

TRANSGÉNICOS

GRANDES BENEFICIOS,
AUSENCIA DE DAÑOS
Y MITOS

COORDINADOR
FRANCISCO GONZALO BOLÍVAR ZAPATA

COMITÉ DE BIOTECNOLOGÍA
ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS



Instituto de Biotecnología
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



El Colegio Nacional

TRANSGÉNICOS

GRANDES BENEFICIOS, AUSENCIA DE DAÑOS Y MITOS

COORDINADOR

FRANCISCO GONZALO BOLÍVAR ZAPATA

MIEMBROS DEL COMITÉ DE BIOTECNOLOGÍA
DE LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS
QUE COLABORARON EN ESTA PUBLICACIÓN

CARLOS FEDERICO ARIAS ORTIZ, MARIO ALBERTO ARTEAGA VÁZQUEZ,
HUGO ALBERTO BARRERA SALDAÑA, ENRIQUE GALINDO FENTANES, ADOLFO GRACIA GASCA,
LUIS RAFAEL HERRERA ESTRELLA, INOCENCIO HIGUERA CIAPARA, FRANCISCO ALFONSO LARQUÉ SAAVEDRA,
AGUSTÍN LÓPEZ-MUNGUÍA CANALES, OCTAVIO TONATIUH RAMÍREZ REIVICH, SERGIO REVAH MOISEEV,
XAVIER SOBERÓN MAINERO, IRINEO TORRES PACHECO, JAIME MIGUEL URIBE DE LA MORA,
JORGE MANUEL VÁZQUEZ RAMOS, GUSTAVO VINIEGRA GONZÁLEZ





ÍNDICE

TRANSGÉNICOS: GRANDES BENEFICIOS, AUSENCIA DE DAÑOS Y MITOS

PRESENTACIÓN Y DECLARACIÓN SOBRE LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS
O GENÉTICAMENTE MODIFICADOS Y SUS GRANDES BENEFICIOS 11

MIEMBROS DEL COMITÉ DE BIOTECNOLOGÍA DE LA ACADEMIA MEXICANA
DE CIENCIAS QUE COLABORARON EN ESTA PUBLICACIÓN 21

PRESENTATION AND DECLARATION ON TRANSGENIC OR GENETICALLY
MODIFIED ORGANISMS AND THEIR ENORMOUS ADVANTAGES 23

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN 31

- PRESENTACIÓN DE MOTIVOS
- CONSIDERACIONES GENERALES
- RESÚMENES DE LOS CONTENIDOS DE LOS CAPÍTULOS DEL LIBRO

CAPÍTULO II
BIOTECNOLOGÍA MODERNA: USO RESPONSABLE Y SUSTENTABLE
DE LA BIODIVERSIDAD 51

- ADN, GENES Y PROTEÍNAS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA CÉLULA VIVA
- ORGANISMOS TRANSGÉNICOS Y NUEVAS TÉCNICAS DE EDICIÓN DE ADN
PARA DESARROLLAR LAS SIGUIENTES GENERACIONES
- JUSTIFICACIÓN, PROPÓSITO Y AMPLIOS BENEFICIOS EN VARIOS SECTORES

CAPÍTULO III
DOCUMENTOS RELEVANTES A FAVOR DE LOS TRANSGÉNICOS
Y LA BIOTECNOLOGÍA 107

- DECLARACIONES DE DOS GRUPOS DE PREMIOS NOBEL
- REPORTES DE ACADEMIAS DE CIENCIAS Y MEDICINA DE DIFERENTES PAÍSES

CAPÍTULO IV
AUSENCIA DE DAÑO POR EL CONSUMO DE PRODUCTOS TRANSGÉNICOS
COMO ALIMENTO EN HUMANOS Y ANIMALES 125

- LOS ALIMENTOS TRANSGÉNICOS SON INOCUOS
- ANÁLISIS DEL TRABAJO DE SÉRALINI *ET AL.* 2012
- DECISIONES DE AGENCIAS RESPONSABLES DE LA SEGURIDAD ALIMENTARIA

Coordinación general: Enrique Sánchez

Coordinación editorial: Ana Ezcurra

Cuidado editorial: Saúl Peña

Diseño: Juan Carlos Burgoa

DR © 2017, Academia Mexicana de Ciencias A.C.

km 23.5 Carretera Federal México - Cuernavaca

Calle Cipreses s/n, Col. San Andrés Totoltepec

C.P. 14400 Tlalpan, Ciudad de México, México

aic@unam.mx

www.amc.mx

ISBN: 978-607-8379-28-6

Esta publicación y su versión electrónica pueden consultarse en:

www.amc.mx/transgenicos

Esta publicación fue posible gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Academia Mexicana de Ciencias, la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Biotecnología y El Colegio Nacional.

CAPÍTULO V		ANEXO 1	
EFFECTOS BENÉFICOS EN LA AGRICULTURA, EL MEDIO AMBIENTE, LA BIODIVERSIDAD Y LA SALUD POR EL USO DE PLANTAS TRANSGÉNICAS, TAMBIÉN VENTAJAS ECONÓMICAS	155	GLOSARIO	355
CAPÍTULO VI		ANEXO 2	
PUBLICACIONES Y CONSIDERACIONES EN CONTRA DE LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS POR SUPUESTOS DAÑOS	173	LISTADO DE EVENTOS RELEVANTES VINCULADOS CON LA BIOTECNOLOGÍA	421
• RESPUESTAS Y CONSIDERACIONES QUE SUSTENTAN SU UTILIZACIÓN		ANEXO 3	
CAPÍTULO VII		20 PREGUNTAS SOBRE LOS ALIMENTOS GENÉTICAMENTE MODIFICADOS (GM) DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD	427
OPINIÓN PÚBLICA SOBRE TRANSGÉNICOS Y BIOTECNOLOGÍA	227	ANEXO 4	
• MOTIVOS DETRÁS DEL RECHAZO AL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO Y A LA TECNOLOGÍA DERIVADA		LISTADO DE 123 GALARDONADOS CON EL PREMIO NOBEL QUE FIRMARON LA DECLARACIÓN SOBRE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN, EN FAVOR DE LOS OGM	437
• OFENSIVA EN CONTRA DE LA CIENCIA		ANEXO 5	
CAPÍTULO VIII		LISTADO DE 25 GALARDONADOS CON EL PREMIO NOBEL QUE FIRMARON LA DECLARACIÓN DE AGBIOWORLD EN APOYO A LA BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA	441
DESARROLLO NACIONAL	237	ANEXO 6	
• LA BIOTECNOLOGÍA Y LAS PLANTAS TRANSGÉNICAS MEXICANAS COMO PARTE INDISPENSABLE DE UNA ESTRATEGIA EN MÉXICO PARA COADYUVAR EN LA SUSTENTABILIDAD ALIMENTARIA Y DEL MEDIO AMBIENTE		LISTADO DE REFERENCIAS DEL ARTÍCULO DE RICROCH, 2013	443
• LA SITUACIÓN DE LA PROPIEDAD COMERCIAL DE LAS SEMILLAS TRANSGÉNICAS		ANEXO 7	
CAPÍTULO IX		LISTADO DE REFERENCIAS DEL ARTÍCULO DE RICROCH <i>ET AL.</i> , 2014	449
LA TRANSGÉNESIS: UN PROCESO NATURAL QUE OCURRE EN LA BIOTA	251	ANEXO 8	
• CREACIÓN DE TRANSGÉNICOS MEDIANTE PROCESOS DE TRANSFERENCIA HORIZONTAL DE ADN Y POSTERIOR REORGANIZACIÓN DEL GENOMA, SIMILARES A LOS PROCESOS NATURALES QUE OCURREN POR LA TRANSGÉNESIS		DOCUMENTO ENVIADO POR LAS ACADEMIAS FRANCESAS DE CIENCIAS SOBRE EL ARTÍCULO DE SÉRALINI <i>ET AL.</i> , 2012	457
• INOCUIDAD Y BAJO RIESGO DE LOS TRANSGÉNICOS		ANEXO 9	
CAPÍTULO X		CONSIDERACIONES A LOS SEÑALAMIENTOS MÁS IMPORTANTES EN CONTRA DE LOS TRANSGÉNICOS	463
USO Y APLICACIÓN RESPONSABLE DE LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS	291	ANEXO 10	
• MARCO JURÍDICO Y CONSIDERACIONES ADICIONALES DE ORGANIZACIONES E INSTANCIAS SOBRE LOS TRANSGÉNICOS		LISTADO SIMPLIFICADO DE BENEFICIOS DE LOS TRANSGÉNICOS	465
CAPÍTULO XI		AGRADECIMIENTOS Y NOTAS ACLARATORIAS	469
CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES FINALES	329	SEMBLANZAS DE LOS COAUTORES	479
• AMPLIA EVIDENCIA CIENTÍFICA Y TÉCNICA QUE SUSTENTA LA AUSENCIA DE DAÑOS A LA SALUD, AL MEDIO AMBIENTE Y A LA BIODIVERSIDAD POR EL USO RESPONSABLE DE TRANSGÉNICOS			
• GRANDES BENEFICIOS EN DIFERENTES SECTORES			





PRESENTACIÓN Y DECLARACIÓN SOBRE LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS O GENÉTICAMENTE MODIFICADOS Y SUS GRANDES BENEFICIOS

La ciencia es una actividad intrínsecamente arraigada al espíritu inquisitivo del ser humano y ha sido parte fundamental de la cultura de todos los pueblos. La ciencia busca generar conocimiento sobre el universo y la naturaleza, incluida nuestra especie, para conocer más y entendernos mejor. En las últimas décadas hemos sido testigos de un avance extraordinario del conocimiento científico, lo cual ha permitido profundizar de manera permanente en la comprensión del universo, la naturaleza y la sociedad humana. Además, este conocimiento científico es el sustento de una tecnología efectiva, responsable y sustentable que se utiliza para contender con las necesidades y los problemas que la sociedad y el planeta enfrentan.

La biotecnología es una actividad multidisciplinaria que contribuye al estudio y a la caracterización de los organismos vivos, y pretende su utilización respetuosa y sustentable.

Está basada en el conocimiento de disciplinas más tradicionales, como la microbiología, la genética, la bioquímica, la ingeniería bioquímica, y de algunas otras más recientes, como las ciencias ómicas y la bioinformática. A partir del conocimiento multidisciplinario de la célula viva que integra todos los organismos vivos y en particular de su material genético —el ADN, que incluye todos los genes en los seres vivos— la biotecnología ha contribuido a satisfacer demandas y a resolver problemas relevantes en diversos sectores, como el de la salud, el agropecuario, el industrial, el energético y el medioambiental.

Mediante las metodologías modernas de la ingeniería genética, de la genómica y de técnicas para amplificar el ADN, hoy es posible sintetizar o aislar genes de cualquier organismo vivo, que son fragmentos específicos de las moléculas de ADN que integran los cromoso-

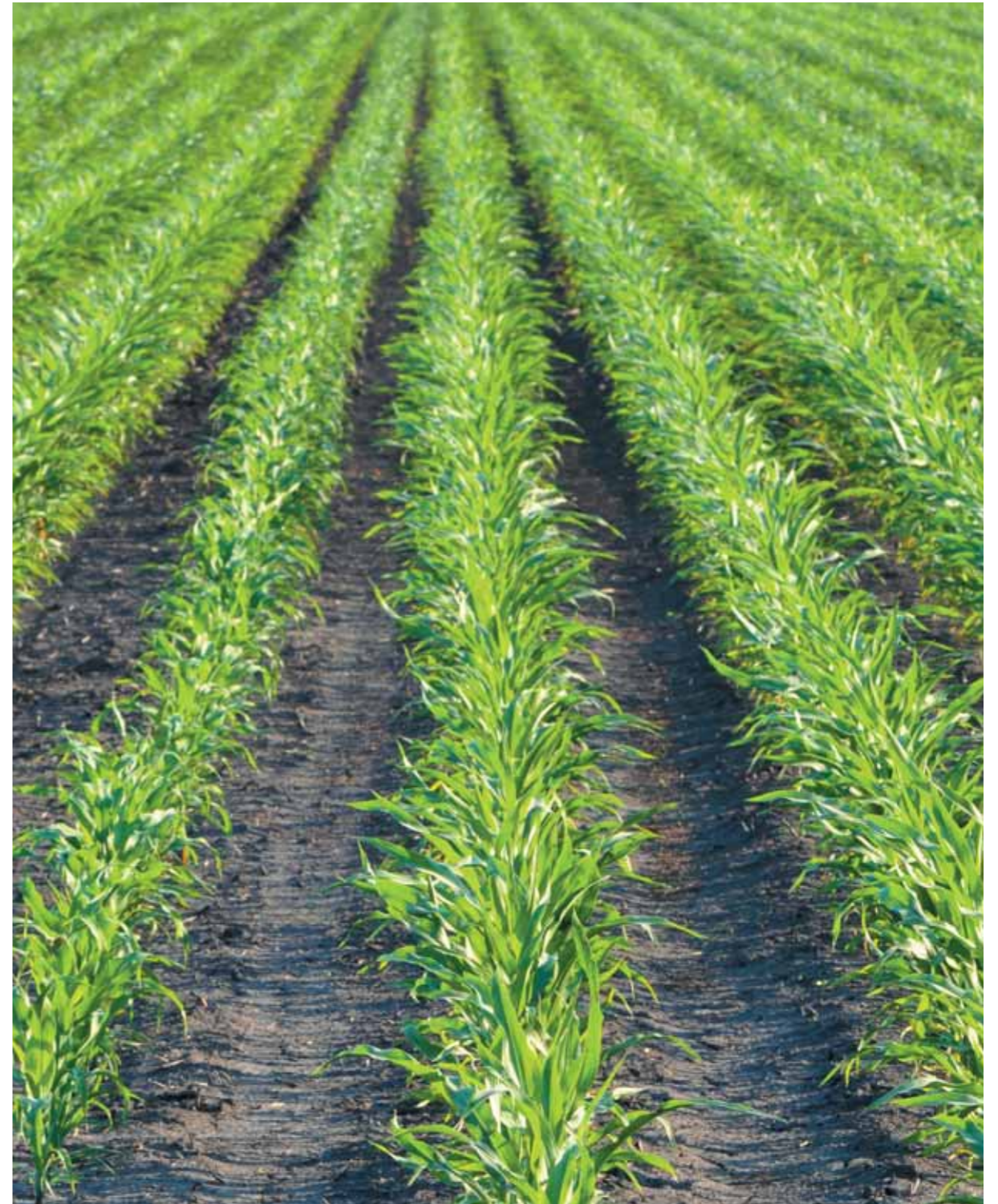
mas de los seres vivos. Actualmente es viable transferir cualquier gene, independientemente del origen, a otros organismos, mediante diferentes técnicas o metodologías, principalmente las de la ingeniería genética. Todas estas técnicas involucran la transferencia horizontal del ADN y su posterior reorganización con el genoma de la célula receptora. De esta manera, el material genético proveniente de otro origen, el llamado transgén, se incorpora al organismo receptor, construyéndose así los organismos genéticamente modificados (OGM) o *transgénicos*, porque incluyen genes de otros orígenes. El propósito es incorporar nuevas y mejores capacidades en las células modificadas que residen en los genes transferidos. En casos excepcionales se han transferido fragmentos de ADN de otro origen —por eso es transgénico— que no son genes, pero que permiten al organismo receptor nuevas capacidades. Estas técnicas permiten desarrollar mejores y más precisos sistemas biológicos, así como una biotecnología amigable, respetuosa con el medio ambiente, capaz de atender responsablemente necesidades en torno a la producción de nuevos medicamentos y de alimentos seguros, sin perder de vista la protección de los ecosistemas, muchas de las cuales no se podrían haber atendido con la aplicación de otras tecnologías.

Elaborado por 17 miembros del Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), de diferentes instituciones, expertos en diversas disciplinas —entre ellos, siete premios Nacional de Ciencias—, este libro presenta las razones por las que los organismos transgénicos representan una de las herramien-

tas más importantes y mejor caracterizadas de la biotecnología moderna para coadyuvar en la solución sustentable de distintos problemas y demandas de la población a nivel mundial y de la contaminación ambiental del planeta.

Esta publicación se basa en el libro *Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados*, publicado por la AMC en el año 2011. Actualiza los capítulos originales e incluye seis nuevos que presentan información y análisis derivados de seis años adicionales de compilar evidencia científica que sustenta la ausencia del supuesto daño ocasionado por el uso y el consumo de los OGM y, por el otro lado, expone los importantes beneficios económicos, ecológicos y sociales derivados de la utilización responsable y sustentable de estos organismos y sus productos.

El presente documento expone también un conjunto amplio e importante de evidencia científica mediante la cual este grupo de expertos sustenta que los transgénicos, por ser organismos vivos creados por procesos de transferencia horizontal de ADN y reorganización del genoma —similares a los procesos que ocurren en la naturaleza— son organismos con niveles de riesgo parecidos a los que ya existen en los procesos naturales de la biota. Además, el ser humano ha utilizado la domesticación y el mejoramiento genético de las plantas y los animales durante los últimos 8,000–10,000 años, y las plantas transgénicas que se usan en el campo implican una tecnología perfeccionada, también llamada “agricultura de precisión”, más avanzada, más segura y precisa que las anteriores. Esta tecnología ha permitido reducir los tiempos y la incertidumbre en la creación de



los nuevos cultivares en beneficio de la sociedad y de la sustentabilidad de los ecosistemas y el medio ambiente

Uno de los propósitos de este libro es señalar que la transgénesis es un fenómeno natural que ha ocurrido desde el origen de la vida y seguirá ocurriendo en la biodiversidad, independientemente de los organismos genéticamente modificados. Es un fenómeno que implica la transferencia horizontal de ADN y la reorganización del genoma en la célula receptora. A lo largo del tiempo, la transgénesis ha sido responsable de la adquisición de muchas funciones nuevas, en particular en las plantas, como los genes responsables de la fotosíntesis, originados en las bacterias fotosintéticas primitivas. En alguna medida, la transgénesis también ha sido responsable de la evolución de las especies. Se señala que la razón más importante que permite esta capacidad es que la estructura general de la molécula de doble hélice del ADN es la misma en todos los organismos vivos y esto permite la recombinación del ADN transferido de manera horizontal, de cualquier origen, con el material genético de la célula receptora. Sin embargo, es importante señalar que los actuales organismos vivos han desarrollado mecanismos que permiten contener con, y posteriormente eliminar, los ADN de origen foráneo o heterólogo que pudieran llegar a la célula por transferencia horizontal de ADN, como los provenientes por infecciones virales. Por lo anterior, la transgénesis es un fenómeno que ha ocurrido a lo largo del tiempo, y aunque hoy es poco frecuente, sigue ocurriendo, en particular mediado por infecciones de ciertos virus que pueden incorporar su material genético

a los cromosomas de las células que infectan, como los retrovirus, y también mediado por ciertas bacterias —como la *Agrobacterium tumefaciens*— que pueden transferir parte de su material genético por transferencia horizontal a las células de la gran mayoría de las especies vegetales y otros organismos como los hongos. Los transgénicos son construidos por técnicas que implican la transferencia horizontal de ADN siguiendo el ejemplo de la transgénesis.

Asimismo, el texto incluye un análisis del marco jurídico que existe en México y que norma el uso responsable y justificado de los OGM para atender diferentes problemáticas y demandas. Dicho marco jurídico incluye el Protocolo de Cartagena y la Ley de Bioseguridad de OGM.

El Comité de Biotecnología de la AMC señala y enfatiza que los OGM aprobados, así como sus productos, utilizados actualmente como alimentos o medicamentos, han sido sujetos a numerosos análisis y evaluaciones que han demostrado que no generan daño a la salud humana ni animal, así como tampoco a la biodiversidad o al medio ambiente. Se destaca el hecho de que la Organización Mundial de la Salud y las autoridades y agencias gubernamentales responsables de la aprobación y el uso de los OGM en un importante número de países, incluyendo México, Estados Unidos y la Unión Europea, no han retirado ningún cultivar transgénico o sus productos de los que actualmente existen en el mercado, aunque se han cuestionado y reevaluado sin cambiar su autorización. Las plantas transgénicas que se usan en la actualidad, son consideradas equivalentes a las tradicionales y, por sus benefi-

cios, se siguen utilizando en todo el mundo y cada vez con mayor frecuencia.

El Comité de Biotecnología agradece al Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi, presidente de la AMC, así como a varios expresidentes, el apoyo brindado para la elaboración de este libro, cuyo propósito es presentar de manera sencilla y objetiva la amplia información disponible sobre los OGM a la opinión pública, a la sociedad en general, a los legisladores, y a los funcionarios y profesionales de las secretarías de Economía, Salud, Agricultura y Medio Ambiente, entre otras, con el fin de que las decisiones y resoluciones que se tomen en torno al uso de organismos transgénicos y sus productos se sustenten en la amplia y contundente evidencia científica documentada y verificable que aquí presentamos. Por otro lado, este libro y los análisis que retoma, señalan los amplios beneficios y la ausencia de daño reportado por el uso de los transgénicos. Dada la relevancia de la presente publicación, así como de otros textos relacionados, en la página de la AMC pueden consultarse estos documentos de manera gratuita. Igualmente agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) el apoyo a la AMC y el de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para la edición de esta obra.

A continuación se presentan los puntos que conforman la declaración sobre los organismos transgénicos, sus beneficios y la ausencia de daño a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad por su utilización, con el propósito de orientar y sustentar la discusión en esta materia:

- La biotecnología y los transgénicos usados responsablemente no representan

daño alguno a la salud, a la biodiversidad ni al medio ambiente. Los organismos transgénicos son construidos por técnicas de transferencia horizontal de ADN y reorganización del genoma de la célula receptora, siguiendo los ejemplos de la transgénesis que ha ocurrido y ocurre en la biota, y por ello, son organismos de bajo riesgo. Representan una oportunidad y una herramienta muy poderosa para dar valor agregado a los productos naturales, apoyando así la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad mexicana, una de nuestras mayores riquezas. Desde hace 20 años las plantas transgénicas contribuyen a la conservación de insectos benéficos no plaga, dado que los insecticidas químicos que son inespecíficos y eliminan todo tipo de insectos, ya no se utilizan en el campo cuando se siembran los cultivos transgénicos.

- La biotecnología se utiliza para coadyuvar a resolver y atender responsable y sustentablemente problemas, demandas globales y nacionales a las que nos enfrentamos en este siglo. En el sector farmacéutico, la biotecnología moderna y los transgénicos hoy permiten producir buena parte de nuestros medicamentos modernos (incluyendo cerca de 100 medicamentos y vacunas de origen transgénico disponibles en las farmacias), mientras que decenas de plantas de consumo básico y de ingredientes alimentarios son de origen transgénico. Uno de los ejemplos más notables e importantes de plantas transgénicas de primera generación son las variedades re-

sistentes a plagas de insectos, diseñadas para contender simultáneamente con las plagas y la reducción en la aplicación de insecticidas químicos. Este objetivo se ha alcanzado ya de manera significativa con el uso de diferentes cultivos transgénicos en varios países con un gran beneficio para el medio ambiente, ya que muchos insecticidas químicos contaminan, en mayor o menor medida, nuestro planeta. El uso de las plantas transgénicas implica ya avances importantes en el propósito de la producción sustentable de alimentos y en la lucha contra la contaminación del medio ambiente. De hecho, de manera indirecta, la reducción en el uso de los insecticidas químicos también ha permitido una disminución de gases con efecto invernadero. Lamentablemente los insecticidas químicos sintéticos se siguen usando en muchos lugares en detrimento del medio ambiente y la salud, ya que algunos causan cáncer o incrementan ese riesgo con su utilización. Una aplicación posterior de los OGM, también con ventajas ambientales, fue el diseño de plantas transgénicas de segunda generación resistentes a plagas de insectos, y además a herbicidas químicos, como el glifosato, que se utilizan para controlar las malezas o hierbas malas que evitan la labranza. Los cultivares transgénicos se utilizan en el mundo como parte de una estrategia inteligente y responsable, para avanzar en la producción sustentable de alimentos. Cada vez más, los cultivares transgénicos desempeñan un papel irremplazable para contender con los graves

problemas causados por la contaminación del medio ambiente y otros tantos que surgirán por el cambio climático. Esto será posible mediante el uso de nuevas variedades con propiedades extraordinarias de tercera generación, algunas ya desarrolladas en México, de cultivares transgénicos que son resistentes al calor y a la sequía, y otras variedades que pueden crecer en fosfito en vez de fosfato como fertilizante, a diferencia de las malezas. Los organismos transgénicos de siguientes generaciones se construirán mediante las nuevas y poderosas técnicas de edición fina del ADN (tipo CRISPR-Cas9), que permiten insertar el material genético, el transgén, con las propiedades novedosas que se desee, en el sitio del genoma previamente definido de manera precisa, a diferencia de las actuales plantas transgénicas en las cuales los transgenes se han insertado en diferentes lugares del genoma de manera inespecífica.

• Es importante que la sociedad y la opinión pública tengan claro que los organismos transgénicos y sus productos se utilizan en muchos países desde hace más de 35 años sin haber causado daños a la salud, ni efectos negativos sobre el medio ambiente o la biodiversidad. Por el contrario, existe un conjunto amplio de reconocidos beneficios para múltiples usuarios, en particular para los agricultores que cultivan plantas transgénicas. Son claros los beneficios del cultivo de las plantas transgénicas para la salud, el medio ambiente, la biodiversidad, el costo de producción y la calidad de vida, al dejar de comprar



y aplicar insecticidas químicos sintéticos para controlar las plagas de insectos. Finalmente están los beneficios sociales, en particular para los usuarios de esta tecnología, por la suma de todas las ventajas señaladas. El uso cada vez más frecuente y amplio de los medicamentos y los cultivos transgénicos indica que el planeta se está moviendo hacia una bioeconomía sustentable, apoyada en la biotecnología y en los organismos transgénicos.

