilamida.

Foto: Franklin Barrios Ortiz

Actualmente, AGROSAVIA trabaja en la generación del protocolo de edición del gen en estas variedades, usando vector CRISPR-Cas y complejos RNP para obtener plantas libres de ADN foráneo. Hasta el momento se ha logrado aislar protoplastos de las dos variedades y regenerar plantas a partir de estos (figura 15).

Este proceso se realiza con **plántulas in vitro** de la variedad de papa seleccionada. Las hojas se cortan en condiciones estériles y los protoplastos de hojas son aislados usando diferentes químicos. Los componentes para la edición de la planta se introducen en los protoplastos; en este caso, el vector o el complejo RNP. Después de varias semanas, las células se multiplican en el medio adecuado y se obtienen callos. Luego, al medio de crecimiento se le proporcionan los nutrientes y las hormonas para que a partir de los callos se regeneren nuevas plántulas y se promueva el desarrollo de la raíz.

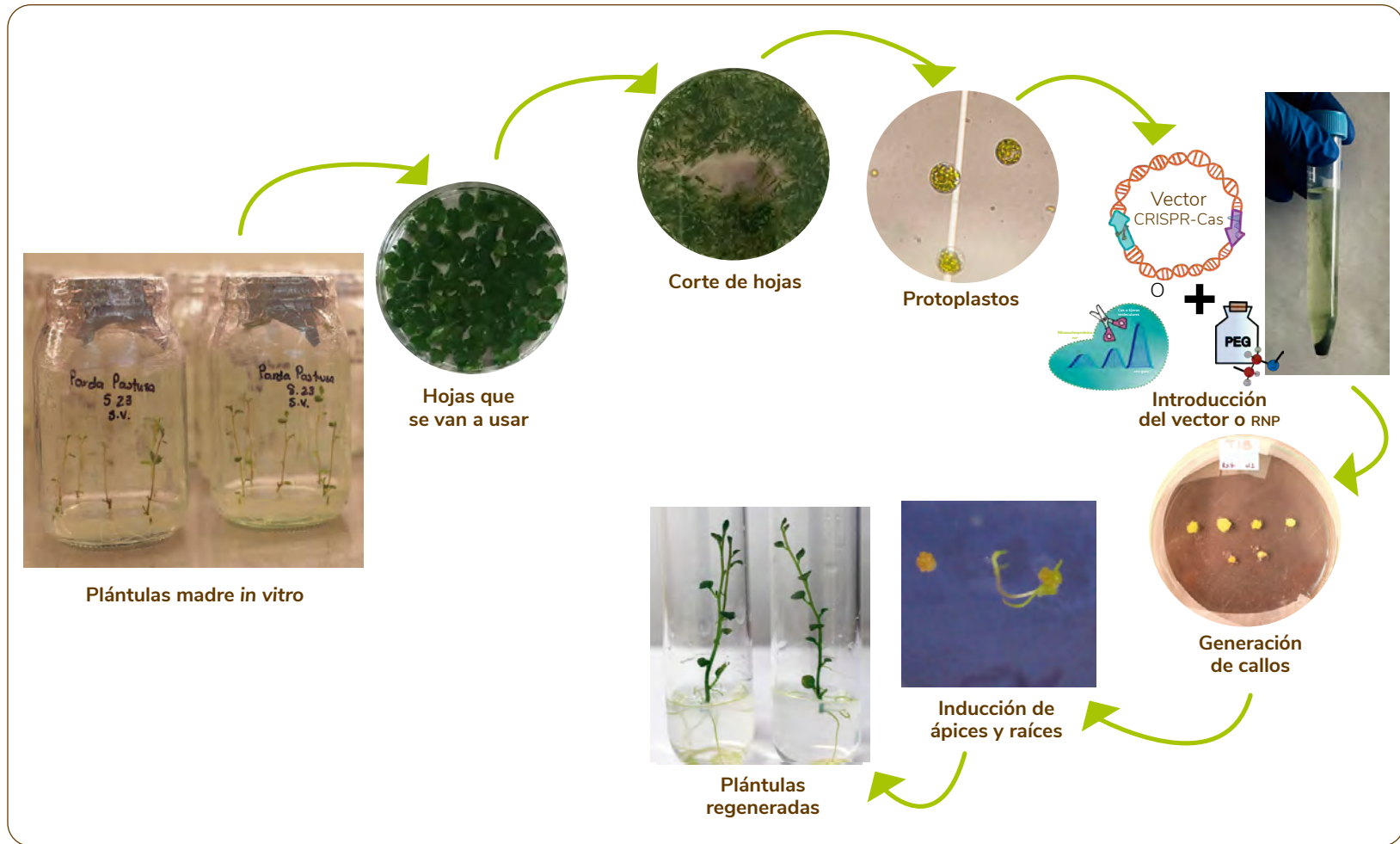


Figura 15. Proceso de aislamiento de protoplastos y regeneración de plantas de papa en AGROSAVIA.