• Desafortunadamente, esta tecnología biológica no ha podido ser adoptada de manera generalizada en nuestro país, ni aplicada como solución a problemas concretos del campo mexicano. Sólo las grandes empresas han logrado concretar avances importantes, sin que hasta la fecha los pequeños productores y los consumidores se beneficien directamente como ocurre en otros países, incluyendo naciones iberoamericanas cercanas y similares. En muchos casos los beneficios siguen siendo potenciales y persiste la opinión pública infundada respecto a que su utilización ocasiona daños a la salud y al medio ambiente. Lamentablemente, la pobreza, la injusticia en el reparto de oportunidades de empleo y el deterioro ambiental en el campo mexicano siguen presentes. Las acciones para bloquear la siembra de cultivos transgénicos en México incrementan la injusticia, ya que hoy está prohibida la siembra de algunos cultivos transgénicos previamente aprobados para siembra comercial en nuestro país, y en particular algunos desarrollados por instituciones mexicanas.

• Existe una muy sólida y amplia evidencia científica publicada en revistas internacionales sujetas a evaluaciones estrictas (más de 1,800 publicaciones) y reportes de academias de ciencias y de medicina de diferentes países y comunidades, incluyendo Estados Unidos y Europa, que sustentan las conclusiones y los señalamientos presentados y detallados en este libro. Entre ellas, se reitera que los transgénicos, y en particular las plantas aprobadas, son organismos tan seguros como los llamados convencionales y que su consumo, por más de 20 años, no ha causado ningún daño a la salud humana ni animal (incluyendo los cientos de millones en Estados Unidos y en otros países, y los millones de mexicanos que han consumido y consumen maíz transgénico importado para satisfacer la demanda). En estos documentos se señala que los cultivos transgénicos han sido extensamente evaluados, como alimentos y como plantas, incluyendo el análisis por técnicas de ciencias ómicas. Los resultados indican que son muy parecidos, metabólica y sustancialmente equivalentes, a los cultivos parentales y mediante estas metodologías no se detectaron efectos inesperados, no planeados, en las plantas transgénicas al compararlas con las variedades de las que se derivaron. También se presentan en el libro las declaraciones de los años 2012 y 2016 de dos grupos importantes de premios Nobel en apoyo a la biotecnología y al uso responsable de los transgénicos y sus productos, señalando que sus beneficios son muy importantes y, a la vez, la ausencia de

daños por su uso. En la más reciente de estas declaraciones, firmada por 123 recipientes del Nobel, llaman a esta tecnología de las plantas transgénicas una “agricultura de precisión” que tiene grandes ventajas. Enfatizan el caso específico del arroz transgénico enriquecido con carotenos, que hubiese evitado cientos de miles de muertes y casos de ceguera de no haber existido esta oposición a ultranza, sin sustento, desde su desarrollo en 1996, liderada en el mundo por los activistas de Greenpeace.

• Finalmente, se reitera que, al día de hoy, no existe una sola evidencia de daño por el uso de organismos transgénicos y sus productos; todos los señalamientos y las publicaciones de supuestos daños a la salud, al medio ambiente o a la biodiversidad son

infundados y carecen de sustento científico válido. Por ello, las agencias responsables de la seguridad y de la inocuidad alimentaria no han retirado ningún producto transgénico de los que hoy se encuentran en el mercado. Por todo lo señalado, nos parece injusto e inmoral que los agricultores y los campesinos en México no puedan optar de manera sencilla por la biotecnología de los cultivos transgénicos, como ocurre en varios otros países cercanos y hermanos en Iberoamérica.

Francisco Gonzalo Bolívar Zapata

*Coordinador del Comité de Biotecnología
de la Academia Mexicana de Ciencias
Junio 2017*

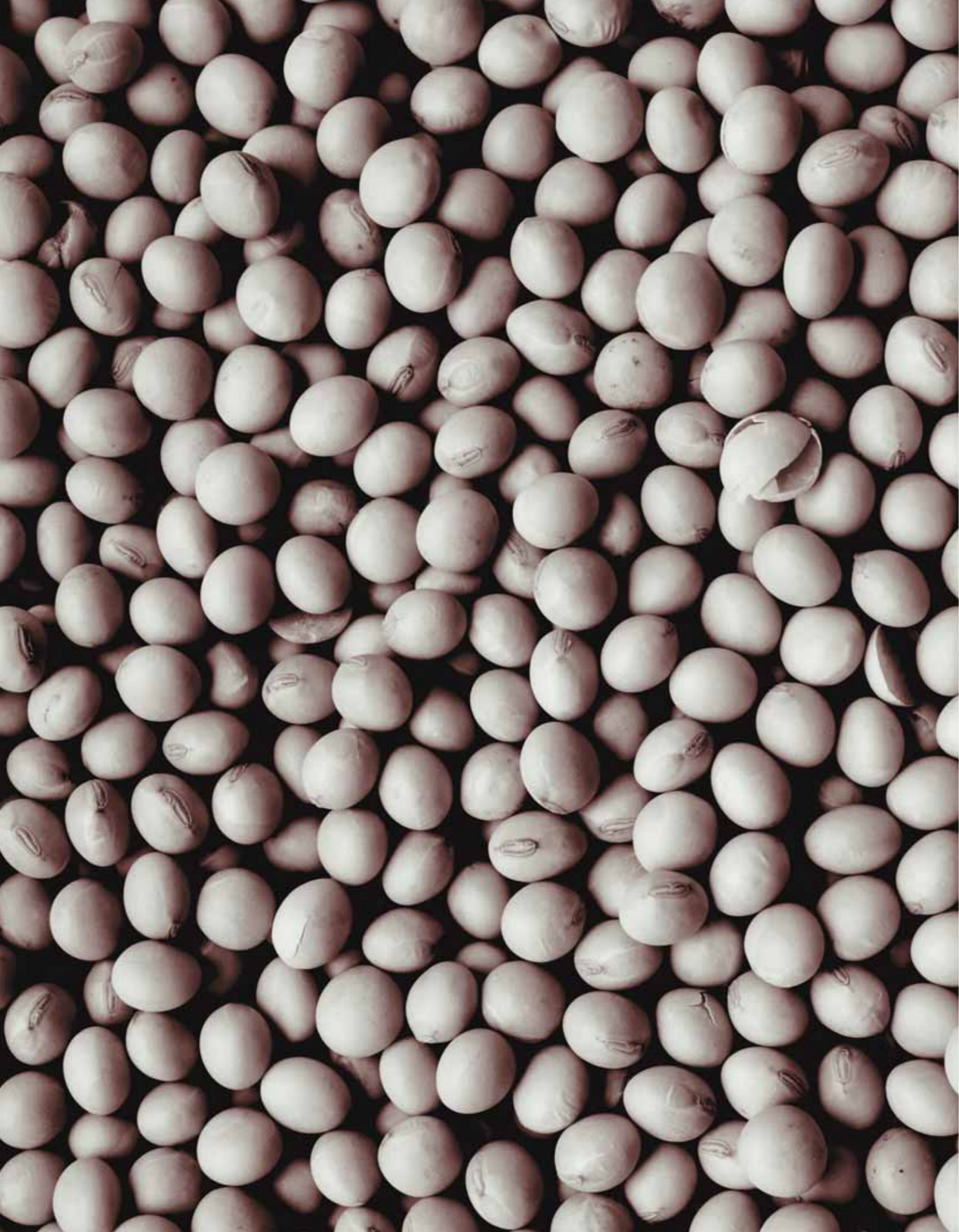
RESUMEN DE LA DECLARACIÓN

Este libro es un documento en defensa de la ciencia, la verdad científica y la biotecnología, esta última responsable de avanzar en la atención inteligente de varias demandas y problemáticas como la producción de medicamentos y alimentos sanos, teniendo también como objetivo la sustentabilidad alimentaria y del medio ambiente. Es inmoral e irresponsable seguir avanzando como hasta ahora en muchos ámbitos, contaminando y destruyendo el medio ambiente, mediante el uso de productos contaminantes, como los insecticidas químicos, algunos de ellos carcinogénicos.

La biotecnología y los transgénicos son herramientas indispensables para ayudar a contender con problemas globales y nacionales. Los alimentos transgénicos son inocuos como lo demuestra la amplia evidencia científica detrás de ello. Han sido consumidos por cientos de millones de seres humanos y miles de millones de animales desde hace más de 20 años, sin daños a la salud y con amplios beneficios en muchos sectores. El planeta se mueve hacia el uso de los transgénicos. Es tiempo de que la sociedad mexicana entienda su extraordinaria importancia, y se tenga la capacidad y sensibilidad para aprovecharlos.

MIEMBROS DEL COMITÉ DE BIOTECNOLOGÍA DE LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS
QUE COLABORARON EN ESTA PUBLICACIÓN

Dr. Francisco Gonzalo Bolívar Zapata (coordinador), Instituto de Biotecnología, UNAM
 Dr. Carlos Arias Ortiz, Instituto de Biotecnología, UNAM
 Dr. Mario Arteaga Vázquez, Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada de la
 Universidad Veracruzana
 Dr. Hugo Barrera Saldaña, Universidad Autónoma de Nuevo León
 Dr. Enrique Galindo Fentanes, Instituto de Biotecnología, UNAM
 Dr. Adolfo Gracia Gasca, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
 Dr. Luis Herrera Estrella, Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad,
 CINVESTAV-Irapuato
 Dr. Inocencio Higuera Ciapara, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño
 del Estado de Jalisco
 Dr. Alfonso Larqué Saavedra, Centro de Investigación Científica de Yucatán
 Dr. Agustín López-Munguía Canales, Instituto de Biotecnología, UNAM
 Dr. Tonatiuh Ramírez Reivich, Instituto de Biotecnología, UNAM
 Dr. Sergio Revah Moiseev, UAM-Cuajimalpa
 Dr. Xavier Soberón Mainero, Instituto Nacional de Medicina Genómica, Secretaría
 de Salud e Instituto de Biotecnología, UNAM
 Dr. Irineo Torres Pacheco, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro
 Ing. Jaime Uribe de la Mora, Probiomed SA de CV
 Dr. Jorge Manuel Vázquez Ramos, Facultad de Química, UNAM
 Dr. Gustavo Viniegra González, UAM-Iztapalapa



PRESENTATION AND DECLARATION ON TRANSGENIC OR GENETICALLY MODIFIED ORGANISMS AND THEIR ENORMOUS ADVANTAGES

Science is a human activity inextricably linked to the spirit of enquiry, and an essential part of people's culture. It seeks to generate knowledge about the universe and nature, including humanity, in order to understand ourselves better. We have witnessed extraordinary advances in scientific knowledge in the past few decades, which has enabled us to continually deepen our understanding of the universe, nature and human society. This scientific knowledge underpins the technology used to cope with the needs and problems of society and the earth. Effective, responsible, sustainable technology is required to satisfy the many extraordinary needs and problems facing mankind and our home, planet earth.

Biotechnology is a multidisciplinary, respectful and sustainable approach to studying and characterizing living organisms, designed

to use them in a respectful and sustainable manner. It is based on the knowledge of more traditional disciplines, such as microbiology, genetics, biochemistry, and biochemical engineering as well as newer areas such as omic sciences and bioinformatics. On the basis of multidisciplinary knowledge of the living cell that makes up all living organisms, specifically its genetic material, DNA, found in the cells of all living things, biotechnology has contributed solving key issues and needs in various sectors, such as health, agriculture, industry, the environment and energy.

Modern genetic engineering, genomics and DNA amplification techniques make it possible to synthesize or isolate genes of any living organism, which are specific segments of the DNA molecules comprising the chromosomes of living beings. It is possible to transfer any gene

from any origin to other organisms using a variety of techniques and methodologies, mainly drawn from the field of genetic engineering. All of these techniques involve the horizontal transfer of DNA, and the immediate reorganization of the incoming DNA with the genome of the recipient cell. This genetic material of different origin, known as a transgen, is incorporated in the organism, producing in this way, genetically modified organisms (GMOs) or transgenic organisms. The aim is to incorporate new and more powerful capacities into the modified cells residing in the genes that have been transferred (transgenes). In exceptional cases, DNA fragments from other origin—and this supports its transgenicity—that are not genes, allows the recipient organism better capacities. In this way, it is possible to develop better, more precise biological systems and environmentally friendly and respectful biotechnology, in order to responsibly meet needs such as producing new medicaments, safe food, and protecting our habitat, many of which could not be satisfied by other technologies.

This book, produced by the Biotechnology Committee of the Mexican Academy of Sciences (AMC), comprising 17 academic experts from various institutions and disciplines—among which seven National Science Award winners—explains why transgenic organisms have been developed as one of the most meaningful, best characterized tools for modern biotechnology, in order to contribute to solving problems and meeting demands.

This book is a continuation of the document *For the responsible use of genetically modified organisms* published by AMC in 2011. It updates

chapters from the previous book and includes six new ones with information, analysis and numerous cases derived from the past six years of accumulated scientific evidence and reports underpinning the innocuous nature of GMO use and consumption. It also describes the significant economic, ecological and social benefits arising from the responsible and sustainable use of transgenic organisms and their products.

The document also presents a set of scientific evidence whereby this group of experts posits that since transgenic organisms are living creatures created by the horizontal transference of DNA and genomic reorganization, similar to processes that occur in nature, they are organisms with a similar level of risk to that already existing in the natural processes of the biota. Furthermore, human beings have used domestication and the genetic improvement of plants and animals for the past eight to ten thousand years. Transgenic plants utilized in the countryside represent a perfected technology, also called “precision agriculture”, whose accuracy makes it superior, more advanced and safer than its predecessors. It has made it possible to reduce times and uncertainty when creating new cultivars that will contribute to the sustainability of both the environment and society.

One of the goals of this book is to show that horizontal gene transfer (known as transgenesis) is a natural phenomenon that has occurred since the origin of life and will continue to take place in biodiversity regardless of the use of horizontal gene transfer techniques, used by scientist to create genetically modified organ-

isms. This phenomenon essentially entails the horizontal transference of DNA of any origin and the reorganization of the genome in the recipient cell. Transgenesis has been historically responsible for the acquisition of new functions, particularly in plants, such as the genes responsible for photosynthesis originating in primitive photosynthetic bacteria. It has also been partly responsible for the evolution of species. The main reason behind this capacity is that the general structure of the DNA double helix molecule, is the same in all living organisms, which enables DNA of any origin that has been horizontally transferred to be recombined with the genetic material of the recipient cell. Nevertheless, it is important to note that current living organisms have developed mechanisms for dealing with and eliminating foreign or heterologous DNA that could penetrate the cell through horizontal DNA transference, as in viral infections. Accordingly, transgenesis is today an uncommon phenomenon, although it continues to occur particularly when mediated by certain viral infections that incorporate their genetic material into the chromosomes of the cells they infect, as in the case of retroviruses and through the insertion of bacterial DNA in the genomes of cells of different plants mediated by the infection of the bacteria *Agrobacterium tumefaciens*. Transgenic organisms are built using genetic engineering techniques that involve horizontally transferring DNA and reorganizing the genome of the recipient cell, mirroring transgenesis events that occur naturally in the biota.

The text includes an analysis of the existing legal framework in Mexico that regulates

the responsible, justified use of GMOs to meet various needs and problems. This legal framework includes the Cartagena Protocol on Biosafety and the Mexican Law on Biosecurity on GMOs.

The AMC’s Biotechnology Committee emphasizes that approved GMOs—and their products—currently used in food and medications, have already undergone a significant number of analyses and evaluations demonstrating their harmlessness to human and animal health, biodiversity and the environment. The World Health Organization and government authorities and agencies responsible for food safety from a large number of countries, including Mexico, United States of America and the European Union, have not withdrawn any present transgenic cultivar or their products from the current market. Some have been examined and reevaluated with no changes being made to their authorization. The transgenic plants used today are regarded as being equivalent to their traditional counterparts. Their benefits have led to a steady increase in their use worldwide.

The Biotechnology Committee is grateful for the support from AMC President Dr. Jaime Urrutia-Fucugauchi and that of several former presidents in the production of this book and previous Committee documents. Our goal is to systematize and clearly and objectively present the ample available information on GMOs to public opinion, society in general, legislators, and functionaries and professionals from the health, agriculture, environment and economy secretariats, amongst others. The goal is to ensure that decisions and policies regard-

ing transgenic organisms and their products, are well-founded and based on the substantial body of documented, verifiable scientific evidence underpinning our considerations. These documents and our book also underscore the range of benefits and absence of harm reported in the use of transgenic organisms. This book and other related texts are therefore freely available in electronic versions on the AMC website. We are also grateful to the National Council on Science and Technology (Conacyt) for its support to the AMC for this edition, and also the one of the National Autonomous University of Mexico (UNAM).

The Declaration on transgenic organisms, their benefits and lack of damage to health, the environment and biodiversity is presented below. The aim is for this Declaration and the information in this book, to guide and underpin discussion on this issue.

- Responsibly used biotechnology and transgenic products are environmentally friendly and harmless to health and biodiversity. Transgenic organisms are constructed through horizontal DNA transfer and genome reorganization techniques, mirroring transgenesis processes that have naturally occurred in the biota, meaning that they are low-risk organisms. They constitute an opportunity and a powerful tool for contributing added value to the conservation and sustainable use of natural products obtained from Mexico's biodiversity, one of the country's greatest resources. Transgenic plants, from 20 years to date, contribute to the conservation of

beneficial insects, since they are not eliminated by chemical pesticides. These chemical compounds are no longer used in transgenic crops to eradicate insect plagues.

- Biotechnology is used to contribute to providing sustainable solutions for extraordinary global and national problems and demands. In the pharmaceutical sector, modern biotechnology and transgenic organisms enable today the production of much of our modern medicine (including nearly a hundred transgenic-based medicines and vaccines available at pharmacies). Likewise, dozens of basic plants and food ingredients are of transgenic origin. One of the most notable examples of first-generation transgenic plants is the pest-resistant varieties, designed to simultaneously cope with insect plagues and reduce the use of chemical insecticides. This goal has been significantly achieved through the use of various crops in several countries, with enormous benefits for the environment, since many chemical pesticides pollute our planet to a greater or lesser extent. The use of transgenic plants implies significant advances in the goal of sustainable food production and the fight against environmental pollution. In addition, it reduces synthetic chemical pesticide utilization that indirectly decreases greenhouse gas emissions. Unfortunately, chemical pesticides are still widely used, to the detriment of the environment and health, since some are known to cause or increase the risk of cancer. A subsequent use with environmental benefits was the

design of second-generation transgenic plants resistant to both insect plagues and the chemical herbicides, such as glyphosate, used to control the weeds that prevent farming. Transgenic plants are utilized worldwide as part of an intelligent, responsible strategy for increased, sustainable food production. They will continue to play an increasingly significant role in addressing serious environmental problems caused by pollution by chemical pesticides and climate change through the use of third generation varieties, some of which have already been developed in Mexico, which will be heat- and drought-resistant, and other important transgenic plants that can grow on phosphite instead of phosphate. Next generation transgenic organisms will be built using new and more powerful DNA editing techniques (CRISPR-Cas9 type) that will enable the insertion of genetic material (transgenes), containing desirable properties into a specific, previously determined place in the genome, unlike current transgenic plants into which transgenes have been inserted in various unspecified areas.

- It is important for society and public opinion to realize that genetically modified organisms and their products have been used in many countries for over thirty-five years without damaging health or negatively impacting the environment or biodiversity. On the contrary, a comprehensive set of recognizable benefits exists for multiple users, particularly for those who cultivate transgenic crops. Transgenic plants

and their products have a number of advantages. Growing transgenic plants has obvious benefits for health, environment, biodiversity, production costs and the quality of life since it eliminates the need and application of synthetic chemical pesticides to control insect plagues. There are also social benefits for those who use this technology due to all the aforementioned advantages. The increasingly widespread use of transgenic medicines and cultivars show that our planet is moving towards a more sustainable bio-economy based on biotechnology and transgenic organisms.

- Unfortunately, this biological technology has not yet been widely adopted in our country to provide a solution to the specific problems of Mexican agriculture. Only the largest companies have made significant progress, while small farmers/campesinos and consumers have failed to benefit, as they have done in other countries including similar nearby Latin American countries. In many cases, the benefits are still only potential, while public opinion mistakenly considers their use to be harmful to both human health and the environment. Unfortunately, poverty, unequal job opportunities and the environmental deterioration of the Mexican countryside are still present. The actions to prevent the sowing of transgenic cultivars in Mexico increase this injustice, since some of the GMOs previously approved for commercial crops in our country, particularly those developed by Mexican institutions, today are not permitted to sow.

• There is solid scientific evidence published in international journals subject to strict evaluations (over 1,800 publications), and reports by the academies of sciences and medicine of various countries and communities including the United States and Europe, that support the statements and conclusions outlined in this book. These documents show that transgenic cultivars have been extensively evaluated by omic science techniques both as plants and foods. Results indicate substantially equivalent metabolic similarities with parent crops, while these methodologies have failed to detect unexpected effects in transgenic plants when compared to the varieties from which they were derived. These are the reasons why transgenic plants are as safe as the conventional cultivars and its consumption for more than 20 years for hundred of thousands, have not caused any damage to human or animal health. The book also includes declarations issued in 2012 and 2016 by important Nobel Prize groups supporting biotechnology and the responsible use of transgenic organisms and their products, highlighting their benefits and innocuousness. The most recent

document, signed by one hundred and twenty three Nobel Prize laureates, refers to the transgenic plant technology used in the countryside as “precision agriculture” with enormous benefits. Specifically in the case of GMO rice enriched with carotene, the signatories state that this product would have prevented hundreds of thousands of cases of blindness and death if it had not been strenuously opposed by Greenpeace activists since its inception in 1996.

• Lastly, the book stresses that, to date, there is no a single confirmed evidence of damage caused by the use of transgenic organisms; all cases of alleged damage to health, environment and biodiversity are unfounded and entirely lacking of scientific rigor. This is why the agencies in charge of food safety have not retired any present GMO product from the market. Accordingly, we believe it is unjust and immoral that Mexican farmers cannot simply opt for the biotechnology of transgenic organisms, as farmers can in sister nations in Latin America.

Francisco Gonzalo Bolívar Zapata
*Chair of the Biotechnology Committee
 of the Mexican Academy of Sciences
 June 2017*





CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

- PRESENTACIÓN DE MOTIVOS
- CONSIDERACIONES GENERALES
- RESÚMENES DE CONTENIDOS DE LOS CAPÍTULOS DEL LIBRO

Este libro es un reporte técnico-científico, elaborado con datos e información dura. Es un compendio denso que incluye y organiza importante información sobre la biotecnología y los organismos transgénicos, elaborado por expertos en diferentes disciplinas. Aquí se presenta y se analiza información con base en el amplio conocimiento y la vasta y contundente evidencia científica existente respecto a los muchos beneficios de los organismos transgénicos y la ausencia de daño por su consumo y utilización.

La biotecnología es una actividad multidisciplinaria que contribuye al estudio y la caracterización de los organismos vivos, y se pretende mediante este tipo de tecnología, un uso sustentable y respetuoso de la biodiversidad y del medio ambiente. Desde hace miles de años la biotecnología permite contender con múltiples necesidades de la sociedad humana y con el

cuidado de la naturaleza y el medio ambiente. Es una actividad sustentada en el conocimiento de varias disciplinas más tradicionales, como la microbiología, la genética, la ecología, la bioquímica, la ingeniería bioquímica, y de algunas otras más recientes como las ciencias ómicas, entre ellas la genómica y la bioinformática. A partir del conocimiento reciente a nivel de las moléculas biológicas que integran la célula viva —en particular del ácido desoxirribonucleico (ADN), donde residen los genes— y de su funcionamiento, la biotecnología ha coadyuvado a satisfacer importantes demandas en diversos sectores, como el de la salud, el agropecuario, el industrial, el energético y el medioambiental, dando solución a problemas relacionados con la producción sustentable de alimentos, la recuperación de ecosistemas contaminados o la defensa de la diversidad biológica. Los antibióticos, las vacunas, las bebidas alcohólicas y

las variedades de animales y plantas modificados genéticamente son ejemplos de desarrollos biotecnológicos exitosos. La biotecnología es, pues, una tecnología amigable con la salud, la biota y el medio ambiente, que se ha usado en México desde tiempos prehispánicos.

Desde hace poco más de 35 años, el ser humano ha utilizado un nuevo tipo, más avanzado, mejor diseñado, de organismos genéticamente modificados (OGM) o transgénicos y los productos que de ellos se obtienen. Sin los organismos transgénicos, se perdería la posibilidad de aplicar conocimientos y técnicas más precisas para atender y contender con muchos de los problemas y las demandas presentes y futuras de la humanidad y del medio ambiente. Los transgénicos, como se verá en detalle más adelante y particular en el capítulo II, se construyen mediante la transferencia horizontal de fragmentos específicos de ADN que llevan genes provenientes de cualquier origen, y su posterior reorganización con el ADN de la célula receptora o modificada. El propósito es incorporar nuevas y mejoradas capacidades en las células modificadas que residen en los genes transferidos (transgenes). En casos excepcionales se han transferido fragmentos de ADN de otro origen, que no son genes, pero que permiten al organismo receptor, también transgénico, nuevas capacidades. De esta manera, es posible desarrollar mejores y más precisos sistemas biológicos.

Para la construcción de los organismos transgénicos se ha seguido el ejemplo de un proceso natural que ha ocurrido y ocurre en la biodiversidad llamado transgénesis. Es por ello que los transgénicos resultan una biotec-

nología amigable con la salud, la biota y el medio ambiente. No hay evidencia de daño a la salud, a la biota, ni al medio ambiente por su uso responsable y justificado, a diferencia de otras tecnologías, en particular los insecticidas químicos, que contaminan distintos entornos del planeta, en mayor o menor medida, y algunos llegan a dañar la salud.

Uno de los propósitos de este libro es sistematizar y poner al alcance del público en general, de manera gratuita en el portal de la AMC y de otras instituciones, la información que sustenta la ausencia de daño a la salud, al medio ambiente y a la diversidad biológica como resultado del consumo y el uso responsable de los transgénicos y, por el otro lado, los amplios beneficios en diferentes sectores. La intención es que la opinión pública, la sociedad mexicana y los gobernantes estén bien informados y sustenten sus decisiones con base en el amplio y contundente conocimiento científico que soporta estas consideraciones, en beneficio de la sustentabilidad del medio ambiente y de la sociedad.