Fuente: Gina Alessandra Garzón-Martínez

AGROSAVIA también está trabajando en la obtención de plantas por medio de este proceso, para luego verificar si en estas se logra apagar el gen *InvVac*; es decir, editarlo. Para esto, se necesita **secuenciar el gen** y verificar plantas editadas positivas, que se desarrollarían hasta la generación de tubérculos en invernadero para realizar pruebas de fritura y medición de azúcares reductores. Las plantas editadas con el rasgo deseado podrían desarrollarse como nuevos cultivares.

¿Sabías que AGROSAVIA está colaborando con el INTA Balcarce de Argentina? El INTA logró obtener una papa Atlantic editada, con el gen *InvVac* apagado.

¡Un gran avance para la Argentina!

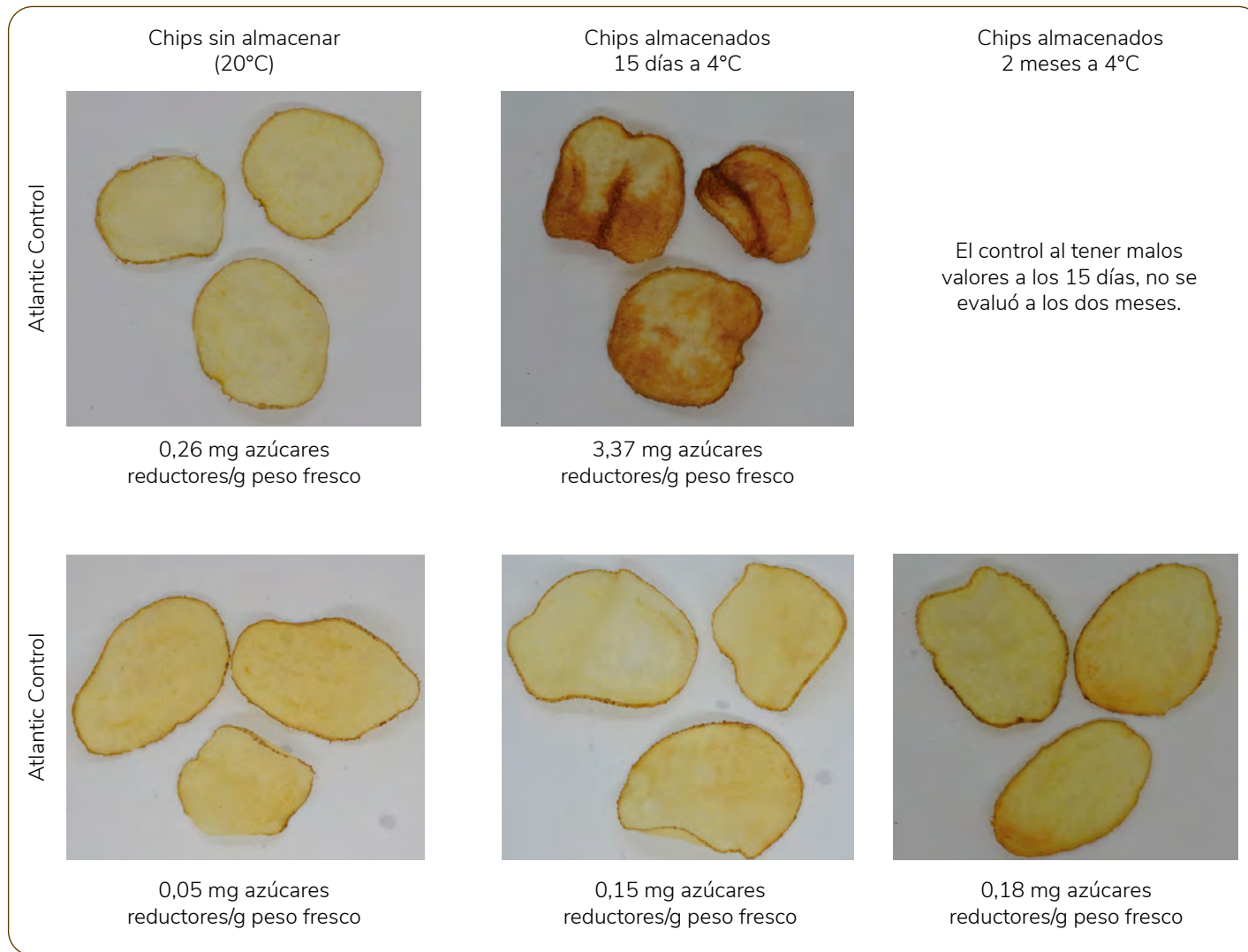


Para lograr lo anterior, el INTA inicialmente generó un **protocolo de regeneración de plantas** a partir de protoplastos de la variedad Atlantic y luego utilizó dos vectores CRISPR-Cas con diferentes combinaciones de ARN guías, que fueron introducidos en protoplastos. A partir de esto, se obtuvieron 70 líneas de Atlantic para una de las combinaciones con un porcentaje de edición del 17 % de las líneas analizadas. En una única línea de Atlantic, la 6A, fue posible apagar completamente el gen *InvVac*.

Se obtuvieron **tubérculos de la línea 6A en invernadero**, que fueron sometidos a diferentes temperaturas y tiempos de almacenamiento; se utilizaron una **carta de colores y un colorímetro** para evaluar el color de las papas chips luego del almacenamiento en frío después del fritado. Ambos métodos mostraron que la línea 6A editada presentó un buen comportamiento después del almacenamiento en frío, en comparación con el control sin editar. En cuanto a la carta de colores, la línea 6A obtuvo un valor promedio de 8,5 (siendo 9 el mejor puntaje), y en el caso del colorímetro, este no presentó diferencias para las papas almacenadas en frío y las almacenadas a 20 °C.

Estos resultados se corroboraron con la **cuantificación de azúcares reductores**, en la cual la línea 6A no aumentó significativamente el contenido de estos luego del almacenamiento en frío (4 °C), mientras que el control acumuló más azúcares reductores en relación con su color oscuro. Lo anterior indica que la línea 6A ha sido editada para el rasgo de interés; es decir, la reducción de azúcares reductores que son precursores de la acrilamida (figura 16).





Nota: La línea editada (Atlantic 6A), luego del almacenamiento en frío y sin coloración oscura, es indicativa de reducción de acrilamida; en comparación, la línea sin editar (Atlantic Control), desarrolla color oscuro, indicativo de acumulación de acrilamida.

Figura 16. Comparación de coloración y acumulación de azúcares reductores en chips de líneas editada y sin editar.

Fuente: Gabriela Massa



Otro rasgo que ha mejorado el INTA en la papa es la **resistencia a golpes por edición génica**; esto quiere decir que si las papas se golpean no generan los típicos moretones subsuperficiales que alteran su calidad.

La **ocurrencia de golpes** durante la cosecha o el transporte activa una enzima denominada polifenol-oxidasa (PPO), la cual oxida un componente del tubérculo; esto se traduce en moretones subsuperficiales que disminuyen el valor nutritivo y económico de la producción. Las plantas tienen muchas PPO. El INTA identificó el gen que funciona principalmente en el tubérculo de la papa y mediante edición génica (CRISPR-Cas) fue inactivado.

El resultado de este trabajo puede verse en la figura 17, que muestra papas sin editar a la izquierda y papas mejoradas por edición a la derecha; ambas papas recibieron golpes de hasta 100 veces la fuerza de gravedad (g) durante cinco minutos. La piel de la papa que se muestra a la derecha indica que los moretones no se producen.



Nota: A la izquierda se ve el control sin editar y a la derecha, la papa mejorada, editada con CRISPR.

Figura 17. Papas editadas para mejorar su resistencia a los golpes.

Foto: Sergio Feingold

Conclusiones y perspectivas

La tecnología CRISPR-Cas se utiliza en diversos países para mejorar los cultivos de plantas y para muchas otras aplicaciones en agricultura, medicina e industria. Varios países a nivel mundial, incluyendo Colombia y Argentina, consideran que las variedades editadas son convencionales cuando se demuestra que no contienen ADN foráneo (ver anexo).

Los estudios de caso en papa ilustrados en Colombia y Argentina son un ejemplo de las diversas aplicaciones de la tecnología para contribuir al desarrollo de la agricultura. **CRISPR-Cas es una tecnología innovadora**, precisa y de corto tiempo, que se puede usar sola o combinada con otros métodos de mejoramiento.