Es también uno de los objetivos de este libro señalar que la transgénesis es un fenómeno natural que ha ocurrido siempre y seguirá ocurriendo en la biodiversidad, independientemente de los organismos transgénicos. Este fenómeno, que se analizará en detalle en el capítulo IX es, en esencia, la transferencia horizontal de ADN de cualquier origen y su posterior reorganización con el ADN del genoma en la célula receptora. La transgénesis ha sido responsable a lo largo del tiempo de la adquisición de muchas funciones nuevas, en particular en las plantas como, por ejemplo, los genes res-

ponsables de la fotosíntesis, originalmente una función exclusiva de las bacterias. La primera razón que explica esta capacidad es que la estructura general de la molécula de la doble hélice de ADN es la misma en todos los organismos vivos y esto permite la recombinación del ADN transferido de manera horizontal, de cualquier origen, con el material genético de la célula receptora. Sin embargo, es importante señalar que los actuales organismos vivos hemos desarrollado mecanismos que permiten contender con los ADN de origen foráneo o heterólogo que pudieran llegar a la célula por transferencia horizontal de ADN y eliminarlos, como los provenientes por las infecciones virales. Por lo anterior, la transgénesis es hoy un fenómeno poco frecuente pero ocurre, en particular, mediado por las infecciones de ciertos virus llamados retrovirus, que pueden incorporar su material genético en los cromosomas de las células que infectan, como el VIH. También ciertas bacterias, como *Agrobacterium tumefaciens*, son capaces de incorporar por transferencia horizontal de ADN, parte de su material genético a las células de las plantas que infectan, que son la gran mayoría de los vegetales. Como se verá en detalle en los capítulos II y IX, los organismos transgénicos son construidos en el laboratorio, principalmente mediante técnicas de ingeniería genética que implican transferencia horizontal de ADN y la reorganización del genoma en la célula receptora, siguiendo el ejemplo de la transgénesis que ha ocurrido y ocurre naturalmente en la biota.

Gracias a los organismos transgénicos tenemos en las farmacias, incluyendo las mexicanas, cerca de un centenar de nuevos medi-

camentos biológicos de origen transgénico, consistentes en proteínas, idénticas a las de origen humano, como la insulina, para el tratamiento de la diabetes; el interferón, para el tratamiento del herpes y algunos tipos de cáncer; el factor de coagulación VIIa recombinante, para el tratamiento de las hemorragias en los enfermos de hemofilia; los factores anticoagulantes para disolver coágulos en la sangre y prevenir las consecuencias de las embolias, así como nuevas vacunas para la prevención de enfermedades infecciosas como la hepatitis y la influenza, entre otras problemáticas clínicas. Hasta la llegada de los transgénicos, estas proteínas de importancia clínica debían extraerse de cadáveres o tejidos animales o, en el mejor de los casos, sintetizarse por la vía química. Por lo tanto, en la mayoría de los casos estas proteínas de origen transgénico codificadas en transgenes, idénticas a las humanas, no se producían comercialmente.

Las proteínas y los organismos de origen transgénico se han utilizado también en la industria alimentaria desde hace muchos años para la producción de una gran variedad de productos procesados, tales como quesos, jarabes, jugos, cerveza y otros varios tipos de alimentos.

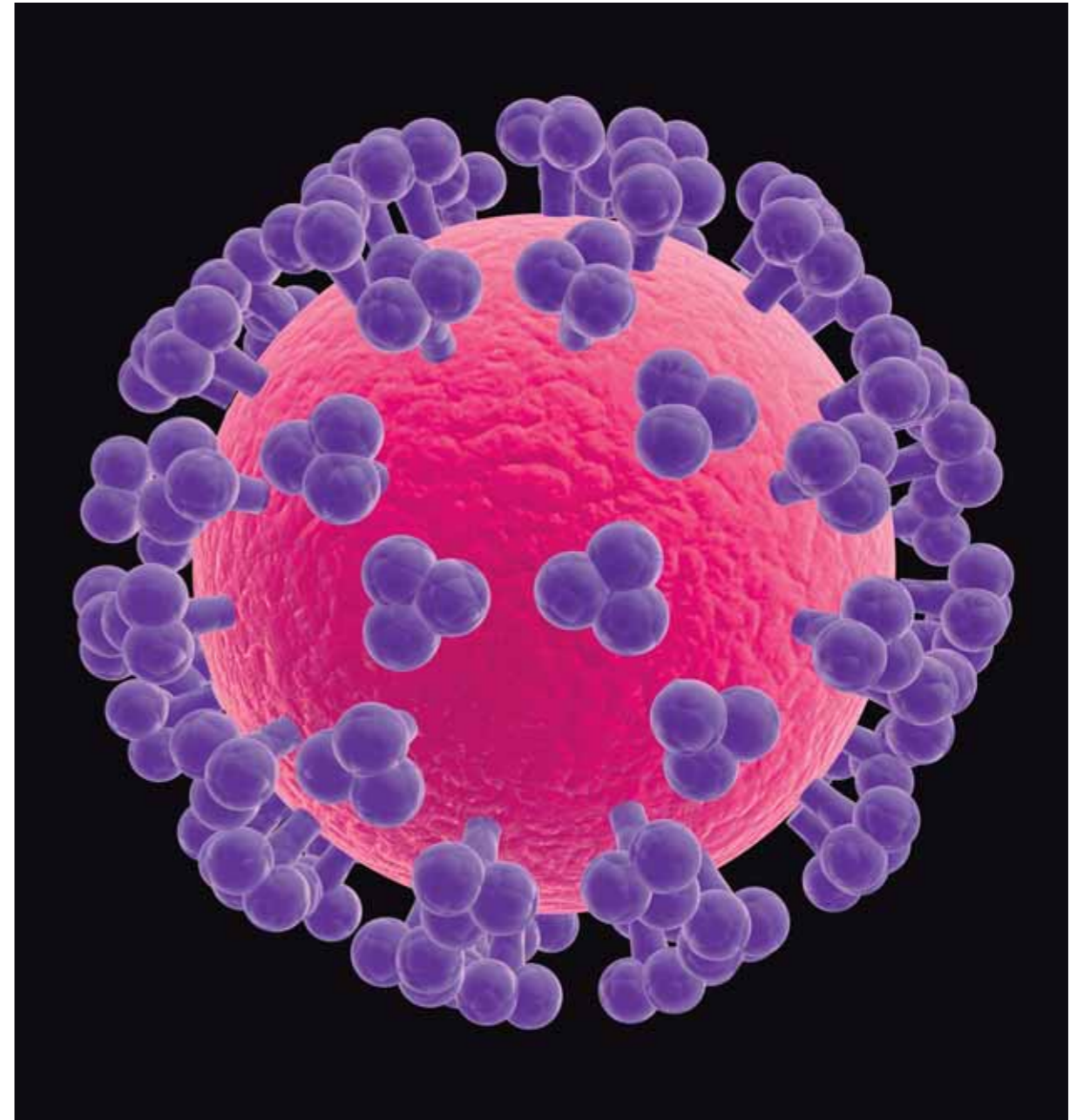
Desde 1996, son muchas las variedades de plantas transgénicas y sus productos que se consumen como alimento en muchos países, así como sus derivados procesados como almidones y aceites. Las plantas transgénicas de la llamada primera generación llevan un transgén que codifica para ciertas proteínas que le otorgan a la planta resistencia contra plagas de insectos. Dichas plantas fueron diseñadas para

eliminar este tipo de plagas y, por ende, reducir el uso de los insecticidas químicos que se aplican muchos de ellos, de manera irresponsable desde hace décadas, para eliminar estas plagas. Desafortunadamente se siguen usando en muchos lugares en detrimento de la salud y el medio ambiente. La utilización de estos cultivos transgénicos ha permitido controlar las plagas de insectos. Además, en varios países, en particular en Estados Unidos, Brasil y España, se ha logrado una importante reducción en las cantidades de insecticidas químicos que se utilizaban. Lo anterior se ha traducido en un conjunto amplio de beneficios de varios tipos para los usuarios y la sociedad en general: para la salud, ya que algunos insecticidas causan cáncer y otros incrementan los riesgos de adquirirlo, y para el medio ambiente y la biodiversidad, reduciendo la contaminación, como se verá en detalle en el capítulo V. Asimismo, se diseñaron plantas transgénicas de segunda generación que llevan transgenes que le otorgan resistencia a los herbicidas químicos, como el glifosato, que se utilizan para eliminar las malezas que crecen con los cultivos, y así hacer más eficiente la labor de su cultivo. En un futuro cercano, como se comenta y sustenta más adelante, por la tendencia global en la agricultura a reducir el uso de agroquímicos y de llevar a cabo un control integral de plagas (hierbas e insectos), consideramos que existe la posibilidad para reducir el uso de los herbicidas químicos —entre ellos, el glifosato— que se utilizan para eliminar las plagas que presentan en las hierbas o malezas. Las plantas transgénicas con las que se trabaja en el campo representan una tecnología perfeccionada, también llamada “agricultura de precisión”,

que es superior a las usadas anteriormente. Esto ha permitido reducir los tiempos y la incertidumbre en la creación de nuevos cultivos con nuevas características y ventajas, en beneficio de la sustentabilidad del medio ambiente y de la sociedad.

En 2015, más de 178 millones de hectáreas en 28 países se cultivaron con plantas transgénicas, mismas que fueron consumidas por más de 400 millones de habitantes en alrededor de 50 países. En su cultivo estuvieron involucrados más de 18 millones de agricultores. También, desde hace más de 20 años, miles de millones de animales han sido alimentados con plantas transgénicas y sus productos. México ha importado y sigue importando de Estados Unidos más del 70% del maíz amarillo que aquí se consume y se procesa, y este maíz es transgénico. En Estados Unidos, los cultivos de origen transgénico representan, en el caso del maíz, la soya y la alfalfa, más del 90% del total de los cultivos.

A la fecha, no existen datos confiables y convincentes que al menos sugieran algún tipo de daño a la salud, al medio ambiente o a la biodiversidad causado por la producción, el uso y el consumo de alimentos, o sus productos, que hayan sido objeto de una modificación genética empleando estas nuevas herramientas. De hecho, cada vez es mayor la evidencia científica sólida que indica que los productos transgénicos no generan daño a la salud ni al medio ambiente, como se discute ampliamente en este libro. Sin embargo, esta tecnología como cualquier otra, puede presentar algunos riesgos, intencionales o no, que han sido y deberán seguir siendo considerados previo a la aprobación



del producto, aun cuando se trate de una mejor alternativa a tecnologías convencionales. Por ello, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) concertó e instrumentó, a través de sus organismos, diferentes acuerdos, documentos y marcos jurídicos para el manejo responsable de los OGM. México firmó uno de estos documentos, el Protocolo de Cartagena, que establece el marco para el manejo transfronterizo de los OGM. Con base en este compromiso, el Senado de la República en el año 2000 elaboró una iniciativa de Ley de Bioseguridad de OGM que se convirtió en ley en 2005, cuando las dos cámaras del Congreso la aprobaron. En el año 2008 se implementó el Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur, relacionado con la bioseguridad en biotecnología, y México también se comprometió al firmarlo. Estos mandatos constituyen el marco jurídico que tenemos en México para el manejo y el uso responsable de los transgénicos, para atender demandas en diferentes sectores, en lo cual se ahonda en esta publicación, en particular en el capítulo X.

La presente publicación fue elaborada por el Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), con varios objetivos y propósitos que se presentan y discuten a lo largo de los XI capítulos y 10 anexos de este libro.

Este capítulo I, como se ha señalado, incluye la introducción, la presentación de motivos, las consideraciones generales y el resumen de los contenidos de los capítulos del libro.

El capítulo II explica la biotecnología moderna como una actividad multidisciplinaria que contribuye al estudio y la caracterización de los organismos vivos, y cómo se pretende

aplicarla para hacer un uso responsable, sustentable y amigable con la salud, la biodiversidad y el medio ambiente. En este capítulo también se señala y se describe la estructura química de doble hélice del ácido desoxirribonucleico (ADN), donde se localizan los genes que son segmentos o secciones de las moléculas de ADN en los cromosomas, dentro de todas las células integrantes de los organismos vivos, incluyendo el ser humano. Se explican, pues, las características y propiedades de esta molécula extraordinaria, maravillosa, donde reside la información y la esencia de la vida biológica. También se analiza cuáles son los mecanismos para producir o sintetizar, a partir de los genes, las moléculas de ácido ribonucleico (ARN) y las proteínas, que son las herramientas más importantes que tienen todas las células vivas para funcionar. Por otro lado, se explica el concepto de mutación o cambio en el ADN, responsable de la evolución, y se incluye una sección sobre epigenética y expresión de los genes.

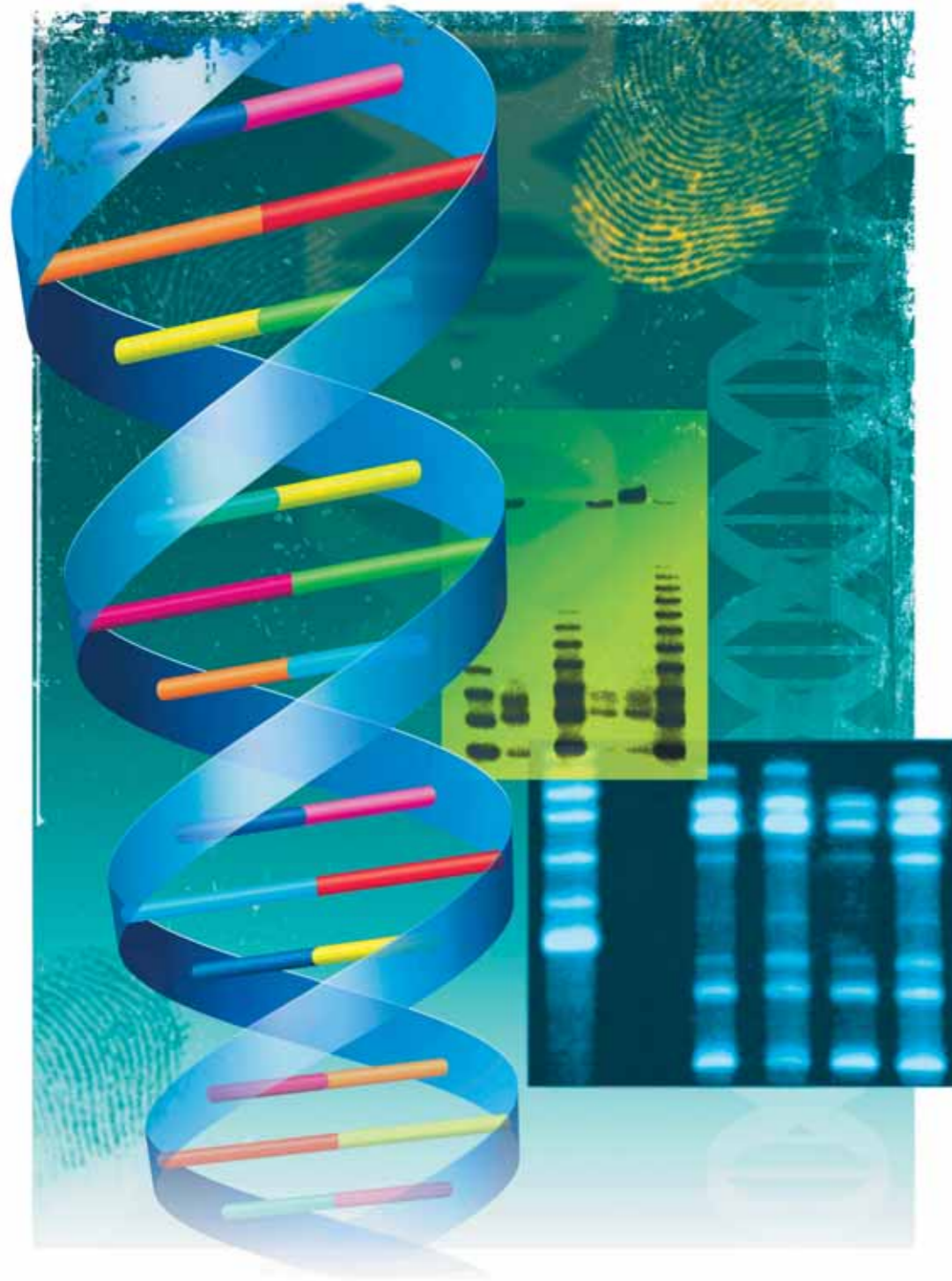
Posteriormente, se señala cómo gracias a la aparición y el refinamiento principalmente de las técnicas de la ingeniería genética para manipular el ADN de las células de cualquier organismo vivo, ha sido posible aislar, incorporar y transferir de manera horizontal genes de cualquier organismo vivo a otros, moléculas de ADN que han existido en la naturaleza desde hace millones de años, para así modificarlos genéticamente, dando lugar a los OGM o transgénicos de primera y segunda generación. Gracias a los nuevos transgenes transferidos de manera horizontal, los organismos transgénicos adquieren nuevas capacidades después de que el material genético del transgén se

recombina con el ADN en el genoma de la célula receptora. También se hace mención a las relativamente recientes y poderosas técnicas llamadas CRISPR-Cas9 para editar el material genético de cualquier organismo vivo de una manera muy fina y precisa. Gracias a estas nuevas técnicas se cuenta ya con algunas variedades de vegetales con propiedades avanzadas, en las que se han eliminado o deletado ciertos genes. Estas nuevas técnicas de edición fina de ADN permitirán la construcción de organismos transgénicos más avanzados, de tercera y cuarta generaciones, en los cuales la integración del material genético de origen transgénico se hará de una manera más precisa en los sitios escogidos del genoma del organismo receptor. Además, se podrá caracterizar el nuevo organismo inmediata y detalladamente.

En el capítulo II también se describen el propósito, la justificación y las limitaciones de los organismos transgénicos que se han construido para atender responsablemente diferentes problemas y demandas, y el impacto que han tenido en diferentes sectores para coadyuvar en la solución, al menos parcialmente, de las múltiples necesidades de la sociedad moderna, necesidades relacionadas con la salud, la producción sustentable de alimentos, la industria, así como la conservación y la recuperación del medio ambiente y de la biodiversidad. Se incluyen ejemplos de productos de origen transgénico para los diferentes sectores que se encuentran en el mercado. Se reitera que, para contender con problemáticas clínicas y enfermedades infecciosas, existen cerca de 100 medicamentos de origen transgénico —incluyendo vacunas contra organismos y virus pa-

tógenos como el de la influenza— en las farmacias de México y el mundo. Se cuenta también con un listado muy importante de productos transgénicos en la industria alimentaria, incluyendo los derivados procesados de las plantas transgénicas como cereales, que se venden en las tiendas y supermercados de muchos países, entre ellos México. Asimismo, se incluyen cifras relacionadas con la producción de las plantas transgénicas de primera y segunda generación, cultivadas y utilizadas en varios países. Por la información comentada, queda claro que el planeta se está moviendo hacia un uso, cada vez más importante, de productos transgénicos (medicamentos, alimentos procesados, cereales, granos y vegetales) que llegan, cada vez más, a diferentes sectores y van cubriendo distintas demandas, generando así una bioeconomía sustentada en la biotecnología y en los organismos transgénicos.

El capítulo III presenta un compendio de los múltiples documentos que sustentan que la biotecnología y los transgénicos son una tecnología responsable y respetuosa con la salud y el medio ambiente y que sus beneficios son importantes. Aquí se da lugar a una discusión en torno a este tema y, en particular, se presenta la opinión de grupos de expertos y líderes académicos, incluyendo aquellos agrupados en diversas academias de ciencias y de medicina de diferentes países, dando su aval a los organismos transgénicos. Entre estos documentos destacan dos declaraciones firmadas por grupos de premios Nobel en apoyo a la biotecnología y a los transgénicos y sus productos, destacando sus beneficios y la ausencia de daño por su uso y consumo; una del año 2012



y la más reciente del año 2016, firmada por 123 recipiendarios del premio. En esta última declaración de los premios Nobel se apoya el uso de las plantas transgénicas en el campo porque representa una “agricultura de precisión”, más avanzada y segura para contender con las demandas y necesidades agrícolas. También aquí se incluye un importante y muy completo reporte del año 2016, elaborado por las tres Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina (NASEM, por sus siglas en inglés), que integran el Consejo Nacional de Investigación de Estados Unidos (NRC, por sus siglas en inglés), titulado “Experiencias y perspectivas de las plantas construidas por ingeniería genética”, es decir, plantas transgénicas. Es importante recordar que, en los diferentes países, las academias de ciencias y de medicina están integradas por los académicos más distinguidos, expertos en sus áreas, de mayor reconocimiento por sus pares, que realizan estudios, reportes y recomendaciones para los gobiernos y las organizaciones internacionales, con la intención de informar a la sociedad sobre diferentes temas, problemas y oportunidades. Entre estos reportes existen varios en torno a la biotecnología y los transgénicos, algunos de los cuales se presentan en este capítulo. Finalmente, cabe mencionar que las academias de ciencias integran la Red Global de Academias de Ciencias (IAP), de la cual la Academia Mexicana de Ciencias es integrante.

El capítulo IV presenta y trata en detalle las amplias y contundentes evidencias científicas que sustentan la inocuidad, la ausencia de daño por el consumo de las plantas transgénicas y sus derivados, aprobadas para uso como alimento.

En concreto, existen más de 1,800 publicaciones científicas en revistas, reportes y libros, con comités editoriales y arbitraje por pares, de diferentes orígenes y regiones, que sustentan que los cultivos transgénicos y sus productos son similares o equivalentes a los convencionales y a los parentales, y que su utilización no ha generado daño a la salud humana ni a la animal. Decenas de estas publicaciones provienen de laboratorios independientes en donde las muestras han sido analizadas a través de metaanálisis en algún aspecto específico, para dar mayor sustento, por un lado, a los señalamientos de ausencia de daño a la salud por el consumo de los transgénicos y, por el otro, a las consideraciones y recomendaciones. También, en algunos de estos artículos se señala una revisión de decenas de publicaciones en las que las plantas transgénicas han sido ampliamente caracterizadas por diferentes grupos usando ciencias ómicas. Se demuestra que los cultivos transgénicos son muy parecidos a las plantas parentales y que no existen diferencias significativas entre las miles de moléculas que integran los metabolismos de las plantas, medidas con estos métodos. Por lo tanto, son metabólicas y sustancialmente equivalentes; es decir, no existen efectos no planeados o inesperados del análisis por ciencias ómicas entre los cultivos transgénicos y las plantas parentales. Todo lo anterior en congruencia y soporte respecto a la ausencia de daño por consumir plantas transgénicas y sus productos, por cientos de millones de humanos y de animales. También en esta sección se incluye el análisis sobre la publicación del Dr. Séralini y colaboradores del año 2012, en la que se reportó que las plantas transgénicas y los herbicidas como

el glifosato causaban tumores en ratas. Esta publicación fue retractada dos años después, en 2014, por el propio editor de la revista en donde se publicó originalmente, debido a que se señalaron y demostraron por varios grupos académicos, particularmente europeos, las graves deficiencias experimentales, el insuficiente número de animales analizados y en general la ausencia de rigor científico del artículo, lo cual imposibilita llegar a conclusiones válidas. En este sentido, vale la pena mencionar un pronunciamiento del año 2012 (inmediatamente después de la publicación del artículo de Séralini y colaboradores en el 2012) de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus siglas en inglés), en el que se descalifica contundentemente dicha publicación. Por otra parte, se reitera que, ante el cúmulo de evidencias de inocuidad y la ausencia de daño por el consumo de plantas transgénicas y sus productos, la Organización Mundial de la Salud no ha cambiado su posición respecto a los alimentos de origen transgénico. Sustentado en lo anterior y en los documentos de apoyo en favor de los cultivos transgénicos, ninguna de las agencias y autoridades de los diferentes países y regiones responsables de autorizar los medicamentos y alimentos, como la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés), la EFSA y la Comisión Federal para la Protección de Riesgos Sanitarios de México (Cofepris), se han visto en la necesidad de retirar del mercado ninguno de los productos transgénicos ni sus derivados hasta ahora aprobados. Hoy estos productos se encuentran en el mercado mundial, aunque algunos han sido cuestionados por supuestos daños y reevalua-

dos por dichas instancias, sin cambiar la decisión por el supuesto daño porque, como hemos dicho antes, los cultivos transgénicos son sustancialmente equivalentes a los tradicionales. En México, la Cofepris ha autorizado la importación de alimentos transgénicos, incluyendo el maíz amarillo, prácticamente desde su aparición en el mercado, como una medida necesaria para satisfacer la demanda alimentaria del país. Este maíz se utiliza principalmente como alimento para animales pero también se consume por humanos. Por otro lado, se mencionan reportes de academias de ciencias y de medicina de diferentes países, como se señaló anteriormente, que indican que no hay evidencia de daño por el consumo de plantas transgénicas y sus productos, construidas por ingeniería genética. En este capítulo, así como en el capítulo VI, se incluye y se responde a un trabajo muy reciente (2016) del Dr. Séralini y colaboradores, donde los autores señalan la ausencia de equivalencia sustantiva entre los cultivos transgénicos y los convencionales. Aun con estas publicaciones en contra, como las de Séralini y colaboradores, el amplio sustento científico indica que no existe evidencia de daño por el consumo de plantas transgénicas. Sin embargo, si en algún momento se detectara y realmente se demostrara por diferentes grupos de manera independiente algún daño por el uso y en particular por el consumo de alguna planta transgénica, ese transgénico debería retirarse del mercado, como se han retirado ya ciertos medicamentos por sus efectos secundarios.