¿Revolucionará la agricultura? Es una pregunta que nos hacemos todos. El desarrollo de variedades mejoradas usando CRISPR-Cas, que aporten a la sostenibilidad ambiental, seguridad alimentaria y nutricional, beneficiará a los agricultores y consumidores a nivel mundial. Mediante esta tecnología, es posible reducir la inversión económica por parte de los pequeños agricultores en plaguicidas y fertilizantes, lo cual disminuye los costos de producción y los efectos adversos al medio ambiente, y asegura la inocuidad de los alimentos al consumidor. Además, su potencial para el desarrollo de cultivos con mayores rendimientos, que se adapten a eventos extremos a causa del cambio climático, puede ayudar a reducir la expansión agrícola y, por ende, la conservación de la biodiversidad y el retorno económico a los pequeños agricultores.

Anexo. Estado regulatorio de países del mundo en relación con cultivos editados genéticamente

País/región	Regulación
Australia	Sin restricciones
Canada	Sin restricciones
Chile	Sin restricciones
Costa Rica	Sin restricciones
Estados Unidos	Sin restricciones
Filipinas	Sin restricciones
Israel	Sin restricciones
Japón	Sin restricciones
Argentina	Aprovado caso por caso
Bangladés	Aprovado caso por caso
Brasil	Aprovado caso por caso
China	Aprovado caso por caso
Colombia	Aprovado caso por caso
Ecuador	Aprovado caso por caso
Gana	Aprovado caso por caso
Honduras	Aprovado caso por caso
India	Aprovado caso por caso
Indonesia	Aprovado caso por caso
Kenia	Aprovado caso por caso
Malauí	Aprovado caso por caso
Nigeria	Aprovado caso por caso
Pakistan	Aprovado caso por caso
Paraguay	Aprovado caso por caso
Uruguay	Aprovado caso por caso
Corea del Sur	En debate, posible aprobación



País/región	Regulación
Cuba	En debate, posible aprobación
El Salvador	En debate, posible aprobación
Guatemala	En debate, posible aprobación
Noruega	En debate, posible aprobación
Reino Unido	En debate, posible aprobación
Sudáfrica	En debate, posible aprobación
Suiza	En debate, posible aprobación
Unión Europea	En debate, posible aprobación
Bolivia	Prohibido o restringido
México	Prohibido o restringido
Nueva Zelanda	Prohibido o restringido
Perú	Prohibido o restringido
Rusia	Futuro regulatorio incierto

Fuente: Buchholzer y Frommer (2022) y GGERT (2024)



Sin lugar a dudas, no debemos desconocer el gran número de alcances y el uso creciente de la tecnología; por el contrario, la debemos aprovechar para mejorar la calidad, la inocuidad, la tolerancia a estreses bióticos y abióticos, y otros rasgos de interés para la agricultura moderna.

Dada su relativamente reciente incursión en el mundo, aún hay desafíos de percepción, diseminación a la sociedad y propiedad intelectual que deben ser abordados, con el fin de asegurar el buen uso e impacto de la tecnología en escenarios de inocuidad, seguridad alimentaria y cambio climático.



Referencias

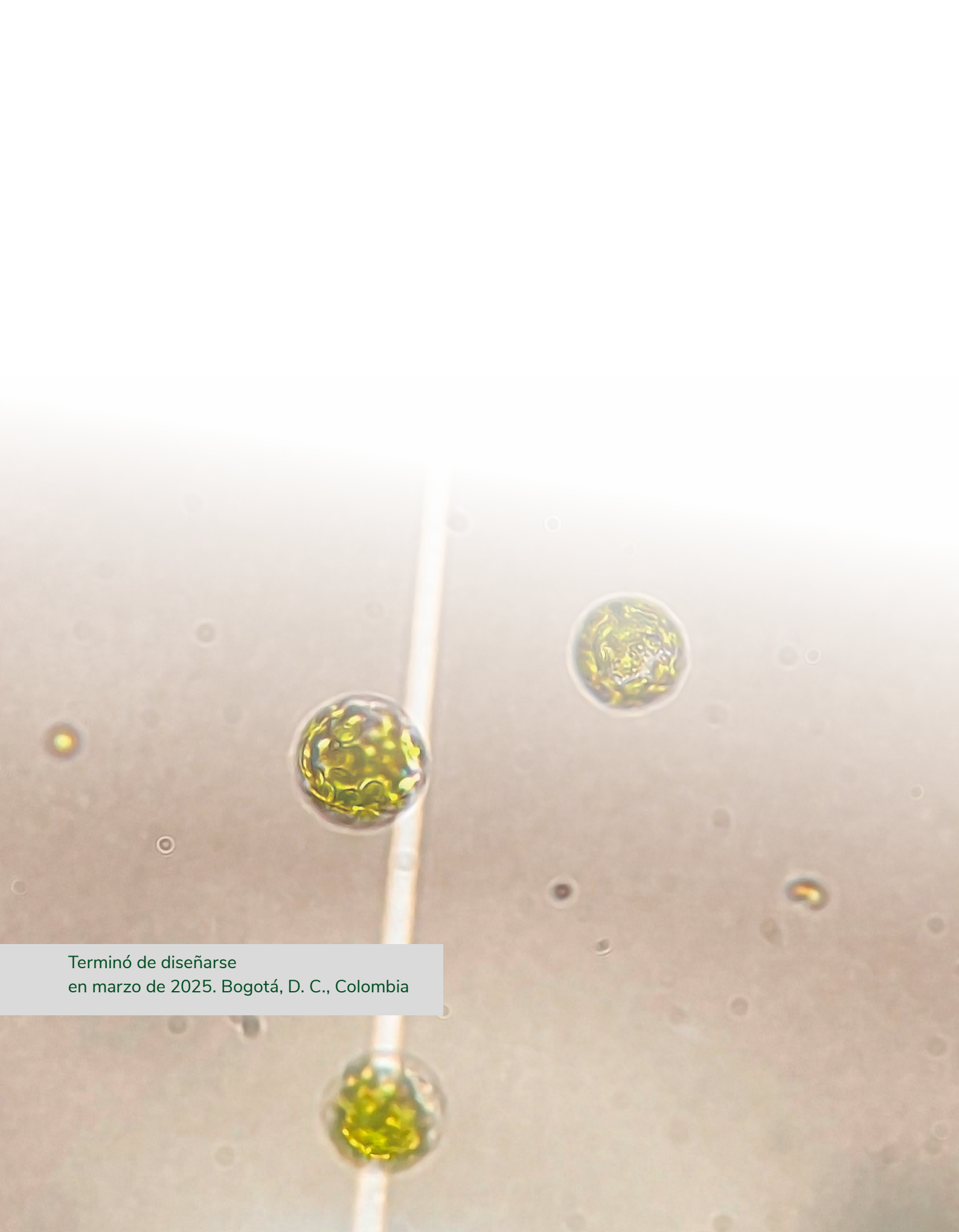
- Agro-Bio. (2020). (2020 de septiembre). Arroz editado genéticamente obtiene luz verde en EEUU y Colombia. <https://agrobio.org/noticias/arroz-editado-geneticamente-obtiene-luz-verde-en-eeuu-y-colombia>
- Barrero, L. S., Willmann, M. R., Craft, E. J., Akther, K. M., Harrington, S. E., Garzón-Martínez, G. A., Glahn, R. P., Piñeros, M. A., & McCouch, S. R. (2022). Identifying genes associated with abiotic stress tolerance suitable for CRISPR/Cas9 editing in upland rice cultivars adapted to acid soils. *Plant Direct*, 6(12), e469 <https://doi.org/10.1002/pld3.469>
- Bastidas Pérez, S., Reyes Cuesta, R., Tolosa Montaña, W., Montero, Y. D., Gutiérrez-Berdugo, I. A., Arenas-Rubio, I., Moreno, L. P., & Arizala, M. J. (2020). *Híbrido interespecífico O×G Corpoica Elmira de palma de aceite: una alternativa de producción para zonas afectadas por pudrición del cogollo*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.brochure.7403800>
- Brown, B. (2023). *Pairwise Introduces Conscious™ Greens into U.S. Restaurants*. <https://www.pairwise.com/news/pairwise-introduces-conscious-greens-into-u.s.-restaurants>
- Buchholzer, M., & Frommer, W. B. (2022). An increasing number of countries regulate genome editing in crops. *New Phytologist*, 237(1), 12-15. <https://doi.org/10.1111/nph.18333>