El capítulo V expone y examina las evidencias sobre los amplios beneficios de las plantas transgénicas que llevan en sus transgenes

propiedades bioinsecticidas, diseñadas para contender con las plagas de insectos y así reducir el uso de insecticidas químicos. Entre los beneficios, incluyendo el económico y el social, existen ventajas para la agricultura, el medio ambiente, la diversidad biológica, la salud humana y la animal, así como algunas otras ventajas adicionales indirectas para la salud. Indudablemente esta tecnología ha permitido un uso más sustentable de los recursos del planeta. En este capítulo se analizan también las publicaciones científicas y técnicas que cuantifican la importante contribución de los cultivos transgénicos por la reducción del uso de insecticidas químicos para contender con las plagas de insectos, y el beneficio adicional a la salud, ya que algunas de estas sustancias causan cáncer o incrementan el riesgo de adquirirlo. Hacemos hincapié en que éste es el motivo de la creación y el uso de las plantas transgénicas de primera generación: reducir la utilización de los insecticidas químicos por los grandes problemas que su uso conlleva, propósito que se ha cumplido. Los OGM, y en particular las plantas transgénicas, han redundado en amplios beneficios de varios tipos, como la considerable disminución en la cantidad de insecticidas químicos que se aplican, con el concomitante beneficio ambiental dado por la minoración de estos compuestos químicos que pueden llegar a contaminar los suelos, los campos de cultivo, los mantos freáticos y los océanos, y además, varios de ellos por ser recalcitrantes. La utilización de los cultivares transgénicos también ha implicado una disminución en la emisión de gases con efecto invernadero. En estos procesos los beneficios alcanzan también a la

biodiversidad y, en particular, a los insectos no plaga, incluyendo los benéficos (como los polinizadores) que han prevalecido de mejor manera porque ya no son eliminados con los insecticidas químicos. Las ventajas son también, como lo hemos dicho antes, para la salud, porque muchos insecticidas químicos causan daño a la salud de los agricultores y de los animales. En este capítulo también se menciona el impacto económico por dejar de comprar y utilizar insecticidas, lo que se ha traducido en un incremento en la productividad de las cosechas. Por todo lo anterior existe un beneficio social para los usuarios de esta tecnología en algunos entornos, por tener una mejor capacidad de desarrollo individual y colectivo dada la suma de los beneficios anteriores. Por ello, por los amplios beneficios, los usuarios de esta biotecnología de cultivos transgénicos la están adoptando en muchos países. Aquí se recalca que el planeta se está moviendo hacia el uso cada vez más frecuente e importante de los cultivos transgénicos en el campo, hacia una bioeconomía sustentada en la biotecnología.

El capítulo VI presenta un análisis de las consideraciones y publicaciones adversas, en contra de las plantas transgénicas por los supuestos daños y posibles riesgos. Se incluyen también las respuestas y consideraciones a estas dudas, preguntas y cuestionamientos, así como las consideraciones y evidencias más importantes que justifican y sustentan el uso y la siembra de los cultivares transgénicos en México y en el mundo. En esta sección se comentan los libros *El maíz en peligro ante los transgénicos* (editado por E. Álvarez Buylla y colaboradores, publicado en 2013) y *Altered genes, twisted truth* (de

S.M. Druker, publicado en Estados Unidos en 2013) y otras publicaciones de diferentes grupos, y de ONG como Greenpeace, que cuestionan la inocuidad y utilidad de los OGM. Entre estos cuestionamientos comentamos aquellos en torno a la necesidad y la pertinencia del uso de plantas transgénicas en nuestro país, entre otras razones por ser México centro de origen del maíz. Con base en el trabajo de Séralini y colaboradores, 2012, los detractores insisten en que los cultivos transgénicos dañan la salud; sin embargo, como ya hemos comentado, el artículo fue retractado por el editor de la revista. Por otro lado, estos señalamientos indican que las compañías transnacionales, dueñas de las semillas transgénicas y de pesticidas, controlan el mercado, lo cual atenta contra la soberanía alimentaria de México, ya que las concentraciones de riqueza en pocas compañías transnacionales podrían dar lugar a mayores injusticias en el reparto de las oportunidades de empleo y subsistencia. Sostienen también que las plantas transgénicas generarán problemas —ni previsibles ni comprensibles— por la incorporación, la expresión y el reacomodo del transgén en el genoma de la planta. Los detractores señalan que, dado que los seres vivos son organismos muy complejos con sistemas difíciles de estudiar, en los que participan e interactúan varios de estos sistemas de manera coordinada y regulada, no estamos capacitados para imaginar, entender y estudiar adecuadamente los múltiples efectos y cambios, incluyendo los epigenéticos, que ocasionarán la integración, la expresión y el rearrreglo del transgén proveniente de la bacteria *B. thuringensis*, en particular en el maíz transgénico.

Como parte de este rechazo a los transgénicos por supuestos daños, se han generado satanizaciones, señalamientos falsos y mentiras en torno a los transgénicos, sin un verdadero sustento científico. Como reflejo de lo anterior, algunos grupos han realizado acciones en contra de los transgénicos. Entre ellas, algunas han incluido ampararse ante el Poder Judicial de México para impedir la siembra de variedades de maíz y soya transgénicas. Otra ha sido la reciente publicación de un decreto en el estado de Yucatán que lo convierte en estado libre de cultivos OGM, lo cual consideramos una decisión injusta e inmoral, que viola el derecho del acceso a la tecnología por parte de los campesinos mexicanos, impidiendo que accedan a mejores herramientas para su desarrollo y beneficio, como sí ocurre en varios países de Iberoamérica y en Estados Unidos. La prohibición del uso de las plantas transgénicas es una decisión que impide la reducción de la pobreza en el campo mexicano y que contribuye al daño a la salud y al ambiente por contaminación, por el uso y abuso irresponsable de los insecticidas químicos, cuando se tiene la alternativa de los cultivos transgénicos. Aquí se recalca que todos los señalamientos por supuestos daños a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad por parte de los transgénicos, son falsos, sin un sustento científico sólido y verdadero.

El capítulo VII engloba las opiniones en favor y en contra de los organismos transgénicos. Ciertamente, como ha ocurrido con otros descubrimientos y tecnologías relacionadas, cuando la sociedad no tiene conocimiento claro de sus beneficios tiende a magnificar y a veces a distorsionar sus posibles riesgos, siendo ésta



una de las causas por las cuales, por ejemplo, la teoría de la evolución de las especies, el cambio climático y los transgénicos son rechazados por diferentes grupos. Estas posturas contrastan con el apoyo que reciben los OGM en otros lugares y contextos, particularmente de los productores, en especial en Estados Unidos y en países de Iberoamérica. Así, aunque globalmente nos vamos aproximando a un consenso cada vez mayor de los beneficios que los OGM nos ofrecen, no habrá unanimidad por los muchos intereses que se tocan, en particular, la producción de alimento, controlada por las empresas transnacionales que producen también los insecticidas y herbicidas químicos y biológicos, como se ha señalado en el capítulo anterior. No obstante, podríamos decir que el control de las semillas por parte de las compañías transnacionales, es la principal razón de rechazo a las plantas transgénicas.

El capítulo VIII expone la política científica y aborda la urgente necesidad de desarrollar un gran programa de biotecnología agrícola nacional como parte de una estrategia para mejorar la capacidad para producir alimentos. En este espacio se señala que la biotecnología en México se considera una actividad estratégica para coadyuvar a la sustentabilidad del medio ambiente y la seguridad alimentaria, conforme al vigente Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2013–2018. Lo anterior, de acuerdo con la Ley de Bioseguridad de OGM que mandata establecer instrumentos que fomenten la investigación científica y tecnológica en bioseguridad y biotecnología. También se señala que en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental se contempla a la biotecnolo-

gía como “Una tecnología que utiliza recursos biológicos, organismos vivos o sus derivados, para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos”, lo que indica que esta ley prevé el uso de la biotecnología y, por ende, de los organismos transgénicos para utilizar responsablemente la biota, atendiendo grandes demandas y abusos ocasionados por otras tecnologías. Lo anterior debería lograrse en conjunción y articulación con la Ley de Bioseguridad de OGM, como se analiza con más detalle en el marco jurídico presentado en el capítulo X. Congruente con lo señalado, en este capítulo VIII se indica la importancia de fortalecer el trabajo de investigación científica y tecnológica y, en particular, biotecnológica, para desarrollar nuestras propias plantas transgénicas, y se mencionan dos ejemplos de cultivos transgénicos de tercera generación con propiedades extraordinarias. Estos cultivos han sido desarrollados en México por investigadores mexicanos para contribuir a una producción sustentable de alimentos y contender con problemas relacionados con el cambio climático y la contaminación ambiental. Al final del capítulo se comenta el asunto de la propiedad comercial de las variedades transgénicas resistentes a insectos, de las cuales sus patentes vencen pronto, ya que su uso inició en el año 1996. Se enfatiza en que hay que aprovechar esta coyuntura y verla como una oportunidad para diseñar y construir semillas transgénicas mexicanas adecuadas, con ventajas para atender problemas y necesidades de México y otras partes del mundo. Sin embargo, recalamos que es necesario que los campesinos mexicanos tengan la información correcta sobre los

beneficios de las plantas transgénicas y el acceso a las tecnologías que les permitan contender con los problemas del campo hoy, entre ellas: semillas transgénicas, que se usan desde hace varios años en nueve países de Iberoamérica (incluyendo España), en Estados Unidos y en Canadá, y las que estamos desarrollando en México. Esto no implica que deba imponerse ninguna tecnología, sino ofertarlas y detallar estas alternativas, comparando las ventajas y desventajas de las diferentes opciones, con la intención de que los campesinos y los agricultores tengan alternativas para escoger. También en este capítulo se señala la importancia de sumar los conocimientos y las capacidades del campo mexicano con las de las instituciones nacionales de investigación para contender con los grandes problemas y las necesidades del país, en el contexto del cambio climático y en la defensa de las variedades nativas.

El capítulo IX presenta un tema de naturaleza ecológica que consiste en el análisis del vasto conjunto de evidencias publicadas que sustentan científicamente que los organismos transgénicos son creados por procesos de transferencia horizontal de ADN, similares a los procesos de transgénesis que han ocurrido y ocurren en la naturaleza y que, por ende, son organismos vivos con niveles de riesgo similares a los que existen en la biota. Aquí se incluye un inciso donde se señalan varios ejemplos de diferentes eventos de transferencia horizontal de ADN que han ocurrido a lo largo del tiempo, en diferentes organismos vivos, que han generado ganancias y ventajas a los organismos receptores, por lo que se han establecido o estabilizado como parte del genoma del organismo

receptor. Entre estos ejemplos se encuentran las plantas que han recibido genes de bacterias a lo largo del tiempo, lo que les ha conferido capacidades extraordinarias, entre ellas, la fotosíntesis y también un camote que lleva genes de una bacteria, lo cual proporciona ventajas a los agricultores. Y, como se ha señalado antes, están también las plantas transgénicas creadas por el hombre, que tienen nuevas y específicas capacidades para contender contra plagas de insectos y la posibilidad de crecer en condiciones de sequía y calor. Se insiste en que la transgénesis es un fenómeno natural que ha ocurrido y seguirá ocurriendo en la biodiversidad, independientemente de los transgénicos. Ésta ha sido responsable de la adquisición de muchas funciones nuevas, en particular en las plantas y, en alguna medida, la transferencia horizontal de ADN ha sido responsable de la evolución de las especies, situación difícil de aceptar por los ecólogos tradicionales. La razón principal que sustenta este fenómeno de la transgénesis es que la estructura general de la doble hélice de la molécula del ADN, presente en todos los organismos vivos, incluyendo los seres humanos, es la misma. Esto permite que el ADN que llega a una célula receptora por un proceso de transferencia horizontal de cualquier origen, pueda ser incorporado como parte de su genoma. Sin embargo, aquí se señala que todos los organismos vivos actuales han adquirido funciones que permiten contender con, y eliminar, los ADN de diferentes orígenes que pudieran llegar por transferencia horizontal de ADN; en particular, las infecciones causadas por los virus, aunque existen bacterias que pueden transferir horizontalmente parte de su

material genético a las células de las plantas que infectan. Por ello hoy, la transgénesis es un fenómeno poco frecuente, pero ocurre, en particular mediada por ciertos virus y por algunas bacterias.

El capítulo X enlista las consideraciones necesarias para un manejo responsable de los transgénicos e incluye el análisis del marco jurídico a nivel nacional e internacional para el manejo de este tipo de organismos que en nuestro país está normado, como se ha señalado, por el Protocolo de Cartagena, la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM), así como el reglamento de dicha ley. Se incluye también un análisis de los documentos elaborados por varias agencias y organismos internacionales y la situación de varios países, con relación a los cultivos transgénicos y a las compañías transnacionales que son dueñas de las patentes y, por ende, controlan el mercado. De hecho, se señala que en el año 2016 la compañía europea Bayer inició las propuestas para comprar a la empresa Monsanto, y la compañía china ChinaChem adquirió a Syngenta, buscando fortalecer la capacidad para producir alimentos en China.

Finalmente, el Comité de Biotecnología de la AMC presenta en el capítulo XI las consideraciones y conclusiones finales para un uso responsable y sustentable de la biotecnología y de los transgénicos construidos por transferencia horizontal de ADN, para así hoy atender grandes problemas y dar solución a demandas de la sociedad. En este capítulo se vuelve a insistir en la ausencia de daño por la ingesta de alimentos transgénicos y, por el contrario, los amplios beneficios de estos organismos en di-

ferentes sectores. Asimismo, se señala que la biotecnología y los transgénicos son una tecnología amigable con la salud, la biota y el medio ambiente. Se resumen y se retoman los elementos más importantes señalados y analizados a lo largo de los diferentes capítulos del libro, como el hecho de que las plantas transgénicas que llevan sus propios genes bioinsecticidas fueron diseñadas para contender con las plagas de insectos y reducir simultáneamente el uso de insecticidas químicos que se usan en el campo. También que los cultivares transgénicos representan una tecnología perfeccionada, llamada “agricultura de precisión” en el documento del año 2016 avalado por 123 premios Nobel, porque es superior, más avanzada por lo preciso, a diferencia de las anteriores con las que contábamos para lidiar con las demandas en el campo y las problemáticas de contaminación del medio ambiente y de la salud humana. Esta tecnología ha permitido reducir los tiempos y la incertidumbre en la creación de los nuevos cultivares en beneficio de la sustentabilidad del medio ambiente y de la sociedad. Se señala que, por todos los beneficios comentados y por el uso cada vez más frecuente y amplio de medicamentos y alimentos transgénicos —principalmente plantas—, el planeta se está moviendo hacia una bioeconomía sustentada en la biotecnología.

Se indica también que las plantas transgénicas han sido amplia y reiteradamente caracterizadas, como alimentos y como organismos vivos, mediante las ciencias ómicas (genómica, proteómica, transcriptómica, metabolómica) por muchos grupos alrededor del mundo de manera independiente, y los resultados indican que

son muy parecidas a los cultivos parentales. No se detectaron cambios importantes, ni inesperados y, por lo tanto, son metabólica y sustantivamente equivalentes. Nos referimos aquí a la equivalencia que existe entre las variedades silvestres y las modificadas en términos de la expresión de genes, de la síntesis de proteínas y de los productos resultantes de la actividad metabólica de los organismos vivos (metabolitos). Además, se reitera que las autoridades y agencias encargadas de la sanidad e inocuidad de alimentos y medicamentos en diferentes países y regiones, incluyendo Europa, no han retirado del mercado ninguno de los productos transgénicos que se comercializan actualmente, aunque algunos de los cultivos transgénicos han sido cuestionados y reevaluados, sin que esto haya cambiado la decisión tomada. La amplia y contundente evidencia científica indica que no existen pruebas que constaten ningún daño por consumo de plantas transgénicas.

También se señala que las compañías transnacionales, dueñas de las patentes, están realizando un conjunto de acciones que buscan seguir controlando el mercado de los alimentos. Cabe destacar aquí la relevancia de que la biotecnología es un área estratégica en México, según el PND y el PECiTI vigentes, conforme a la Ley de Bioseguridad de OGM que mandata establecer mecanismos para fomentar la investigación científica y tecnológica en bioseguridad y biotecnología. Las plantas transgénicas, incluyendo dos ejemplos de tercera generación con propiedades extraordinarias, diseñadas para contender con graves problemas y desarrolladas en México, conjuntamente con otras variedades y experiencias, deben utilizarse

para fortalecer el desarrollo del campo mexicano y la seguridad alimentaria, fomentando una producción sustentable de alimentos. Esta estrategia debe contemplar el desarrollo de plantas transgénicas propias pero debe sumar, de manera inteligente y creativa, los conocimientos que existen en el campo mexicano con los trabajos de liderazgo internacional para realmente poder contender con las grandes demandas y los problemas que hoy enfrentamos, como la producción sustentable de alimento, el cambio climático y la defensa de las variedades nativas; todo esto realizado particularmente en centros de investigación mexicanos que desarrollan biotecnología y variedades transgénicas de tercera generación.

El capítulo XI también expone la preocupación por las acciones y los señalamientos en contra de los transgénicos, muchos sin sustento, que impiden su uso en nuestro país. Entre ellos, los amparos ante el Poder Judicial, y un reciente decreto en el estado de Yucatán que pretende convertir a este estado en uno libre de cultivos transgénicos. Se reitera que todos los señalamientos de supuestos daños a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad por parte de los transgénicos son falsos y carecen de sustento científico sólido. Al final de este capítulo se incluye un inciso sobre la importancia de la presente publicación en su versión electrónica de libre acceso, en aras de divulgar el conocimiento científico con el que se cuenta hoy día en esta materia.

Las referencias bibliográficas citadas en cada tema se presentan listadas al final de su respectiva sección o secciones. También se incluyen allí referencias relacionadas con el tema,



aunque no necesariamente se hayan señalado en el segmento; éstas son referencias que presentan asuntos vinculados con el tema tratado en esa sección y que pudieran proporcionar sustento adicional. Por otro lado, se incluyen evidencias científicas y técnicas publicadas en revistas, libros y reportes, en particular de las academias de ciencias y de medicina de diferentes países, en especial de Estados Unidos y Europa, que sustentan los diferentes argumentos y consideraciones específicas presentadas. Finalmente, se incluye un listado al término de cada capítulo con las referencias bibliográficas del capítulo. Consideramos que esta presentación y organización de las referencias permite un análisis más adecuado de la información

Esta publicación contiene 10 anexos: el anexo 1 es un glosario; el anexo 2, un listado de hechos y eventos relevantes relacionados con el desarrollo de la biotecnología; el anexo 3, el documento “20 preguntas sobre los alimentos genéticamente modificados”, elaborado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). En esta última publicación, la OMS señala que los

alimentos de origen transgénico que se utilizan a la fecha no han ocasionado daño alguno a la salud humana o al medio ambiente. El anexo 4 contiene la lista de los 123 premios Nobel que han firmado la declaración reciente (año 2016) en apoyo a la biotecnología y a los cultivos transgénicos y más de 10,000 firmas adicionales; el anexo 5 es la declaración del año 2012 de 25 premios Nobel a favor de la biotecnología; el anexo 6 es un listado de las decenas de artículos revisados por ciencias ómicas en la publicación de Ricroch, 2013; el anexo 7 enlista los 44 artículos publicados sobre alimentación a roedores por periodos largos con alimentos transgénicos que señalan que no se presenta ningún daño por su consumo, publicados por Ricroch y colaboradores, 2014; el anexo 8 es la carta de las academias francesas en contra de la publicación de Séralini y colaboradores, 2012; el anexo 9 es un listado de respuestas a los cuestionamientos más importantes en contra de los transgénicos, y el anexo 10 es un listado de beneficios y ausencia de daño de los transgénicos en varios sectores.



CAPÍTULO II

BIOTECNOLOGÍA MODERNA: USO RESPONSABLE Y SUSTENTABLE DE LA BIODIVERSIDAD

- ADN, GENES Y PROTEÍNAS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA CÉLULA VIVA
- ORGANISMOS TRANSGÉNICOS Y NUEVAS TÉCNICAS DE EDICIÓN DE ADN PARA DESARROLLAR LAS SIGUIENTES GENERACIONES
- JUSTIFICACIÓN, PROPÓSITO Y AMPLIOS BENEFICIOS EN VARIOS SECTORES

INTRODUCCIÓN

BIOTECNOLOGÍA, ACTIVIDAD RESPONSABLE

El ser humano ha utilizado a otros seres vivos para satisfacer sus necesidades de alimento, salud y vivienda, y en este proceso ha dañado y abusado del planeta y de su biodiversidad. Muchos recursos naturales se agotan, la productividad agropecuaria es insuficiente y el crecimiento explosivo de la población impone, cada vez más, la necesidad de producir más alimentos y más medicamentos en un escenario global con mayor contaminación del planeta y con efectos graves debido al cambio climático. De ahí la relevancia, hoy y en el futuro, del desarrollo de la biotecnología moderna, actividad multidisciplinaria que contribuye al estudio y caracterización de los organismos vivos que integran la biodiversidad. Conjuntamente con otras tecnologías, la biotecnología

pretende la utilización respetuosa de organismos vivos como parte de una respuesta integral, responsable y sustentable, a las graves problemáticas y demandas presentes y futuras del planeta.

La biotecnología es una actividad responsable. Comparada con otras, en particular con aquellas que utilizan compuestos químicos recalcitrantes, dañinos y contaminantes, es una tecnología amigable y sustentable para la salud, la biota y el medio ambiente. La biotecnología se utiliza en México desde tiempos prehispánicos en el manejo de la biota para satisfacer necesidades y afrontar problemas, y tiene potencial para aligerar el impacto de la actividad agropecuaria en el medio ambiente. El reto es desarrollar, proveer y manejar la biotecnología de manera responsable e inteligente, incluyendo los organismos transgénicos construidos mediante técnicas

de ingeniería genética que, por sus amplios beneficios, coadyuven a atender demandas y necesidades.

La biotecnología es una actividad multidisciplinaria cuyo sustento es el conocimiento generado en otras ramas que incluyen la bioinformática, las ciencias ómicas (genómica, proteómica, transcriptómica y metabolómica) y las nuevas técnicas de edición de genomas tipo CRISPR-Cas9, las cuales permiten modificarlos y editarlos, y que se describen más adelante en este capítulo. Nuevos organismos transgénicos de siguiente generación serán ciertamente construidos por estas técnicas, ya que son más avanzadas y precisas, y dado que se cuenta ya con ejemplos en el campo. El conjunto de estos conocimientos y capacidades metodológicas permiten el estudio integral, la modificación y la utilización inteligente —con base en el cono-

cimiento científico acumulado durante cientos de años— de los seres vivos que integramos la biota, incluyendo humanos, microorganismos, plantas y animales que formamos parte del planeta (ver figura II.1).

A partir de lo anterior, la biotecnología busca hacer un uso responsable y sustentable de la biodiversidad mediante el desarrollo de procedimientos eficaces, limpios y competitivos que facilitan la comprensión y eventual solución de problemas en materias de salud, producción agropecuaria e industrial, biorremediación al daño del medio ambiente y de los efectos de sequías y cambio climático. Entre estas capacidades biotecnológicas se encuentran indudablemente los organismos transgénicos. El propósito principal de este capítulo es describir en detalle las técnicas de ingeniería genética que se han usado para construir los transgénicos y

señalar que se trata también de una biotecnología amigable a la salud, a la biota y al medio ambiente, que otorga beneficios a diferentes sectores y que no representa daño por su utilización, como se detalla más adelante. Antes de describir estas técnicas es importante analizar cómo se encuentra organizada la célula viva y cuáles son las moléculas biológicas informacionales como el ácido desoxirribonucleico (ADN), el ácido ribonucleico (ARN) y las proteínas que permiten el funcionamiento celular y que se presentan en la siguiente sección.

Integrado por especialistas en diferentes disciplinas, profesores e investigadores de diferentes instituciones, el Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) ha elaborado desde el año 2000 varios documentos sobre biotecnología moderna, sus importantes aportaciones y beneficios, incluyendo una publicación de 2011 sobre el uso responsable de los organismos genéticamente modificados (OGM) que es el antecedente de este libro. Dichos documentos se incluyen en el listado de referencias y pueden ser consultados en libre acceso en la página de la AMC, a fin de orientar e informar a la opinión pública y a la sociedad.

El anexo 2 muestra un listado cronológico de las contribuciones científicas y tecnológicas mediante procesos biotecnológicos más importantes y de su utilización sustentable y responsable para satisfacer las necesidades de alimentación y salud de los seres vivos. Incluye también acontecimientos científicos relevantes relacionados con la célula viva, su modificación por técnicas de ingeniería genética y las técnicas CRISPR-Cas9 para editar el genoma.

Existe una vasta literatura sobre los fundamentos y los casos exitosos de la biotecnología moderna y los transgénicos. El capítulo III presenta un amplio conjunto de reportes de academias de ciencias y medicina de distintos países, así como declaraciones firmadas por premios Nobel a favor de la tecnología biológica y los transgénicos. También indica que, entre la literatura sobre biotecnología y beneficios de los transgénicos, se encuentran algunos libros en español escritos por el Comité de Biotecnología de la AMC, los cuales pueden ser consultados en acceso libre en las páginas electrónicas de la AMC y de otras instituciones de educación superior, investigación y cultura donde laboran los miembros de dicho comité.