- Datir, S. S. (2020). Invertase inhibitors in potato: towards a biochemical and molecular understanding of cold-induced sweetening. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(22), 3804-3818. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1808876>
- Global Gene Editing Regulation Tracker [GGERT]. (2023). Gene-edited crops are regulated as conventional plants with minimal restrictions and no necessary safety assessment. <https://crispr-gene-editing-regs-tracker.geneticliteracyproject.org/united-states-crops-food/#:~:text=To%20date%20three%20gene%2Dedited,bitter%20version%20of%20mustard%20greens>
- Global Gene Editing Regulation Tracker [GGERT]. (2024). *Gene Editing and New Breeding Techniques: Regulations, Ratings and Index*. <https://crispr-gene-editing-regs-tracker.geneticliteracyproject.org/#jet-tabs-control-1401>
- González, M. N., Massa, G. A., Andersson, M., Turesson, H., Olsson, N., Fält, A. S., Storani, L., Décima Oneto, C. A., Hofvander, P., & Feingold, S. E. (2020). Reduced Enzymatic Browning in Potato Tubers by Specific Editing of a Polyphenol Oxidase Gene via Ribonucleoprotein Complexes Delivery of the CRISPR/Cas9 System. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1649. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01649>
- Graham, N., Patil, G. B., Bubeck, D. M., Dobert, R. C., Glenn, K. C., Gutsche, A. T., Kumar, S., Lindbo, J. A., Maas, L., May, G. D., Vega-Sanchez, M. E., Stupar, R. M., & Morrell, P. L. (2020). Plant Genome Editing and the Relevance of Off-Target Changes. *Plant Physiology*, 183(4), 1453-1471. <https://doi.org/10.1104/pp.19.01194>
- Hardee, D. D., Van Duyn, J. W., Layton, M. B., & Bagwell, R. D. (2000). *Bt Cotton & Management of the Tobacco Budworm-Bollworm Complex*. U. S. Department of Agriculture; Agricultural Research Service.
- Moreno Mendoza, J. D. (2000). *Varietades de papas cultivadas en Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/1633>
- Núñez Zarrantes, V. M., Sánchez Betancourt, E. P., Mayorga Cubillos, F. G., Gómez Gil, L. F., & Navas Arboleda, A. A. (2016). *Corpoica Andina: variedad de uchuva para Boyacá, Cundinamarca, Antioquia y Nariño*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/11528>



- Orsák, M., Kotikova, Z., Podhorecká, K., Lachman, J., & Kasal, P. (2022). Acrylamide formation in red-, purple-and yellow-fleshed potatoes by frying and baking. *Journal of Food Composition and Analysis*, 110, 104529. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104529>
- Sáenz-Baños, M., Latorre-Biel, J. I., Martínez-Cámara, E., Jiménez-Macías, E., Longo, F., & Blanco-Fernández, J. (2022). Methodology for energy demand reduction of potato cold storage process. *Journal of Food Process Engineering*, 45(10), e14127. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14127>
- Waltz, E. (2016). Gene-edited CRISPR mushroom escapes US regulation. *Nature*, 532(7599), 293. <https://doi.org/10.1038/nature.2016.19754>
- Waltz, E. (2018). With a free pass, CRISPR-edited plants reach market in record time. *Nature Biotechnology*, 36(1), 6-7. <https://doi.org/10.1038/nbt0118-6b>





Terminó de diseñarse
en marzo de 2025. Bogotá, D. C., Colombia

La presente cartilla explica de manera sencilla la edición de genes en plantas para la alimentación y la agricultura, con énfasis en la tecnología CRISPR-Cas, el método más utilizado actualmente. Se describen los conceptos generales, los componentes necesarios y el proceso, desde la regeneración de plantas hasta la introducción de los elementos de edición en las plantas. También aborda las ventajas de la edición de genes frente a otros métodos de mejoramiento, como su precisión para generar cultivos con mejores características. Además, se presentan ejemplos de aplicaciones en cultivos del continente americano, resaltando su impacto en la mejora de la calidad nutricional de la papa en Colombia y Argentina. En este contexto, se destaca el proyecto desarrollado por AGROSAVIA y el INTA, financiado por Fontagro, el cual lidera iniciativas en edición génica de papa con fines de mejorar su calidad nutricional e industrial. Esta guía busca acercar la ciencia a diferentes audiencias y mostrar cómo la edición de genes está revolucionando la agricultura moderna con visión de desarrollo de cultivos más productivos y adaptados a los desafíos y las oportunidades actuales de producción y calidad de alimentos, para optimizar la agricultura en América Latina, con beneficios para productores y consumidores.



correo: bac@agrosavia.co
teléfono: (57 1) 422 73 00 ext. 1257 o 1274

Distribución gratuita
Prohibida su venta

AGROSAVIA

Corporación colombiana de investigación agropecuaria

Centro de Investigación Tibaitatá.
Km 14 vía Mosquera-Bogotá, Cundinamarca.
Código postal 250047, Colombia.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co