Watson y Crick, 1953; Itakura et al., 1977; NSTC, 1995; Watson y Crick, 1996; Glick y Pasternack, 1998; Bolívar et al., 2002; Daar et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Herrera Estrella y Martínez, 2003; Ortiz y Ezcurra, 2003; Kreuzer y Massey, 2005; Arias, 2007; Barrera, 2007; Bolívar, 2007; Bolívar et al., 2007; Gracia, 2007; Herrera Estrella et al., 2007; López-Munguía, 2007; Ramírez y Uribe, 2007; Revah y Ortiz, 2007; Soberón y Golubov, 2007; Soberón y Montero, 2007; Torres et al., 2007; Viniestra, 2007; Gibson et al., 2010; Bolívar et al., 2011; Hayden, 2011; Popp et al., 2012; Jinek et al., 2012; Cong et al., 2013; Mali et al., 2013; Jinek et al., 2013; Qi et al., 2013; De Souza, 2013; Gilbert et al., 2014; Smith, 2013; Mulet, 2014; Potsova, 2014; Fuentes y LaBaer, 2014; Bishop et al., 2014; Keinstiver et al., 2015; Nihongaki et al., 2015; Maxmen, 2015; Ledford, 2016; Larqué-Saavedra, 2016; Hutchinson III et al., 2016

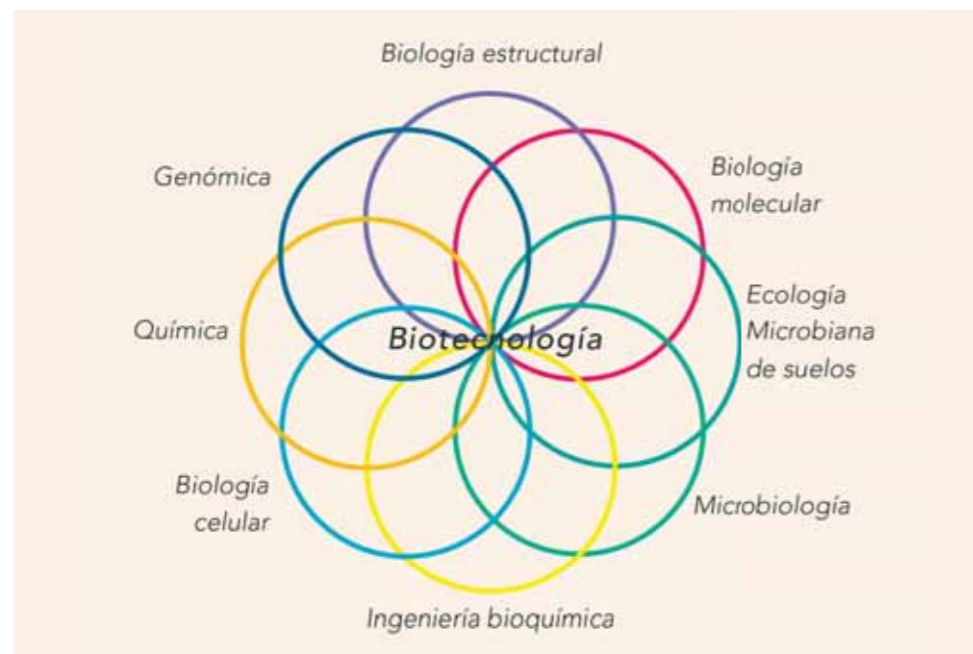


Figura II.1. La biotecnología es una actividad multidisciplinaria.

LA DOBLE HÉLICE DEL ADN Y EL FUNCIONAMIENTO DE LA CÉLULA VIVA. GENES Y PROTEÍNAS

Propiedades extraordinarias de la molécula del ADN. Dogma central de la biología

En 1953 James Watson y Francis Crick descubrieron la estructura maravillosa de la doble

hélice del ADN, la molécula biológica donde reside la información genética y las capacidades de vida en todos los seres vivos. El ADN, molécula presente en las células de todos los organismos vivos, incluyendo los humanos, es una doble hélice formada por dos polímeros antiparalelos y complementarios (ver figura II.2). Cada uno de estos dos polímeros o héli-

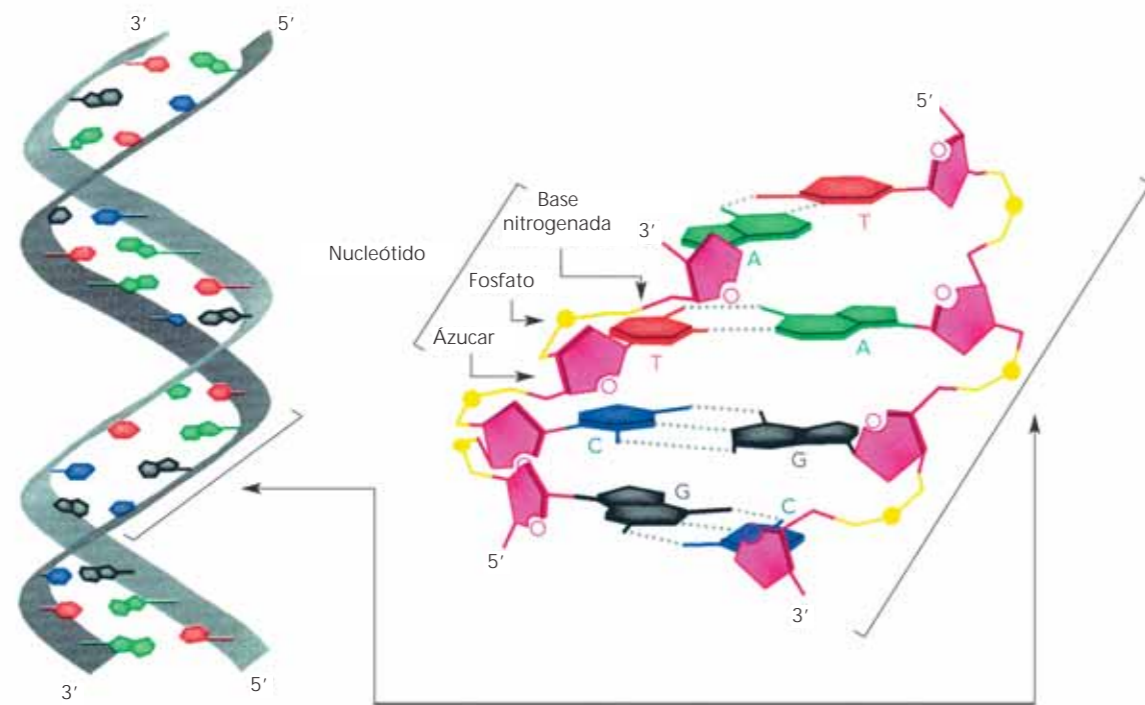


Figura II.2. Estructura del ADN integrado por dos hélices complementarias. Cada una de estas dos hélices o hebras de la molécula de ADN está integrada por los mismos cuatro tipos de nucleótidos (A,G,C,T). Cada nucleótido está formado por una molécula de azúcar, desoxirribosa (en morado), un grupo fosfato (PO₄) (en amarillo) y un tipo de molécula llamada base púrica (G [en negro] o A [en verde]) o base pirimidica (C [en azul] o T [en rojo]). Los nucleótidos con timina (en rojo) se aparean por dos uniones débiles de puentes de hidrógeno con los nucleótidos de adenina (en verde) y las nucleótidos con citosina (en azul) se aparean, mediante tres uniones débiles, con los nucleótidos de guanina (en negro). Esta estructura general de doble hélice es la misma en todos los seres vivos y permite su funcionamiento, incluyendo la replicación. La secuencia de los nucleótidos en el ADN es la que tienen los nucleótidos uno inmediatamente después del otro en cada hélice o hebra. Así, en este ejemplo encorchetado, la secuencia de este ADN en la hélice de la izquierda en oscuro (que va 5' a 3' y de arriba hacia abajo), es C, G, A, T y continúa en C, A, T, G, T, C, A. Se dice que las dos hélices son complementarias porque para ambas hélices a cada A le corresponde una T, a cada G una C, a cada T una A y a cada C una G. Por ello, la secuencia de nucleótidos de una hélice es complementaria a la otra. El genoma humano tiene más de tres mil millones de pares de nucleótidos en sus 23 pares de cromosomas. Si se sumaran todas las moléculas de ADN de nuestros cromosomas medirían más de dos metros, mientras que las bacterias tienen alrededor de cuatro millones de pares de nucleótidos en un solo cromosoma. Se ha determinado la secuencia nucleotídica del genoma de cientos de organismos, incluyendo el humano.

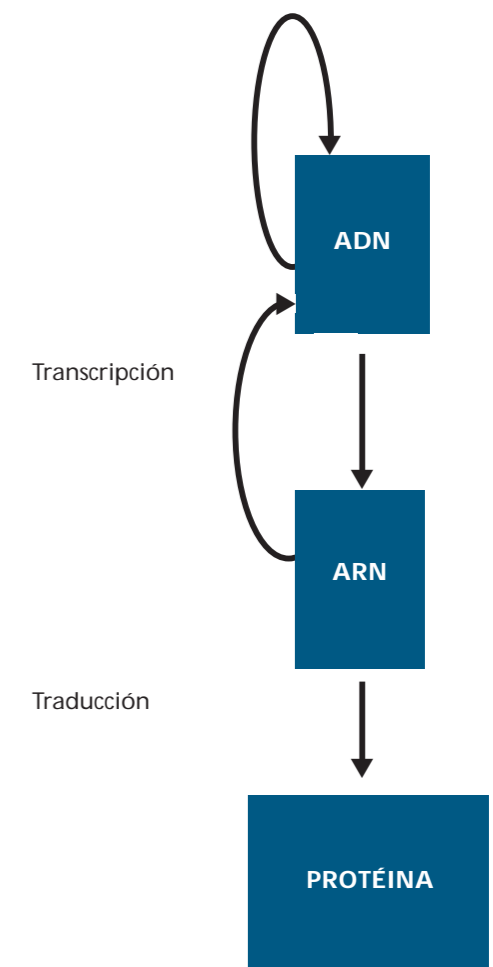
ces está integrado a su vez por la unión de millones de monómeros que son como las cuentas de un collar (polímero). Existen solamente cuatro tipos de monómeros o letras genéticas en el ADN de los seres vivos, los cuales son llamados nucleótidos o bases. Éstos se encuentran localizados a 3.4 Å del siguiente monómero en el polímero que forma cada una de las dos hélices (un Å es la diezmillonésima parte de un metro). Para todo tipo de ADN a un nucleótido con base adenina (A) le corresponde siempre, en el nucleótido de la hebra o hélice complementaria, uno con base timina (T). A todo nucleótido con base guanina (G) le co-

rresponde un nucleótido con base citosina (C) en la hebra complementaria. Éstas son reglas universales para todo ADN de todo ser vivo. La diferencia fundamental entre todos los ADN es la secuencia u orden de estos cuatro tipos de nucleótidos con sus bases A, T, G y C de cada molécula, en las cuales hay varios millones de nucleótidos. De la misma manera en que sólo hay 27 letras en el alfabeto para formar todas las palabras, la secuencia de estas letras en las palabras es la que da un significado distinto a cada una de ellas.

Gracias a los trabajos posteriores de Crick, Watson, Brenner, Ochoa y Messelson, entre

Figura II.3. Dogma central de la biología. El dogma central de la biología indica el flujo de información genética. En el ADN de todas las células de los organismos vivos se encuentran los genes, que son fragmentos o segmentos de esta molécula (ver figura II.4). A partir de la información localizada en los genes de la doble hélice de ADN (ver figura II.2) una célula sintetiza todas sus proteínas y aquellas moléculas de ARN que no se convierten en proteínas. Esto ocurre mediante dos mecanismos: el primero es la transcripción del ADN, que es la copia o síntesis de moléculas de ARN usando regiones específicas, incluyendo primariamente los genes del ADN, que utilizan esta molécula como templado o molde (ver figura II.6).

El segundo mecanismo, llamado traducción, permite la síntesis de proteínas a partir de moléculas de ARN mensajero (ARNm), copiadas a partir de los genes. La síntesis de las proteínas ocurre en las estructuras celulares llamadas ribosomas que usan un código genético para lograr lo anterior. Este código es universal, es decir, todos los organismos vivos incluyendo los humanos lo emplean (ver figuras II.7 y II.8). El ADN tiene la capacidad de copiarse mediante el mecanismo de replicación y formar dos moléculas de ADN idénticas a partir de una sola (ver figura II.5). Ciertos virus que tienen ARN como material genético, llamados retrovirus (como el VIH que causa el SIDA), tienen la capacidad de sintetizar ADN viral a partir de sus moléculas de ARN. Por ello, a este proceso se le conoce como transcripción reversa, ya que sintetiza ADN a partir de ARN y está mediado por una proteína de origen viral llamada transcriptasa reversa. La transcripción reversa es un proceso consistente y congruente con el dogma central y lo refuerza.



otros, y tomando la estructura de la doble hélice del ADN como principio, fue posible describir los mecanismos generales celulares involucrados en la decodificación de la información genética de la célula viva, dando lugar a la replicación del ADN, la transcripción de ADN en ARN y la síntesis de proteínas a partir de la traducción de moléculas de ARN mensajero. Este conjunto de capacidades se conoce como el “dogma central de la biología” y se detalla en la figura II.3. La capacidad de autorreplicación del ADN permite su duplicación en dos moléculas idénticas de doble hélice a partir de una sola molécula de hélice doble. Gracias a esta extraordinaria capacidad, que constituye una de sus principales características y en la cual reside la esencia de la vida biológica, es

posible la transferencia de una copia del material genético a las células hijas (ver figura II.5).

ADN, cromosomas y genes. El proceso de la replicación del ADN

El ADN forma parte de los cromosomas, los cuales son estructuras que se localizan en el núcleo de los organismos eucariotes, como las células de plantas y animales, incluyendo el humano. Las bacterias no tienen núcleos en sus células y por ello se les denomina procariones y tienen un solo cromosoma. Los genes, tanto en procariones como en eucariotes, son segmentos de las moléculas de ADN que forman parte de los cromosomas (ver figuras II.4 y II.5). Como indica la figura anterior, la

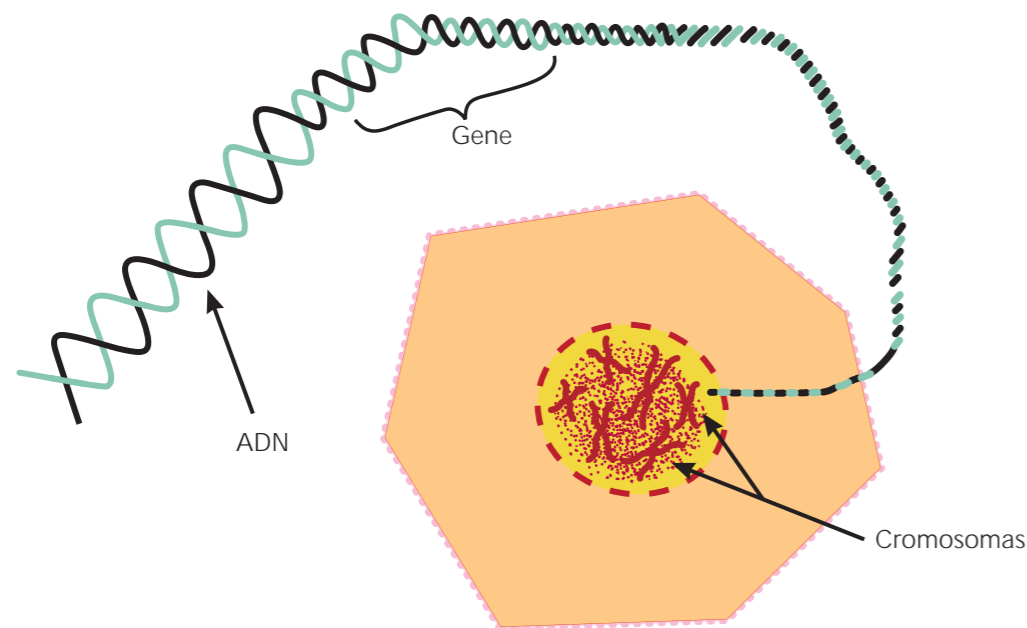


Figura II.4. Composición y organización de los genes en los cromosomas.

Los cromosomas son estructuras celulares que se encuentran localizados en el núcleo de la célula de animales y plantas y están integrados por proteínas y ADN (ver figura IX.11). Los genes son segmentos específicos de esta cinta genética de ADN. Cada especie de organismo tiene un número específico y diferente de cromosomas y de genes en relación a los demás seres vivos.



Figura II.5. Cromosomas en proceso de replicación.

A partir de un cromosoma se sintetizan o copian dos cromosomas idénticos. La estructura de doble hélice del ADN permite su replicación o copia, que es la formación de dos dobles hélices de ADN idénticas entre sí y a la doble hélice original, a partir de una sola doble hélice. Esto ocurre utilizando y copiando la secuencia de nucleótidos de ambas hélices que son complementarias (figura II.2). A partir de cada hebra se sintetiza la cadena complementaria que lleva la secuencia de nucleótidos complementarios. En este sentido, en las nuevas hélices, a cada adenina corresponde una timina, a cada guanina una citosina, a cada timina una adenina y a cada citosina una guanina. La figura muestra una caricatura de la replicación de cromosomas donde cada uno está integrado por una sola y única molécula de ADN, a la que se le asocian proteínas, particularmente las histonas, para compactarlo y darle estructura. Como se señala más adelante (ver figura II.11), el ADN de los cromosomas se empaqueta en el interior del núcleo que tiene un diámetro de 10 micrómetros. Las proteínas llamadas histonas desempeñan un papel fundamental en este proceso.

mayoría de éstos, en el caso de los eucariotes, codifican para una o varias proteínas específicas de ese gen. El resto de los genes codifican para moléculas de ARN que no se traducen, es decir, que su información no se convierte en proteínas y tienen muchas funciones diferentes, entre ellas formar parte de los ribosomas y de los ARN de transferencia utilizados en

procesos de síntesis de proteínas, así como de ARN pequeños no codificantes que participan en la regulación de la traducción, la estabilidad de los ARN mensajero, en la metilación de regiones específicas de ADN y en la regulación epigenética del genoma, como se señala en detalle más adelante en este capítulo. Algunas regiones de los cromosomas también se pueden

transcribir en ARN largos y no codificantes para proteínas que aparentemente participan en la regulación de la transcripción de algunos genes o en la modificación de cromatina, pero sus funciones reales aún siguen bajo estudio (ver figuras II.4, II.5, II.6, II.7, II.8 y II.11).

La doble cadena del ADN en los cromosomas de células con núcleo se enrolla alrededor de moléculas de proteínas llamadas histonas y de otras, las cuales tienen la capacidad de empaquetar y desempaquetar la doble hélice del ADN. La fibra resultante se enrolla y se empaqueta aún más para formar los cromosomas. Cada cromosoma está integrado por una sola molécula de ADN que mide en promedio, en el caso de células humanas, alrededor de 5 cm. Así, el total de ADN en las células humanas, que contienen 23 pares de cromosomas, es poco más de dos metros. La capacidad de empaquetamiento de ADN de las células es asombrosa, pues tienen que empaquetar dos metros de ADN en el núcleo de la célula humana y luego desempaquetarlo para hacerlo accesible y funcional. Las histonas y otras proteínas ayudan a desenrollar el ADN de los cromosomas para exponer las regiones que la célula decide y puede transcribir en moléculas de ARN. Estas regiones del cromosoma que se desempaquetan o se desenrollan asociadas a proteínas (principalmente histonas) son llamadas cromatina. En la cromatina se localizan los genes que se pueden copiar (expresar o transcribir) en moléculas de ARN (ver figuras II.4 y II.5). El papel que desempeñan estas moléculas biológicas en el empaquetamiento y la regulación epigenética se presenta con mayor detalle en la sección sobre epigenética de este capítulo y en la figura II.11.

El proceso de transcripción del ADN para sintetizar diferentes tipos de moléculas de ARN

Como se ha visto, la célula copia o transcribe la información de los genes en moléculas de ARN. Como puede verse en la figura II.6, el proceso de la transcripción del ADN se lleva a cabo principalmente por la enzima ARN polimerasa apoyada por otras proteínas. Este aparato celular separa las dos hebras del ADN y, usando una de éstas como molde, sintetiza las moléculas de ARN mensajero que en la figura se muestra como una cinta roja. Así se copian regiones específicas del ADN, que incluyen los genes, en moléculas de ARN que son copias de una sola hélice. Las moléculas de ARN son polímeros lineales compuestos de centenas de cuatro diferentes nucleótidos: A, G, C y U, donde la diferencia primaria con el ADN es que la base uracilo (U) es utilizada en lugar de la timina (T), la cual se usa durante la síntesis del ADN. Las moléculas de ARN mensajero que llevan la información de los genes son las intermediarias en la síntesis de las proteínas. Su información es utilizada en los ribosomas para traducirse en proteínas (ver figura II.8). Existen muchas regiones de ADN en los cromosomas que se transcriben en moléculas de ARN y, al no ser traducidas en proteínas, desempeñan una multitud de funciones, entre otras la de participar en la síntesis de proteínas como parte de los ribosomas, los cuales son estructuras integradas por moléculas de ARN y de proteínas. Las moléculas de ARN también participan en la regulación epigenética. Asimismo, ciertos tipos de ARN pueden llevar a cabo o catalizar reacciones químicas como lo hacen las proteínas con actividad enzimática. No es

motivo de este libro entrar en detalles sobre el funcionamiento de los distintos tipos de ARN, y existe amplia información al respecto. En el glosario se detallan diferentes tipos de ARN.

Todos los seres vivos utilizamos el mismo código genético (ver figura II.7) para convertir y traducir o leer la información codificada en ácidos nucleicos (ADN y ARNm) en secuencias o collares de aminoácidos que constituyen las proteínas (ver figuras II.8 y II.9). El código genético es universal, es decir, es el mismo para todos los seres vivos, y se utiliza de la misma forma en todas las células (ver figura II.7). Este código permite que la célula traduzca en proteínas la información genética almacenada en los genes mediante la lectura en bloques de tres nucleótidos (tripletes o codones), de la información genética presente en el ARNm. Las proteínas son polímeros; largos collares biológicos de decenas o centenas de aminoácidos en las cuales cada aminoácido (o cuenta del collar) es un monómero (ver figuras II.8 y II.9). La célula cuenta con 20 aminoácidos diferentes para integrar las más de 100,000 proteínas del cuerpo humano. Se puede hacer una analogía entre las letras del alfabeto, que serían los aminoácidos, y las palabras, que serían las proteínas:

el orden de las letras es responsable del significado de las palabras, de la misma manera que el orden de los aminoácidos en la proteína es responsable de su significado o función biológica.

Cada uno de los 20 aminoácidos está codificado por un triplete o codón de tres nucleótidos a nivel del ARN mensajero. El ARN mensajero es, pues, una molécula con información formada por la secuencia de sus nucleótidos. Esta información se traduce o convierte en proteínas cuando estos nucleótidos son leídos de tres en tres en los ribosomas, como se muestra en la figura II.8 (ver también figura IX.11).

Un código genético de cuatro letras (A, G, C, T) organizado en tripletes genera 64 diferentes codones. La figura II.7 muestra estas 64 combinaciones. Se puede observar que existen aminoácidos codificados por seis diferentes tripletes como la leucina (Leu) y aminoácidos como el triptofano (Trp), que sólo está codificado por un triplete (TGG). Existe un codón ATG que codifica para la metionina, el aminoácido con el que inician la mayor parte de las proteínas. Existen también tres codones TGA, TAA y TAG: tripletes que al leerse en los ribosomas se encargan de que el proceso de traducción finalice, es decir,

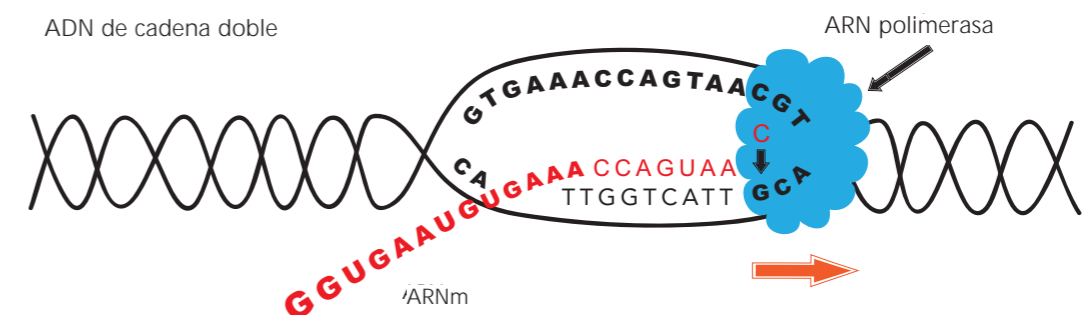


Figura II.6. El fenómeno de la transcripción del ADN permite la síntesis del ARN a partir de los genes y de otras regiones de ADN.

que la síntesis de una molécula de proteína se termine en este tipo de triplete, liberándose de los ribosomas (ver figuras II.7 y II.8).

Síntesis de proteínas en los ribosomas a partir de la traducción de información de las moléculas de ARN mensajero

Como se ha indicado, las proteínas son polímeros biológicos, collares de 20 diferentes cuentas

o aminoácidos, y constituyen las herramientas biológicas moleculares que cada *célula viva* utiliza para llevar a cabo la mayoría de sus funciones. Algunos ejemplos de proteínas son la insulina, el colágeno, la tripsina y la hemoglobina, moléculas biológicas que llevan a cabo importantes funciones en nuestro cuerpo. La hemoglobina, por ejemplo, se encuentra en los glóbulos rojos de la sangre y lleva el oxígeno de los pulmones a las células de los tejidos. Otra proteína, la in-

Aminoácidos				Nucleótidos			
Alanina	Ala	A	Leucina	Leu	L	Guanina	G
Arginina	Arg	R	Lisina	Lys	K	Adenina	A
Asparagina	Asn	N	Metionina	Met	M	Timina	T
Ac. aspártico	Asp	C	Prolina	Pro	P	Citosina	C
Cisteína	Cys	D	Serina	Ser	S		
Fenilalanina	Phe	F	Tirosina	Tyr	Y		
Glicina	Gly	G	Treonina	Thr	T		
Ac. glutámico	Gln	Q	Triptófano	Trp	W		
Glutamina	Glu	E	Valina	Val	V		
Histidina	His	H	Terminación				
Isoleucina	Ile	I	de la traducción	fin			

NUCLEÓTIDO EN SEGUNDA POSICIÓN							
		G	A	T	C		
NUCLEÓTIDO EN PRIMERA POSICIÓN	G	GGG } Gly	GAG } Glu GAA } GAT } Asp GAC }	GTG } Val GTA } GTT } GTC }	GCG } Ala GCA } GCT } GCC }	G A T C	
	A	AGG } Arg AGA } AGT } Ser AGC }	AAG } Lys AAA } AAT } Asn AAC }	ATG } Met ATA } ATT } Ile ATC }	ACG } Thr ACA } ACT } ACC }	G A T C	
	T	TGG } Trp TGA } fin TGT } Cys TGC }	TAG } fin TAA } TAT } Tyr TAC }	TTG } Leu TTA } TTT } Phe TTC }	TCG } Ser TCA } TCT } TCC }	G A T C	
	C	CGG } Arg CGA } CGT } CGC }	CAG } Gln CAA } CAT } His CAC }	CTG } Leu CTA } CTT } CTC }	CCG } Pro CCA } CCT } CCC }	G A T C	
		NUCLEÓTIDO EN TERCERA POSICIÓN					

Figura II.7. El código genético es universal. Se presentan los 64 tripletes del código que codifican para los aminoácidos y las señales de terminación.

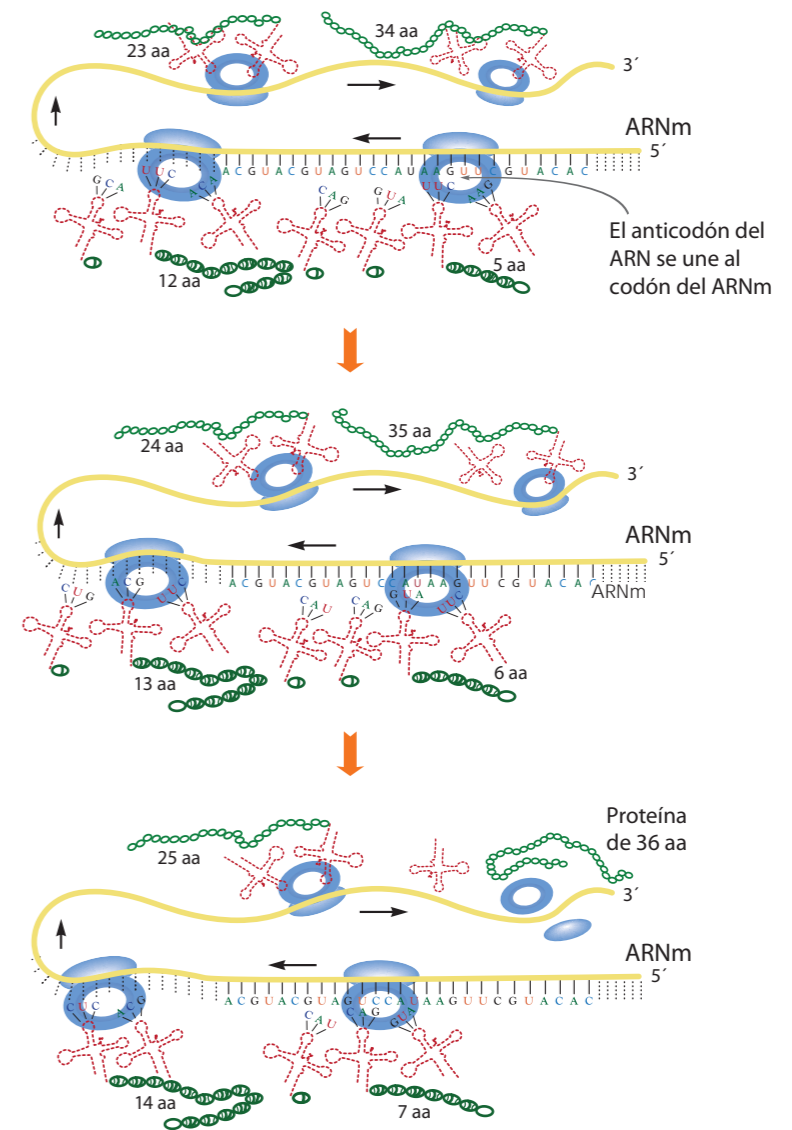


Figura II.8. Síntesis de proteínas. El ARN mensajero y su traducción en los ribosomas permite la síntesis de estos polímeros biológicos compuestos por 20 diferentes aminoácidos, es decir, proteínas.

ulina, tiene como función regular el nivel de la glucosa en la sangre. Cada proteína tiene una estructura terciaria en el interior de la célula, la cual está determinada por las secuencias primaria y secundaria de sus aminoácidos. Esta estructura terciaria (o cuaternaria) es responsable de su función biológica, como puede apreciarse

en la figura II.9. En los billones de células de un cuerpo humano hay alrededor de 100,000 proteínas, mientras que las bacterias, organismos unicelulares, contienen alrededor de 4,000.

La síntesis de proteínas ocurre a nivel de los organelos celulares llamados ribosomas (ver figura II.8). El ARN mensajero, que en la

figura se muestra como una cinta amarilla, es el intermediario en la síntesis de proteínas: en la figura, collares de cuentas verdes que corresponden a los aminoácidos. Al ser copia del gen, el ARN mensajero lleva la información de los genes a los ribosomas, donde se traduce en proteínas. Las cadenas de aminoácidos o proteínas son sintetizadas cuando los ribosomas (estructuras azules) se mueven leyendo sobre las moléculas de ARN mensajero, al igual que una cabeza lectora de cintas. Una sola molécula de ARN mensajero normalmente es utilizada para sintetizar varias moléculas de la misma proteína. En el ejemplo de la figura II.8, al ser leídas simultáneamente por varios ribosomas (cuatro en la figura), se sintetizan cuatro cadenas de la misma proteína. Los ribosomas están compuestos por ARN de dos tipos, ambos llamados ribosomales, y también están integrados por proteínas llamadas ribosomales. Se encuentran en el citoplasma de todas las células (ver también figura IX.11).

Durante el proceso de lectura del ARN mensajero por los ribosomas, los codones del mensajero se asocian con los anticodones complementarios de los ARN de transferencia (estructuras rojas), los cuales se encuentran “cargados” con los aminoácidos respectivos, de acuerdo con el *código genético* (ver figuras II.7 y II.8). Inmediatamente después ocurre un fenómeno de transferencia del aminoácido nuevo, el cual es incorporado a la cadena de proteína naciente compuesta por varios aminoácidos, previamente unidos entre sí. La sección superior de la figura II.8 muestra cuatro ribosomas en los que se ha iniciado la síntesis de proteínas y donde se han formado cuatro pequeñas

proteínas con 5, 12, 23 y 34 residuos de aminoácidos (aa) cada una, que se ven como cuentas verdes de los collares. En la sección media ha ocurrido el crecimiento de los collares de aminoácidos en las proteínas; en todas ellas el tamaño del collar ha crecido en un aminoácido adicional (6, 13, 24 y 35aa). Finalmente, en la sección inferior, el proceso de crecimiento ha permitido la incorporación de un aminoácido adicional en todas las cadenas de proteínas nacientes (7, 14, 25 y 36aa). De esta manera se lleva a cabo la elongación o crecimiento de estos polímeros o collares biológicos y, con ello, la síntesis de proteínas completas (36 aminoácidos en este caso), la cual se libera del ribosoma al finalizar la lectura del mensajero (como indica la última sección), liberándose asimismo el ribosoma que participó en la lectura del ARN mensajero.

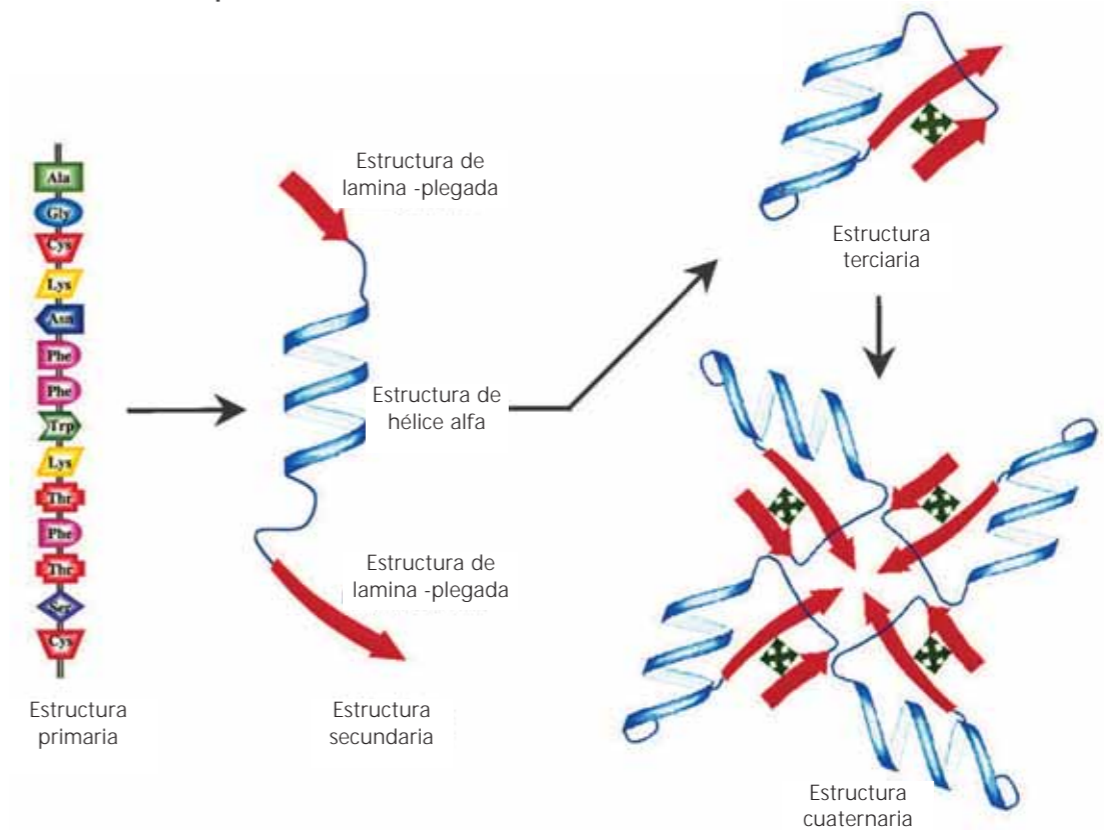
Proteínas: herramientas principales con que cuenta la célula para funcionar

Muchas proteínas tienen capacidades para cortar o unir diferentes compuestos o moléculas en las células de los organismos vivos, generando o sintetizando así nuevos compuestos o moléculas biológicas (ver figura II.9). También pueden romper o degradar diferentes compuestos o moléculas existentes en la célula. Por ello, a aquellas proteínas con dichas capacidades de unir o romper otros compuestos celulares, incluyendo las propias proteínas, se les denomina proteínas con capacidades enzimáticas, o simplemente enzimas. Muchas enzimas requieren energía biológica para llevar a cabo su trabajo y esta energía la provee

principalmente la molécula biológica llamada adenosina trifostato, o ATP. Las moléculas de ATP se producen en las células de organismos superiores como plantas y animales, incluyendo el ser humano, en los organelos llamados mitocondrias (ver figura IX.11), a partir de los alimentos que tales organismos ingieren, en particular el azúcar llamado glucosa. La glucosa se ingiere directamente o bien a tra-

vés de carbohidratos que consumimos como alimento, como parte del metabolismo celular. Tanto en procariones como en eucariotes, cada enzima tiene una función específica la cual está dada por su estructura (ver figura II.9). Ejemplos de enzimas son la tripsina que degrada o rompe otras proteínas en el estómago de animales, para aprovecharlas como alimentos, y la glucosa isomerasa, la cual mo-

La estructura de las proteínas



Las proteínas son las herramientas más importantes de la célula y la función de cada una de ellas es debida a su estructura.

Figura II.9. Estructura y función biológica de las proteínas.

Las proteínas son moléculas biológicas informativas. Son las herramientas principales que tiene la célula para funcionar. En ellas reside la información funcional de la célula. Algunos ejemplos de proteínas en el ser humano: la hemoglobina, que transporta el oxígeno de los pulmones a los tejidos a través de la sangre, la insulina, que regula el nivel de azúcar en la sangre y la tripsina, que degrada proteínas en el aparato digestivo. Cada proteína tiene una estructura específica tridimensional y cuaternaria para funcionar, la cual está dada por la secuencia primaria de los 20 diferentes aminoácidos, quienes son los componentes, o cuentas de los collares, de las proteínas.

difica químicamente la glucosa como parte de un proceso para utilizarla para diferentes propósitos, en particular la producción de jarabes. La biotecnología ha desarrollado procesos para el uso comercial de proteínas con capacidades enzimáticas con diferentes fines. Algunos ejemplos se presentan en la sección que trata sobre la utilización de proteínas, o enzimas de origen transgénico en la industria alimentaria.

Los humanos somos organismos pluricelulares compuestos por varios trillones de células; contamos con alrededor de 21,000 genes en 23 pares de cromosomas en los núcleos de cada una de nuestras células. Tenemos alrededor de 100,000 proteínas diferentes, codificadas por estos genes, para llevar a cabo la mayoría de nuestras funciones biológicas. Las bacterias, organismos procariotes compuestos por una sola célula, no tienen núcleo y tienen un solo cromosoma con alrededor de 4,000 genes que codifican para 4,000 proteínas con las que viven y funcionan. La genómica es la rama de la biología molecular que determina y estudia la secuencia de los nucleótidos que integran el ADN en cromosomas y del genoma, que es el conjunto de todo el material genético de ADN. En particular, la genómica se aboca a la caracterización y el funcionamiento de todos los genes que contiene un organismo, y su comparación con otros. El estudio de todas las proteínas que conforman el proteoma de un organismo se denomina proteómica. El conjunto de todos los ARN que conforman un organismo se llama transcriptoma; el conjunto de todos los metabolitos celulares de un organismo se denomina metaboloma y su estudio, metabolómica. El

conjunto de todas estas capacidades técnicas e información biológica para estudiar a un organismo, a nivel de todas y cada una de las diferentes moléculas que lo integran, se denomina ciencias ómicas.

CAMBIOS EN EL ADN. MUTACIONES Y REGULACIÓN EPIGENÉTICA

El ADN puede sufrir cambios. Algunos de ellos pueden cambiar la secuencia original de nucleótidos en la doble hélice; a este tipo de cambios se les denomina mutaciones. Otros cambios pueden ocurrir por modificaciones químicas, como la metilación en ciertos nucleótidos del ADN, principalmente en las citosinas. Estos cambios son llamados epigenéticos y no cambian la secuencia de los nucleótidos en el ADN, pero sí afectan la expresión de los genes en los organismos eucariotes.

Mutación

La información genética contenida en los nucleótidos del ADN es susceptible de sufrir cambios, los cuales se denominan mutaciones. Las mutaciones se heredan a la progenie. Todos los organismos experimentamos cambios y mutaciones en nuestro ADN por diferentes agentes o factores, ya sean ambientales (como la radiación UV) o químicos o biológicos (como las infecciones virales). Existen diferentes tipos de mutaciones que pueden alterar sólo un par de nucleótidos (llamada mutación puntual) o que pueden hacer perder o ganar fragmentos grandes de ADN, incluyendo cromosomas completos (ver figuras II.2 y II.10). Las alteraciones en

la secuencia de nucleótidos pueden ocasionar un cambio en la fase de lectura de un gen a nivel del ARN mensajero, y con ello generar una proteína con una secuencia de aminoácidos diferente, la cual podría realizar o no su función de la misma manera. En este sentido muchas mutaciones son neutras, pues el sitio donde

ocurre, ya sea dentro de un gen u otra región de ADN, no tiene efecto. Los cambios en los genes debidos a mutaciones puntuales y a la adquisición de fragmentos de ADN provenientes de otro origen, como las infecciones virales, son elementos responsables de los cambios en los organismos.

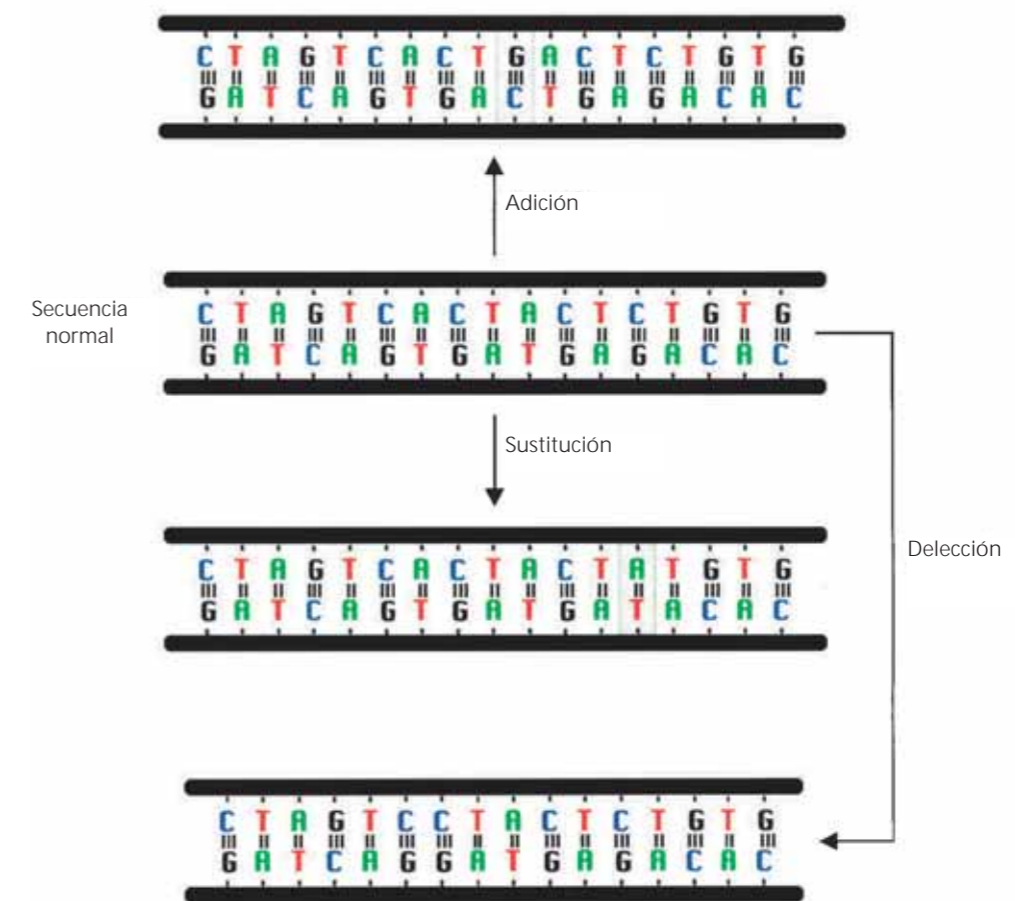


Figura II.10. La mutación es un cambio a nivel de la secuencia original de los pares de nucleótidos complementarios de ambas hélices del ADN. Existen tres tipos de cambio o mutación: por sustitución de un nucleótido, por delección, que implica la pérdida de uno o más pares de nucleótidos, y por adición (también llamada inserción), que implica el incremento de uno o más pares de nucleótidos complementarios, incluyendo segmentos de ADN. El más sencillo es la sustitución de un par de bases o nucleótidos complementarios por otro en la secuencia original, lo cual se muestra en esta figura, pasando de CG en la original a AT en la mutada por sustitución, ocurriendo el cambio en el mismo sitio. La delección que se muestra pierde el par de nucleótidos AT que estaba localizado originalmente entre dos pares de nucleótidos GC, quedando solamente 16 pares de nucleótidos en vez de los 17 originales. El otro tipo de mutación es la adición o inserción de sólo un par de nucleótidos GC, pasando de 17 originales a 18. Sin embargo, la inserción puede ser de fragmentos más grandes de ADN, incluyendo transgenes, que se insertan en los cromosomas de células eucariotas y procariotas.

Estos cambios pueden ser puntuales, neutros, y también ocasionados por transferencia horizontal de ADN, mediante la cual la célula receptora adquiere nuevas capacidades: una ganancia que reside en el ADN que ha sido transferido por este mecanismo. Éste es el caso de los organismos transgénicos, el cual se presenta en la siguiente sección. Cabe subrayar que los mecanismos de mutación y los cambios a la secuencia de nucleótidos del ADN —incluidos los provocados por transferencia horizontal de material genético— ocurren de manera natural y cotidiana en los seres vivos, y son responsables de la evolución de las especies. Si bien estos cambios pueden ser puntuales y muchas veces neutros, algunos de ellos pueden otorgarle a la célula receptora ventajas que se pueden traducir en prevalencia y dominancia. Otros cambios pueden ser letales o generar desventajas a la célula que recibe la mutación, y con ello ocasionarle la muerte. Sin embargo, la capacidad para mutar permite a la célula evolucionar a través de la adquisición de capacidades benéficas. La posibilidad de cambiar, mutar y de adquirir capacidades nuevas por transferencia horizontal de ADN y reorganización del genoma (como ocurre con los transgénicos) se discute a fondo en el capítulo IX, señalando que es un fenómeno que ha ocurrido y ocurre en la biota como parte de la evolución para, en muchos casos, adquirir ventajas y estabilizarlas en los genomas de los seres vivos.

Epigenética y expresión de los genes

El término epigenética fue acuñado por Conrad H. Waddington hace más de 70 años, antes

del establecimiento del ADN como la molécula de la herencia, en la cual residen los genes (ver figura II.4). El término surgió en un contexto de biología del desarrollo y proviene de la combinación entre genética y “epigénesis”, la teoría que postula que un organismo eucariote adulto se desarrolla gradualmente a través del tiempo desde el cigoto y no como un organismo preformado contenido únicamente en éste.

Waddington consideraba la epigenética como la base conceptual para tratar de entender los procesos e interacciones entre los genes que orquestan el desarrollo de un organismo adulto constituido por células fenotípicamente distintas a partir de un solo tipo celular, el cigoto. Es decir, cómo es que a partir del material genético se puede moldear un organismo. La regulación epigenética es fundamental para la existencia de los organismos multicelulares eucariotes ya que permite que células con el mismo acervo genómico den lugar a una amplia diversidad de tipos celulares con fenotipos específicos. Asimismo, la regulación epigenética participa activamente en el establecimiento y la perpetuación de una memoria celular no genética que es capaz de percibir, interpretar y responder a señales ambientales externas e internas a través de la modificación de la expresión genética y de programas de desarrollo. La memoria epigenética puede ser perpetuada durante el tiempo de vida de un organismo (mitóticamente), y en algunos casos perpetuada y transmitida a través de generaciones (meióticamente). Esto es lo que conocemos comúnmente como herencia epigenética transgeneracional. En la actualidad la epigenética se refiere al estudio de cambios heredables en la

función de los genes que ocurren en ausencia de cambios en la secuencia de nucleótidos del ADN (ver figura II.2).

La regulación epigenética del genoma involucra el establecimiento y la perpetuación de modificaciones químicas del ADN y de las histonas. Como se mencionó en párrafos anteriores, el ADN de los organismos eucariotes se encuentra empacado dentro del núcleo en unidades estructurales conocidas como cromosomas (ver figuras II.4 y II.5). Por ejemplo, el genoma humano se encuentra conformado por un juego de 23 cromosomas heredado por nuestra madre y un juego de 23 cromosomas heredado por nuestro padre. Exceptuando las células reproductivas (óvulo y esperma) que contienen un sólo juego cromosómico (es decir, son haploides, o $n=23$), las células del resto de nuestro cuerpo (somáticas) contienen dos juegos cromosómicos (es decir, son diploides, o $2n=46$). El genoma de una célula somática se encuentra formado por seis mil millones de pares de nucleótidos con sus bases de ADN que representan aproximadamente dos metros de ADN empacado dentro del núcleo de una célula que tiene un diámetro de tan sólo diez micrómetros (recordemos que un micrómetro es la milésima parte de un milímetro). El equivalente geométrico de esta compactación sería como tratar de empacar 40 kilómetros de hilo delgado en una pelota de tenis.

En los eucariotes existen proteínas especializadas en empacar el ADN, llamadas histonas (ver figura II.7). Las histonas (H1, H2A, H2B, H3 y H4) son proteínas pequeñas con carga positiva que forman uniones muy fuertes con las dos cadenas del ADN, el cual posee carga negativa.

El primer grado de compactación o empaquetamiento del ADN comprende la unión de éste con un núcleo de ocho histonas (dos histonas de cada uno de las siguientes familias: H3, H4, H2A y H2B). De manera similar a un carrete de hilo, aproximadamente 146 pares de bases de ADN se enrollan a un octámero de histonas. El complejo formado por el ADN y las histonas a lo largo de todo el genoma se denomina cromatina (ver figura II.11). El nucleosoma (ADN y un octámero de histonas) es la unidad básica estructural y funcional de la cromatina. La histona H1, por otro lado, se une a la región de ADN comprendida entre dos nucleosomas (ADN enlazador) y ayuda a estabilizar fibras de cromatina de orden superior (ver figura II.11). Cada cromosoma, que mide en promedio cinco centímetros en células humanas, se encuentra formado por cientos de miles de nucleosomas.

Los cromosomas poseen territorios formados por dos tipos de cromatina funcional y estructuralmente distintos: la eucromatina y la heterocromatina (ver figura II.11). La heterocromatina representa regiones tan densamente empacadas que son inaccesibles a los factores transcripcionales, por lo que éstas se consideran transcripcionalmente inactivas o silenciadas. El estado silenciado de la heterocromatina se establece y perpetúa generación tras generación en regiones específicas como los centrómeros (regiones importantes para la división celular comúnmente localizados en el centro del cromosoma) y los telómeros (extremos de los cromosomas que son determinantes e importantes para su integridad) durante cada ciclo celular (ver figura II.5). Por otro lado, la eucromatina se encuentra mucho menos con-

densada y es muy accesible a factores transcripcionales, por lo que es transcripcionalmente activa. La presencia de modificaciones en el nucleosoma permite distinguir químicamente a la heterocromatina de la eucromatina (ver figura II.11). Dichas modificaciones se establecen mediante la actividad de enzimas que modifican al ADN y a las histonas. Las modificaciones o marcas epigenéticas incluyen la metilación del ADN (adición de grupos metilo en las citosinas o adeninas del ADN), la modificación en residuos específicos de las histonas (conocidas como modificaciones de cromatina) y la incorporación de variantes de histonas que están presentes durante un tiempo, o en un tejido específico y conforman nucleosomas más o menos propensos a la compactación. La deposición o establecimiento de las marcas de cromatina en algunos casos requiere de la actividad de moléculas de ARN no codificantes, largas y cortas.

La transcripción de un gen (ver figura II.6) requiere de la apertura y separación temporal de la doble hélice del ADN que permite el acceso a factores transcripcionales, ARN polimerasas y otras proteínas encargadas de copiar el ADN en ARN y otras proteínas accesorias en las células de eucariotes, por lo que la presencia de los nucleosomas, junto con el plegamiento de la cromatina, representan una barrera para la transcripción. El establecimiento de las marcas epigenéticas regula la formación de heterocromatina y/o eucromatina a lo largo del cromosoma de manera dinámica. Es decir, regulando epigenéticamente el grado de compactación del ADN se puede modular el acceso al genoma y por ende la expresión de los genes. Los

principales sitios de modificación en las histonas corresponden a residuos específicos de los aminoácidos lisina (K) en las histonas H3 y H4. Mientras que la acetilación de la lisina en estas histonas generalmente guarda correlación con un estado de activación transcripcional, la metilación de lisinas específicas guarda correlación con la activación o represión transcripcional, dependiendo de la ubicación de la lisina que se ha metilado. Por ejemplo, la acetilación de la lisina 9 de la histona H3 (H3K9ac) y la metilación de la lisina 4 de la histona H3 (H3K4me) son características de regiones transcripcionalmente activas o eucromatina, mientras que la metilación del residuo de lisina 9 de la histona H3 (H3K9me) es característica de regiones transcripcionalmente silenciadas, o heterocromatina (ver figura II.11).

La metilación del ADN es una marca epigenética evolutivamente conservada en animales y plantas que se asocia con el silenciamiento de genes y es esencial para el adecuado desarrollo de los organismos eucariotes. En los mamíferos, la metilación del ADN ocurre casi exclusivamente en las citosinas (C) del dinucleótido 5'-CpG-3' (CpG es una forma de abreviar a la citosina y a la guanina unidas mediante un grupo fosfato) y se estima que entre el 70% y el 80% de los dinucleótidos CpG presentes en el genoma humano se encuentran metilados (5'-CmepG-3'). El dinucleótido CpG tiene un contexto simétrico, es decir, entendiéndose que el ADN es una doble cadena (ver figura II.2), si una de ellas contiene 5'-CpG-3', la hebra complementaria contiene a su contraparte inversa complementaria, 3'-GpC-5'. La metilación de citosinas en contextos no-CpG, incluyendo contextos simétricos 5'-CpHpG-3'

y contextos asimétricos 5'-CpHpH-3' (en el que H representa cualquier base adenina, timina o citosina, excepto guanina) es muy rara en genomas de mamíferos; en humanos sólo se ha reportado en células madre embrionarias. En contraste, en las plantas la metilación de ADN ocurre frecuentemente en ambos contextos simétricos 5'-CpG-3' y 5'-CpHpG-3' y en el contexto asimétrico 5'-CpHpH-3' (ver figura II.11). En plantas y animales la metilación ocurre de manera secuencial; la metilación inicial de una secuencia de ADN (metilación de novo) requiere de la actividad de enzimas conocidas como "de

novo ADN metiltransferasas". El patrón de metilación establecido por las de novo ADN metiltransferasas puede ser perpetuado por otra familia de ADN metiltransferasas, conocidas como ADN metiltransferasas de mantenimiento.

Durante la perpetuación de los patrones de metilación en contextos simétricos 5'-CmepG-3' y 5'-CmepHpG-3', la información posicional de la citosina metilada (Cme) puede usarse como molde para metilar las nuevas cadenas durante la replicación del ADN, ya que las cadenas complementarias contienen a su contraparte inversa complementaria (3'-GpmeC-5'

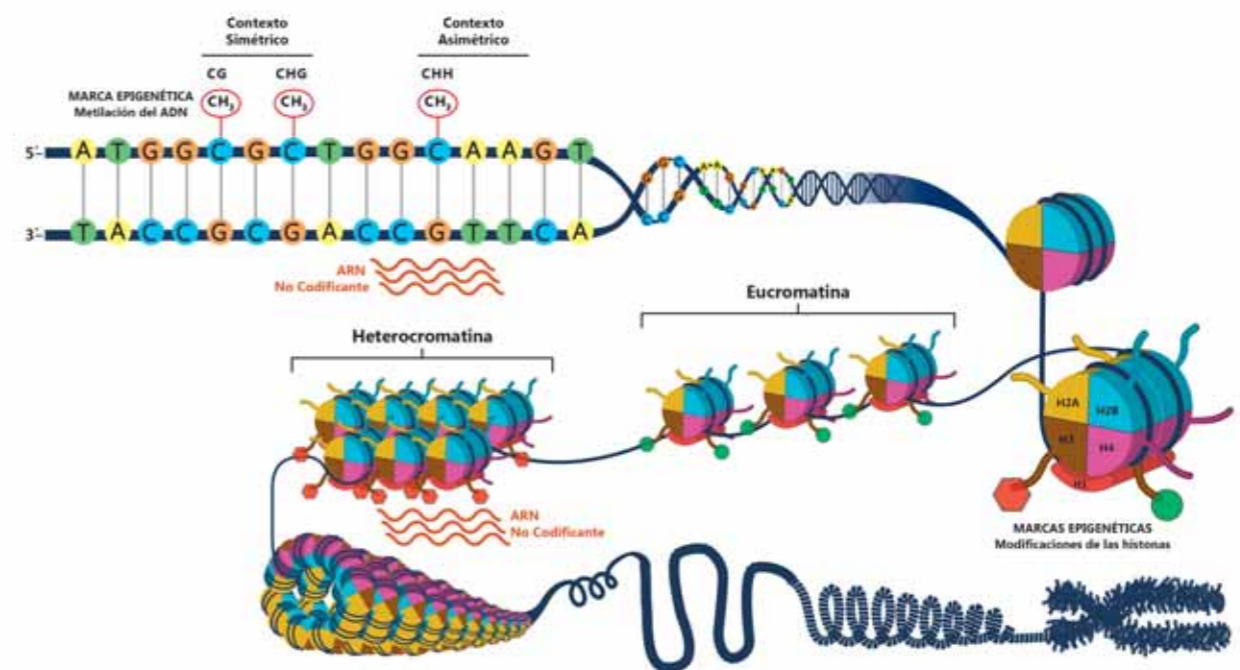


Figura II.11. Regulación epigenética de la expresión genética.

La regulación epigenética del genoma involucra el establecimiento y la perpetuación de modificaciones químicas en el ADN y en las proteínas histonas. El ADN puede ser modificado químicamente sin alterar su secuencia de nucleótidos para regular el acceso a los genes. La adición de un grupo metilo (CH3) en el ADN (proceso conocido como metilación del ADN) junto con la modificación de histonas mediante la metilación, la acetilación, la fosforilación, la ubiquitinación y la adición de otros grupos químicos modulan el grado de compactación del ADN y, por ende, el acceso a la información genética almacenada en el genoma. De esta manera el ADN ligeramente empaquetado (eucromatina) es transcripcionalmente activo, mientras que el ADN con un grado alto de compactación (heterocromatina) es transcripcionalmente poco activo o inactivo (ilustración de Joselyn E. Arteaga Vázquez)

y 3'-GpHpmeC-5', a manera de palíndromo). Mientras que nuestro entendimiento de los mecanismos de metilación y perpetuación de contexto asimétrico 5'-CpHpH-3' en los mamíferos es todavía muy escaso, en las plantas se ha caracterizado a detalle la vía de metilación de novo del ADN denominada "vía de metilación del ADN dirigida por ARN" (*RNA-directed DNA methylation pathway*, o RdDM por sus siglas en inglés). La vía RdDM es la principal ruta de regulación epigenética en las plantas y emplea moléculas de ARN pequeños no codificantes (ARNpnc), generados a partir de las secuencias repetidas y de los transposones presentes en el genoma como guías que proveen especificidad, a fin de establecer y perpetuar los patrones de metilación, inducir modificaciones a la cromatina y finalmente llegar a la formación de heterocromatina.

Las alteraciones epigenéticas se pueden presentar de manera natural. En 1742 Liöberg, un estudiante de la Academia de Upsala, Suecia, descubrió un espécimen muy parecido a la planta *Linaria vulgaris*, pero que en lugar de poseer un espolón y dar flores con dos pares de anteras y simetría bilateral (cada lado de la flor es una imagen especular) tenía cinco espolones, cinco anteras y simetría radial. En 1744 Carl Linneo nombró a esta planta "peloria" (que significa monstruo en griego), ya que su sistema de clasificación se basaba en la estructura de las flores. Esta planta transgredía no sólo su sistema de clasificación sino también el dogma respecto a que las especies eran creaciones divinas que habían permanecido inalteradas desde la creación. Un siglo después, Charles Darwin retomaba el ejemplo

de "pelorismo" como un caso de variación natural en *On the Origin of Species*, y también lo menciona en el apartado de monstruosidades de su libro *The variation of plants and animals under domestication*. En 1999, más de 250 años después de su clasificación, se descubrió que el fenotipo peloria en *Linaria vulgaris* se debe a la metilación del gen *Lcycloidea* (*Lcyc*), el cual participa en la especificación del patrón floral. En flores con el fenotipo peloria el gen *Lcyc* se encuentra silenciado. Las plantas silvestres y mutantes peloria poseen copias idénticas del gen *Lcyc*, pero ciertas diferencias en la metilación del ADN en la región del gen *Lcyc* ocasionan el silenciamiento de tal gen. Es decir, la mutante peloria es realmente una epivariante, ya que la modificación en la expresión del gen *Lcyc* no se debe a mutaciones en el ADN sino a la deposición diferencial y perpetuación de la metilación del ADN sobre dicho gen. El caso es muy relevante, pues la peloria fue la primera variante morfológica natural en ser descrita y la primera epivariante en ser caracterizada.

El maíz se ha consagrado como uno de los mejores sistemas para estudiar los mecanismos de regulación epigenética que operan en las plantas. El genoma del maíz se encuentra repleto de elementos móviles llamados transposones. Como se analiza con mayor detalle en el capítulo IX, los transposones son secuencias de ADN que poseen la capacidad de moverse, "brincar" o translocarse de un lugar del genoma a otro. Barbara McClintock, una genetista de maíz, descubrió este tipo de secuencias móviles en la década de 1940. Existen diversas clases de transposones; cada uno de ellos utiliza estrategias diferentes para replicarse e in-

crementar su número de copias en el genoma. Se dividen en dos grandes clases o grupos: la clase I comprende aquellos transposones que utilizan un intermediario de ARN para movilizarse y emplean un mecanismo de movilización denominado "copia y pega", el cual implica que una copia del transposón permanece en su lugar original y una nueva copia se inserta en otro lugar del genoma. La clase II agrupa aquellos transposones que no utilizan un intermediario de ARN para movilizarse y emplean un mecanismo de "corte y pega" mediante el cual se mueven de su posición original en el genoma a otra. Los transposones activos son altamente mutagénicos, puesto que al brincar a una nueva posición en el genoma pueden inhabilitar o modificar la función de genes al insertarse dentro o cerca de ellos. También pueden ocasionar rompimientos de los cromosomas, recombinación ilegítima, alteración en patrones de procesamiento de los intrones o poliadenilación y alteraciones en los patrones de expresión cuando actúan como promotores y/o potenciadores ectópicos.

Los transposones son muy abundantes en los genomas eucariotes. Cerca de la mitad de nuestro genoma (poco más del 40%) está compuesto de transposones. Los genomas de las plantas también se encuentran poblados de ellos y representan, por ejemplo, el 83% del genoma del maíz. Los transposones participan cotidianamente en la generación de variedades intraespecie, como fue descrito por Morgante y colaboradores en 2005. El maíz, al igual que el resto de las plantas terrestres y los animales, posee sistemas para reconocer y mantener a la gran mayoría de los transposones en un estado

de reposo transcripcional y de no movilización. Estos sistemas de silenciamiento se basan en la formación de heterocromatina (ver figura II.11) en las regiones genómicas que poseen transposones y otros elementos repetidos mediante los mecanismos de regulación epigenética ya mencionados (metilación del ADN y modificaciones de la cromatina). Las cruces entre cultivos tradicionales de maíz y durante la generación de variedades mediante esquemas tradicionales de cruce conlleva la confrontación de genomas con epigenomas distintos que no se han presentado en las nuevas plantas, problemas para agricultores o en la alimentación humana o animal. Por ello es importante reiterar que los transposones causan mutaciones y cambios epigenéticos de manera frecuente en las plantas de manera natural. En el caso del maíz son responsables de alteraciones inesperadas o impredecibles pero que no representan un riesgo para la supervivencia de la especie, la preservación de las razas ancestrales de maíz o de programas de mejoramiento genético, ya sean convencionales o mediante el uso de transgenes, para generar nuevas variedades.

De la misma manera en que los genes de un organismo silvestre son regulados epigenéticamente, los transgenes (que se describen en la siguiente sección) integrados en OGM también pueden ser sujetos de regulación epigenética. De hecho, el empleo de transgenes como herramientas moleculares ha sido esencial para entender la función y las bases moleculares de diversos mecanismos de regulación epigenética, incluyendo el descubrimiento del mecanismo del silenciamiento de genes en plantas (cosupresión) y el de las bases moleculares

del ARN interferente (el cual hizo acreedores a Andrew Fire y Craig Mello al premio Nobel de Fisiología o Medicina en 2006). El glosario incluye términos relacionados con epigenética y regulación de la expresión genética.

Consideraciones más detalladas acerca de la estructura de la molécula de ADN, sus propiedades, el funcionamiento de las células eucariotas y procariotas y su metabolismo y la organización y regulación de la expresión genética han sido incorporadas en libros en español, elaborados por miembros del Comité de Biotecnología, que se encuentran en libre acceso en la página electrónica de la AMC y en las de otras instituciones. También se mencionan e incluyen libros de otros autores.

Darwin, 1859; Darwin, 1868; Heitz, 1928; Waddington, 1942; Avery et al., 1944; McClintock, 1950; Watson y Crick, 1953a; Watson y Crick, 1953b; Waddington, 1956; Waddington, 1957; Messelson y Stahl, 1958; Crick, 1958; Brenner y Messelson, 1961; Murray, 1964; Gustafsson, 1979; Physiology of Medicine, 1983; Watson et al., 1988; Watson et al., 1992; Watson et al., 1996; Glick y Pasternack, 1998; Coen, 1999; Cubas, 1999; Lengeler et al., 1999; Strahl y Allis, 2000; Martienssen, 2001; Januwein, 2001; Venter et al., 2001; Zhang, 2001; Bolívar et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Hannon, 2003; Haiq, 2004; Stillman y Steward, 2004; Saha et al., 2006; Allis et al., 2007; Bolívar, 2007; Bolívar et al., 2007; Nelson y Cox, 2008; Suzuki y Bird, 2008; Law y Jacobson, 2010; Bolívar et al., 2011; Hayden, 2011; Sanders y Bowman, 2012; Eitchen et al., 2014; Potsova, 2014; Fuentes y LaBaer, 2014; Bishop, 2014; Allis y Jenuwein, 2016; Quadrana y Colot, 2016

TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ORGANISMOS TRANSGÉNICOS

Metodologías de ingeniería genética para construir organismos transgénicos

En 1973 aparecieron las primeras técnicas de ingeniería genética, llamadas también de ADN recombinante, para construir organismos transgénicos. Con estas metodologías la biotecnología alcanzó una nueva dimensión; gracias a ellas fue posible aislar genes específicos de cualquier organismo, amplificarlos e introducirlos a otro mediante mecanismos de transferencia horizontal de ADN y generar así organismos transgénicos o genéticamente modificados.

La transferencia horizontal de ADN y la incorporación del transgén en la célula receptora implica, inmediatamente después de la entrada, la reorganización y modificación del ADN del genoma del organismo receptor que, al adquirir un gen nuevo, le confiere nuevas propiedades. Es importante enfatizar que todos los genes que existen en organismos vivos, incluyendo los que forman parte del ser humano, han existido en la naturaleza por millones de años. Eso convierte a los genes en parte natural de la biodiversidad, no en elementos no naturales. La creación de transgénicos ocurre porque la célula viva puede incorporar otros genes de origen diferente, que no son extraños al estar compuestos de ADN y que pueden incorporarse de manera natural al genoma de otros organismos. Los múltiples ejemplos de transferencia horizontal de ADN en los organismos vivos que integran la biota, proceso que se denomina también transgénesis, se co-

mentan en detalle en el capítulo IX. Éstos validan y soportan la existencia de organismos transgénicos —construidos y usados responsable y sustentablemente; con razones, objetivos y propósitos precisos—, como se detalla en la siguiente sección.

La razón más importante que permite la transgénesis y la construcción de organismos transgénicos es que la estructura general de la molécula de doble hélice de ADN (como puede verse en las figuras II.2 y IX.5) es compartida y es la misma para todo ser vivo: plantas, animales, bacterias y virus que tienen ADN en su genoma. Es decir, las dos hélices están organizadas, separadas de la misma manera y con las mismas distancias entre sus componentes en todos los seres vivos. Lo anterior implica que cuando un fragmento de ADN es introducido

por transferencia horizontal, ya sea por transgénesis en la biota o por técnicas de ingeniería genética en la construcción de transgénicos, el ADN foráneo, si no es degradado por la maquinaria celular, puede incorporarse como parte del genoma de la célula receptora mediante un rearrreglo llamado recombinación genética. Así, el ADN foráneo o transgén, como se indica en la figura II.12, pasa a formar parte de la célula receptora como un nuevo segmento de ADN, permitiéndole nuevas propiedades que residen en el transgén (algunas de éstas se ejemplifican y comentan en la siguiente sección).

En casos excepcionales, que se comentan en el capítulo VIII, se han transferido fragmentos de ADN de otro origen que no son genes pero que otorgan al organismo receptor, también transgénico, nuevas propiedades. Esto es

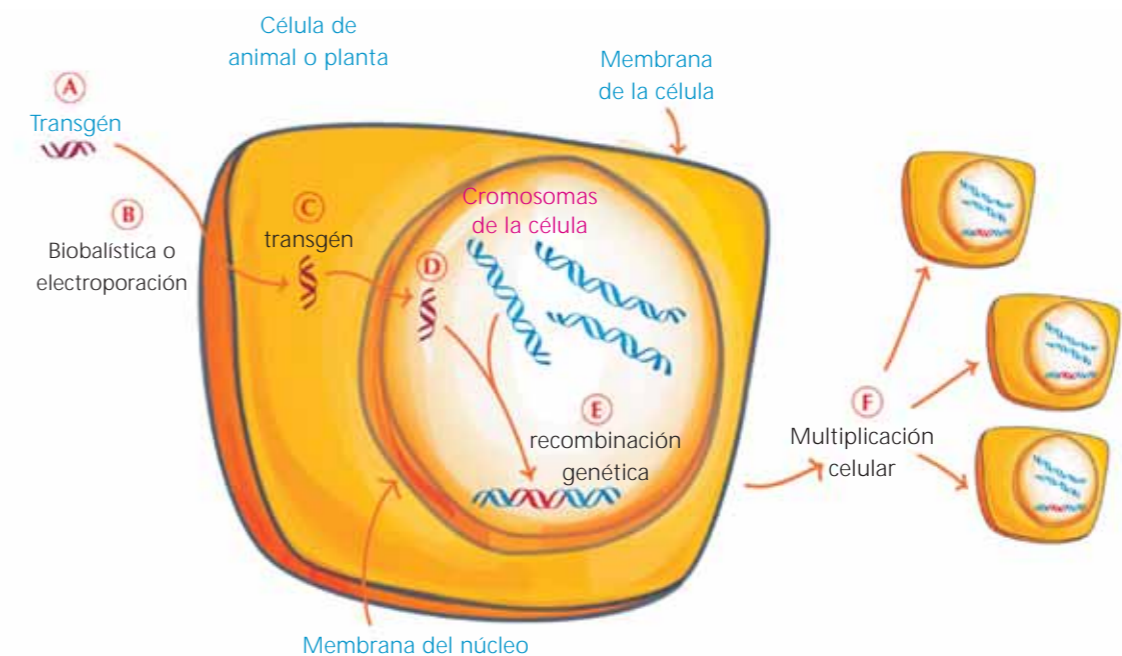


Figura II.12. Esquema general para la construcción de células eucariotas de animales y plantas transgénicas que cuentan con núcleos.

posible, nuevamente, gracias a que la estructura general del ADN en todos los seres vivos es la misma. Esto permite que la célula receptora pueda incorporar, editar e integrar el transgén como un nuevo segmento de ADN que forma parte de su propio material genético.

La figura II.12 muestra un esquema general para la construcción de plantas y animales transgénicos mediante el mecanismo de transferencia horizontal de ADN y la reorganización o recombinación del genoma de la célula receptora. Las plantas y animales somos organismos pluricelulares que tenemos muchas células en nuestros organismos; nos denominamos eucariotes porque nuestras células contienen núcleos donde residen los cromosomas. La figura muestra, para efectos de explicación, el esquema de una sola célula con núcleo y membrana nuclear.

El primer paso (A) es aislar o sintetizar químicamente el gen de cualquier origen (transgén, excepto de la célula receptora) que se va a utilizar para construir el transgénico. El ADN que lleva este transgén se muestra en rojo. A través de distintos procedimientos (electroporación, biobalística o transformación por ADN heterólogo), el fragmento de ADN heterólogo (o transgén) es introducido a la célula receptora (B) atravesando la membrana de la célula (C) y, luego, la membrana del núcleo de la célula. Mediante este proceso el transgén, ya en el interior del núcleo de la célula receptora (D), puede ser reconocido por la maquinaria celular para incorporarlo como parte de su material genético. Este proceso (E) ocurre mediante la recombinación genética entre el transgén y el ADN de un cromosoma de la célula receptora. Hasta ahora, en la gran mayoría de los casos,

este proceso ha sido bastante impreciso pues el sitio específico donde ocurre la inserción por recombinación es muy difícil de controlar. Recientemente (ver más adelante) se han desarrollado técnicas que han cambiado drásticamente este escenario. Así, el transgén se incorpora como nuevo segmento del ADN cromosomal, química y biológicamente indistinguible del material genético de la célula. Este material de ADN nuevo modifica y reorganiza el genoma de la célula receptora y le confiere características y ventajas codificadas en el transgén. Posteriormente, mediante un proceso de multiplicación celular (F) que da origen a células hijas idénticas a la célula receptora original, se estabiliza y se transmite la presencia del transgén en la descendencia de la célula original. A partir de las células hijas se puede generar el organismo completo posteriormente.

Para el caso particular de la construcción de plantas transgénicas se presenta en la figura II.13 el uso de técnicas de ingeniería genética para precisar este propósito. Se utiliza una cepa de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*, la cual infecta plantas, que ha sido “desarmada”. El ADN heterólogo o transgén se incorpora a esta bacteria desarmada, la cual cuenta con una molécula pequeña de ADN circular, llamada plásmido, además de sus cromosomas. En este plásmido llamado ADN-T reside la capacidad para infectar plantas; en esta molécula se incorpora el ADN heterólogo o transgén para utilizarlo como vector. Este tipo de molécula de ADN recombinante producida por ingeniería genética se usa para infectar células de diferentes vegetales, las cuales lo incorporan en sus núcleos. Posteriormente las células se

multiplican y dan lugar a plantas transgénicas, previa selección y regeneración *in vitro* de las células que llevan el ADN-T con el transgén.

Además, existen técnicas de biobalística que permiten que el ADN o transgén llegue al núcleo de la célula de la planta. Asimismo, existen técnicas de electroporación que permiten incorporar transgenes a células animales. Todas estas metodologías implican transferencia horizontal de ADN en células eucariotas y se comentan en el capítulo IX, el cual aborda la transgénesis y los múltiples ejemplos de transferencia horizontal de material genético.

La figura II.14 muestra el procedimiento utilizado para crear bacterias transgénicas: microorganismos unicelulares que constan en su mayoría de una sola célula y no tienen núcleo. En estos casos se utiliza un vector o plásmido que, como se señaló, es una molécula pequeña de ADN que las bacterias poseen además del cromosoma, para incorporarle un fragmento de ADN de cualquier origen (transgén o ADN heterólogo) y así formar una molécula de ADN recombinante que incluye el transgén. El plásmido contiene asimismo un gen que confiere resistencia a un antibiótico. Esta molécula de

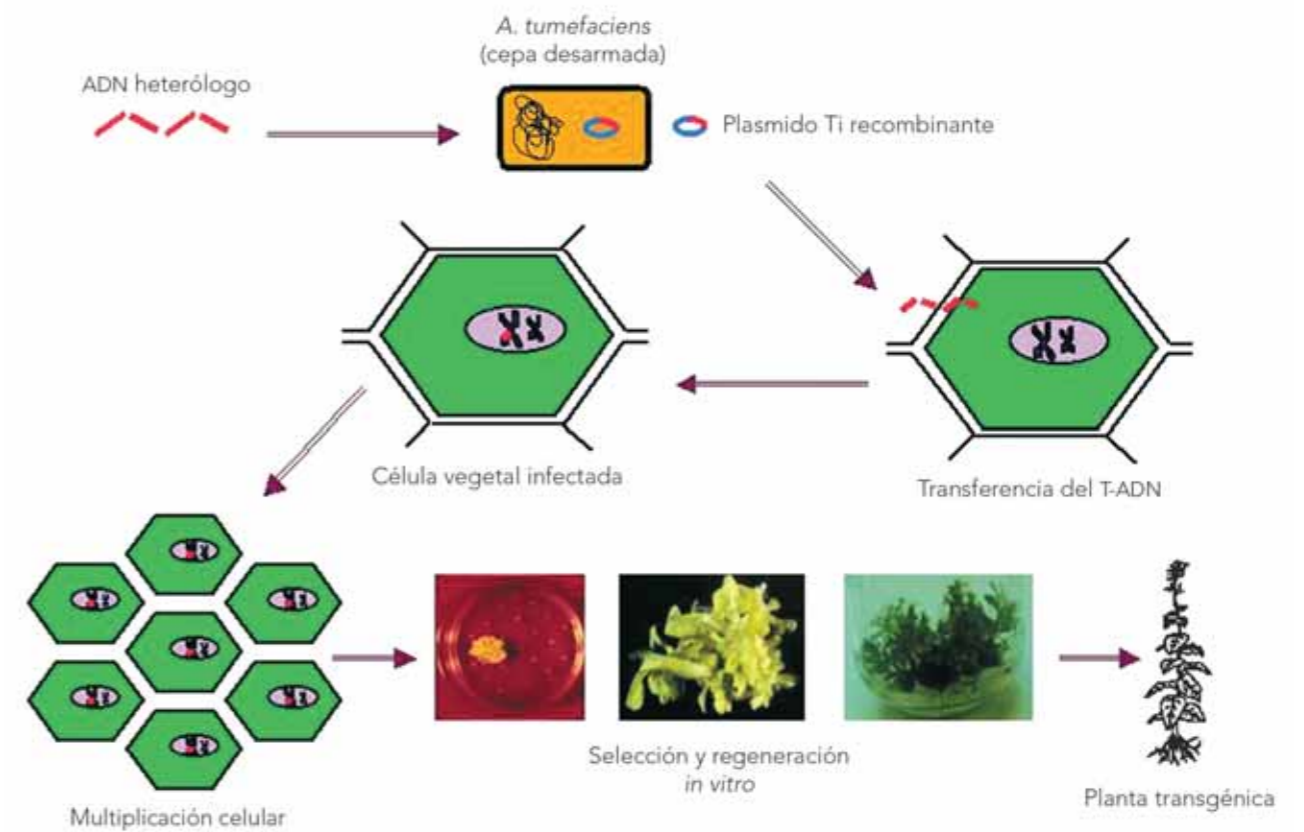


Figura II.13. Fitomejoramiento mediante ingeniería genética. Técnicas de ADN recombinante son utilizadas para transferir ADN heterólogo (transgén) a núcleos de células de vegetales que luego se multiplican dando lugar a una planta transgénica.

ADN recombinante, que lleva ADN del plásmido y del transgén, puede ser luego incorporada a la célula receptora mediante un proceso de transformación. Esta transferencia horizontal de ADN del nuevo gen modifica y reorganiza el genoma de la célula receptora y le proporciona una nueva característica codificada por el transgén. Posteriormente, las células que lle-

van esta molécula se seleccionan y crecen en presencia de antibiótico, gracias al gen de resistencia presente en el plásmido, dando lugar a un conjunto de células hijas donde todas llevan el transgén como parte de la molécula recombinante. También existen técnicas que permiten integrar el plásmido recombinante, o solamente el transgén, en el cromosoma bacteriano.

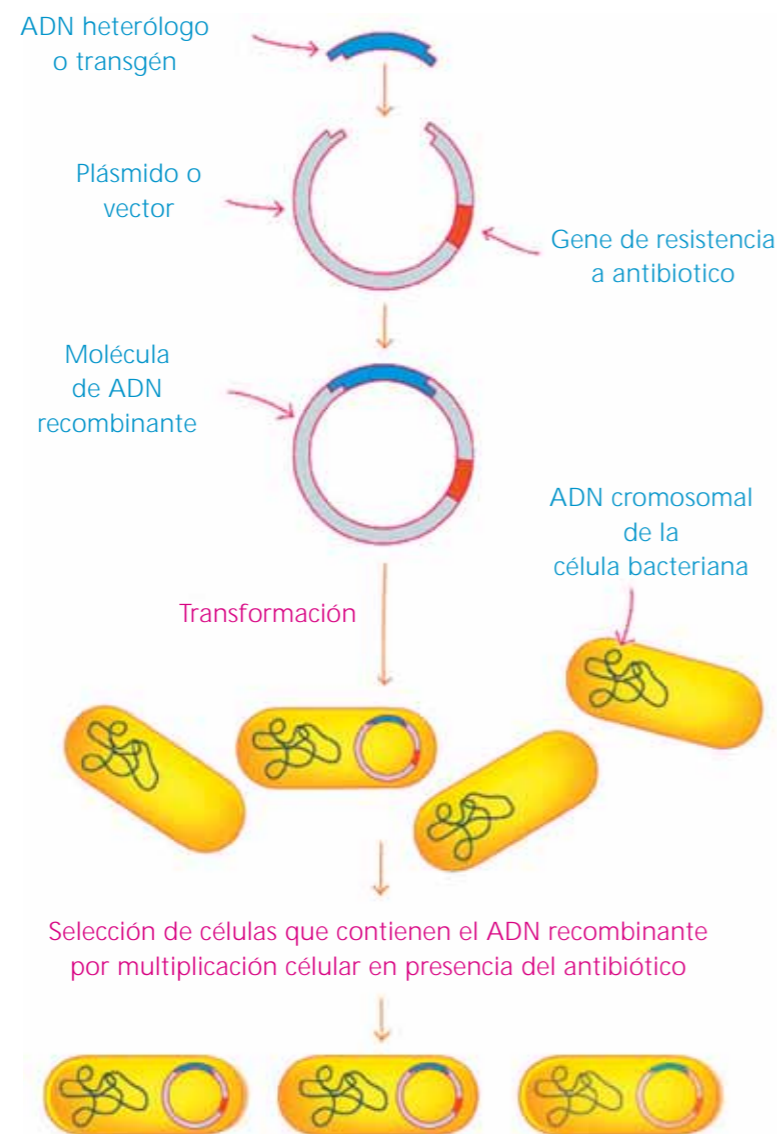


Figura II.14. Esquema general utilizado para construir bacterias transgénicas.

El uso del ADN sintetizado por química orgánica (biología sintética), incluyendo genes específicos y completos, ha permitido potenciar estas capacidades biotecnológicas en la construcción de organismos transgénicos. Gracias al uso de genes sintetizados químicamente, que funcionan como ADN natural y que codifican para proteínas humanas, fue posible desarrollar las primeras bacterias transgénicas, las cuales produjeron los primeros medicamentos transgénicos (proteínas y hormonas como la somatostatina y la insulina, idénticas a las humanas). A nuestro juicio, a partir de este hecho se inicia la era de la biología sintética: con el uso de genes sintetizados completamente por química orgánica y que fueron funcionales *in vivo*. Además, gracias al ADN sintético, fue posible identificar y aislar genes específicos de cualquier origen utilizando pequeños fragmentos de ADN (oligonucleótidos) como “iniciadores” específicos para aislar y amplificar genes, mediante la metodología de amplificación de ADN tipo reacción en cadena de la polimerasa de ADN (PCR, por sus siglas en inglés). Estas metodologías que permiten la amplificación del ADN (producción de muchas copias de ADN blanco) de tipo PCR fueron inicialmente desarrolladas por Mullis en 1987, y han sido utilizadas ampliamente tanto para aislar y caracterizar multitud de genes como para utilizarlos como transgenes (ver figuras II.12 y II.13 y II.14).

Posteriormente, a fin de hacer avanzar la biología sintética, experimentos iniciales del grupo de Venter y colaboradores ha contribuido de manera importante en el diseño y construcción de sistemas biológicos funcionales

sencillos, a partir de bacterias (que son los organismos menos complejos), en los cuales se ha reducido sustantivamente el número de genes nativos dispensables, buscando avanzar hacia la construcción de la “célula mínima” que contenga el menor número posible de funciones que le permita vida. Con ella se pretende sustituir algunos de los genes restantes por genes de otros orígenes, o por nuevos genes sintéticos, para así potenciar ciertas capacidades. Para este propósito también se ha avanzado en el diseño y construcción de genomas mínimos, completa o parcialmente sintéticos, que pueden ser introducidos en células depletadas, carentes de genoma, buscando regenerar la capacidad de vida de la célula mediante el genoma sintético.

Nuevas metodologías para construir organismos transgénicos avanzados mediante la edición fina del genoma

Existen nuevas y poderosas técnicas para editar de manera precisa los genomas de cualquier organismo o virus, conocidas como CRISPR-Cas9 (por sus siglas en inglés: *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeat*). Estas metodologías utilizan la proteína endonucleasa Cas9 de origen bacteriano (ya adaptada como herramienta programable) y otras proteínas tipo nucleasas que cortan el ADN de cualquier origen, las cuales habrán de revolucionar el diseño de organismos transgénicos mejorados y superiores, de tercera y cuarta generación. Estas técnicas permiten inactivar, activar o modificar cualquier gen o región de ADN en cualquier organismo vivo usando un ARN como guía de hélice sencilla, específico

para el gen que se desea modificar. La posibilidad de usar un ácido nucleico como elemento reconocedor es una innovación de enorme trascendencia, pues su diseño es sencillo y directo, siguiendo las reglas de apareamiento de bases de Watson y Crick (A-T, C-G) que se encuentran en el ADN de cualquier organismo (ver figuras II.3 y II.5).

La forma en que la endonucleasa Cas9 funciona, reconociendo moléculas de doble hélice de ADN, facilitando su reconocimiento mediante una hebra de ARN con secuencia de nucleótidos específica para este *locus* y catalizando su entrelazado (hibridización) con el ADN blanco (el sitio en el ADN que se requiere modificar, como se presenta en la figura II.15) resulta ser un descubrimiento crucial y extraordinario para el desarrollo de estas nuevas técnicas.

El panel A de la figura II.15 muestra el resultado de la interacción CRISPR-Cas9 con el ADN genómico, que es el corte de las dos hebras de la doble hélice. Esto resulta, en la mayoría de los casos, en la inactivación del gen blanco u objetivo por reparación incorrecta (con pérdida o ganancia de bases). Si se adiciona al sistema experimental ADN con una secuencia modificada (en rojo en el panel B), pero flanqueada por secuencias idénticas a la región blanco (líneas punteadas), se logra la sustitución del gen original por una versión modificada que contiene material genético de cualquier origen (incluyendo un transgén) con las características y funciones diseñadas, con eficiencia sorprendente. De esta manera se atiende una de las preocupaciones de los grupos que están en contra de los transgénicos, ya que a partir del uso de la enzima Cas9 y sus derivados se construirán nuevos

organismos genéticamente modificados en los que la inserción del nuevo material genético (transgén) se hará de manera precisa y predecible, evitando que la integración del transgén sea al azar, como ocurre actualmente en los cultivos transgénicos.

Existen ejemplos recientes, algunos de ellos ya publicados, donde se usan técnicas de CRISPR-Cas9 para generar variedades de plantas comestibles con nuevas propiedades y características. En estos ejemplos se eliminan genes responsables del oscurecimiento en manzanas, papas y hongos. Más reciente es el ejemplo de una nueva variedad de maíz en la que se eliminan ciertos genes que permiten al nuevo organismo sintetizar sólo almidón en el grano. Cabe recalcar que estos ejemplos no son organismos transgénicos pues no llevan transgenes, sino que son modificados y editados genéticamente mediante técnicas de CRISPR-Cas9. Estos organismos pueden presentar ventajas como las ya mencionadas, y por ello serían genéticamente mejorados pero no por transgenes.

En Estados Unidos, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés) es responsable de la autorización de nuevos alimentos, y es relevante que la FDA no esté regulando el uso de estos organismos a los que sólo se les han eliminado o deletado genes. Igualmente, los experimentos en los que se realiza la sustitución de un gen por una versión diferente, pero de la misma especie (diferente alelo), no constituyen organismos transgénicos sino una nueva variedad. La modificación proviene de otra estirpe de la misma planta, tal y como se ha hecho desde tiempos inmemoriales, pero ahora con técnicas mucho más precisas. En el glosario

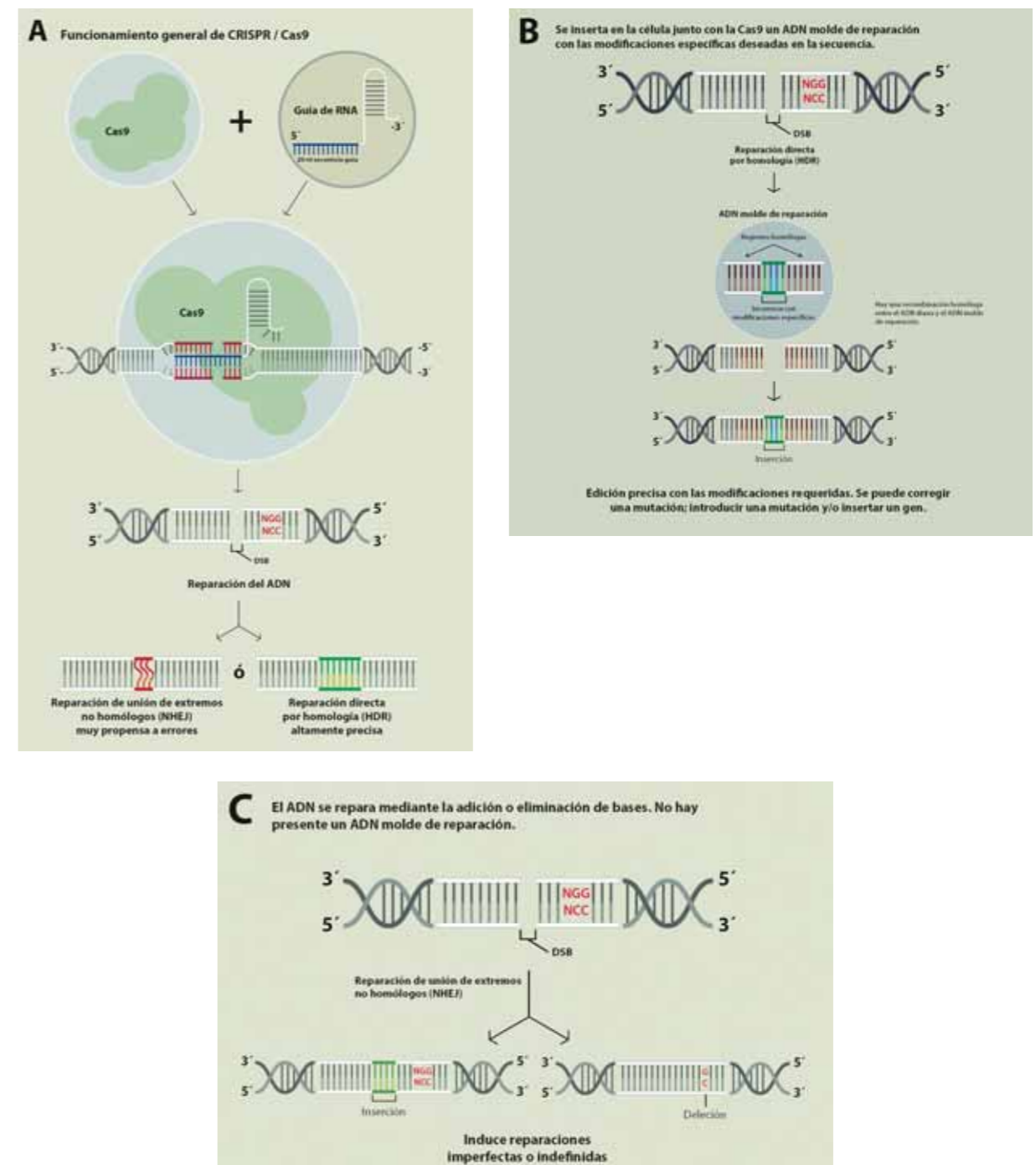


Figura II.15. Modo de acción del sistema CRISPR-Cas9.

En el panel A se muestra la interacción y corte de la proteína Cas9 con su ARN guía en el ADN cromosomal blanco. El panel B ilustra la inactivación por reparación incorrecta de la zona cortada. El panel C muestra la sustitución de un gen por otra versión modificada, a través de la recombinación homóloga. Se muestran algunas de las variantes modificadas del sistema CRISPR-Cas9, en este caso, permitiendo la activación o inactivación de la expresión de genes específicos (efecto regulatorio y/o epigenético).

se describen los términos relacionados con estas nuevas técnicas para la edición fina del genoma.

Por lo anterior resulta muy importante que los nuevos organismos transgénicos se diseñen y construyan mediante la metodología CRISPR-Cas9. Ésta permite la inserción de transgenes con ventajas en sitios específicos y la utilización de fragmentos de ADN con regiones de regulación de la expresión o funcionamiento del gen provenientes del propio organismo receptor. Éstos deben estar localizados junto al transgén que se desee incorporar. Por ello, regiones del ADN que regulan la expresión genética provenientes de otros organismos se dejarán de utilizar, incluyendo genes que confieren resistencia a antibióticos, como ocurrió con varios transgénicos de primera generación. Además, los organismos transgénicos de nueva generación construidos por estas nuevas técnicas podrán caracterizarse inmediatamente después de su construcción, mediante la determinación completa de la secuencia nucleotídica de todo el genoma del nuevo transgénico. Lo anterior permitirá determinar si la inserción del transgén ocurrió en el sitio previsto y confirmar que no ocurrieron cambios adicionales en el genoma del organismo receptor, excluyendo el motivado por el transgén en el sitio deseado.

Kornberg, 1988; Smith y Wilcox, 1970; Jackson et al., 1972; Cohen et al., 1973; Sánchez et al., 1975; Heyneker et al., 1976; Bolívar et al., 1977; Itakura et al., 1977; Goeddel et al., 1979; Korana, 1979; Itakura y Riggs, 1980; Caplan et al., 1983; Herrera Estrella et al., 1983; Mullis y Falona, 1987; Watson et al., 1988; Taghahian y Nickoloff, 1995; Wat-

son et al., 1996; Glick y Pasternack, 1998; Lengeler et al., 1999; Estruch et al., 1999; Ye et al., 2000; Nuccio et al., 2000; Brink et al., 2000; Larrick y Thomas, 2001; Daar et al., 2002; López-Munguía et al., 2002; Herrera Estrella et al., 2002; Arias y Muñoz, 2002; Barrera, 2002; Bolívar et al., 2002; Noyola et al., 2002; Gracia, 2002; Bosch, 2002; Yao et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Purohit, 2003; Sinagawa-García et al., 2004; Olivier y Magot, 2005; Prudhomme et al., 2006; Arias, 2007; Bolívar, 2007; Bolívar et al., 2007; Barrera, 2007; Gracia, 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; López-Munguía, 2007; Ramírez y Uribe, 2007; Revah y Ortiz, 2007; Soberón y Montero, 2007; Osuna y Paredes, 2007; Ayala-Rodríguez et al., 2009; Gilbert, 2010; Gibson et al., 2010; Bio, 2011; Bolívar et al., 2011; Ozden, 2012; Jinek et al., 2012; Saunders y Lee, 2013; Cong et al., 2013; Mali et al., 2013; Jinek et al., 2013; Qi et al., 2013; De Souza, 2013; Gilbert et al., 2014; Keinstiver et al., 2015; Nihongaki et al., 2015; Maxmen, 2015; Waltz, 2015a; Waltz, 2015b; Waltz, 2016; Ledford, 2016; Hutchinson III et al., 2016; Pinkert, 2016

PROPÓSITO, JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS DE LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS

Propósito, justificación y limitaciones de los transgénicos

Como se ha señalado, los organismos transgénicos se diseñan y construyen responsablemente a fin de generar una nueva característica en el organismo receptor, proveniente de otro organismo vivo. Ésta reside en el material genético transferido del transgén, o transgenes, para atender demandas presentes y futuras de

la humanidad y del medio ambiente. En casos excepcionales, como se discute en el capítulo VIII, se han transferido fragmentos de ADN de otro origen, los cuales no son genes pero otorgan al organismo receptor, también transgénico, nuevas propiedades. De esta manera es posible desarrollar mejores, más precisos y poderosos sistemas biológicos (ver figuras II.11, II.12, II.13 y II.14).

Existe un amplio conjunto de organismos transgénicos de primera y segunda generación que han sido construidos mediante técnicas de ingeniería genética, las cuales implican todas transferencia horizontal de ADN y posterior reorganización del genoma, como ocurre naturalmente en la transgénesis. Los OGM han adquirido nuevas funciones, específicas y relevantes, que residen en los transgenes, como se analiza más adelante. Los transgénicos se han diseñado y construido para atender responsablemente diferentes problemas, demandas y necesidades. Entre estos podemos mencionar la producción de nuevos medicamentos (incluyendo vacunas) para hacer frente problemáticas clínicas y de infecciones por organismos patógenos, y el diseño de plantas transgénicas para atender la demanda de producción de alimentos inocuos (y simultáneamente contender con la eliminación de plagas de insectos y malezas, reduciendo el uso de insecticidas químicos, muchos de los cuales dañan la salud y contaminan el medio ambiente). También podemos señalar el tratamiento de ecosistemas contaminados por otros procesos y la defensa sustentable de la biodiversidad y el medio ambiente.

Sin embargo, existen limitaciones para esta tecnología, ya que no es posible transferir

todas las propiedades y características deseadas de un organismo a otro, pues en muchos casos las características deseadas residen en más de un gen. Para estos casos es necesario considerar la transferencia horizontal de varios genes, para lo cual existen ejemplos exitosos. Uno de ellos es el arroz dorado, en el cual se han transferido dos transgenes adicionales a los de resistencia a insectos y a herbicidas a fin de propiciar la síntesis de un precursor de la vitamina A. También se han reportado fracasos. En este libro se analizan principalmente los organismos transgénicos de primera y segunda generación en los que se ha transferido sólo uno o dos transgenes y que se encuentran actualmente en utilización. Se subraya una vez más que las nuevas técnicas de edición fina de ADN tipo CRISPR-Cas9 permiten el diseño, la construcción y la caracterización eficiente de organismos transgénicos de tercera generación más precisos, donde el transgén o transgenes se insertan en sitios seleccionados del genoma de la célula del organismo blanco. En el capítulo VIII se presentan dos ejemplos de plantas transgénicas mexicanas de tercera generación con propiedades extraordinarias.

El objetivo de la biotecnología moderna es llevar a cabo modificaciones genéticas en diferentes organismos de la biodiversidad que porten transgenes para colaborar en la solución de problemas, con la certeza de que estos organismos son seres vivos producto de una biotecnología amigable a la salud y sustentable para la preservación de la biota y el medio ambiente. En el capítulo IX se detalla la evidencia científica que demuestra que los transgénicos son organismos de bajo riesgo pues son generados

mediante mecanismos similares a los procesos naturales de transferencia horizontal de ADN y reorganización del genoma, llamados transgénesis, que ocurren en la naturaleza.

Dada la importancia de estas consideraciones para sustentar la creación de plantas transgénicas, hay que resaltar que existen ejemplos de transgénesis que implican transferencia horizontal de genes bacterianos a plantas. Está el caso de genes que confieren capacidades fotosintéticas y otro, reciente, acerca de un camote transgénico que existe de manera natural, el cual lleva en su genoma genes provenientes de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*, la cual tiene la capacidad de infectar la mayor parte de los vegetales y les transfiere material genético de manera horizontal. Este camote modificado genéticamente es de suma importancia, ya que la evidencia disponible sugiere que, durante su propia evolución, su modificación genética fue crucial para la domesticación de la especie, pues le permitió formar tubérculos más grandes. Este ejemplo ilustra que el consumo de un alimento transgénico durante los 8,000 años en que ha existido no ha causado daño a la salud, al medio ambiente o a la biodiversidad. Además, como se señala en la sección anterior que aborda la construcción de plantas transgénicas, el microorganismo *Agrobacterium tumefaciens* y sus componentes han sido utilizados para desarrollar métodos avanzados de ingeniería genética para construir vegetales transgénicos (ver figura II.13). Otros ejemplos sobre transmisión horizontal de ADN de diferentes orígenes a vegetales se presentan en el capítulo IX.

Las plantas transgénicas han sido cuestio-

nadas por diferentes razones. Por ello, primero se aborda en esta sección una descripción de los propósitos y beneficios de los organismos transgénicos, y cómo se han construido usando en principio la estrategia de transferencia horizontal de ADN (ver figuras II.12 y II.13), por ser éste un proceso que ha ocurrido en el suelo, entre diferentes organismos, incluyendo plantas, como se analiza más adelante. Los vegetales transgénicos de primera y segunda generación fueron diseñados para contender, por un lado, con plagas de insectos y, por el otro, para conferirles resistencia a herbicidas químicos como el glifosato. Este mecanismo de transferencia horizontal de ADN, al ocurrir en plantas, les ha permitido adquirir nuevos genes a lo largo del tiempo y, como resultado, capacidades adicionales. Los cultivos transgénicos no habrían podido adquirir estas nuevas propiedades de otra forma. Así, las plantas transgénicas de primera y segunda generación que hoy se usan contienen dos tipos de genes adicionales en su genoma que les otorgan dos propiedades específicas. Uno de estos les confiere la capacidad para eliminar plagas de insectos; este tipo de gen proviene de la bacteria *Bacillus thuringensis* que convive con plantas ya existentes en el suelo. El otro tipo de transgén, que hoy se utiliza en el campo, otorga a las plantas la resistencia al glifosato. Existen ejemplos que comprueban que la transgénesis ha permitido a los vegetales receptores adquirir nuevas propiedades; este proceso natural se ha usado como modelo para la construcción de plantas transgénicas, con la diferencia de que el gen que se pretende incorporar puede ser seleccionado previamente y, con él, los beneficios que conlleva.

Se reitera que las plantas transgénicas de primera generación fueron construidas por medio de técnicas de ingeniería genética donde se utilizó ADN-T proveniente de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* como vector para introducir transgenes con capacidades bioinsecticidas. Esta bacteria, como se ha señalado, puede infectar diferentes plantas y vegetales. La capacidad de infección que existe naturalmente en este microorganismo fue usada para infectar plantas y transferirles horizontalmente ADN heterólogo y, simultáneamente, el transgén proveniente de otra bacteria, *B. thuringensis*. Así, mediante esta estrategia fue posible construir las primeras plantas transgénicas resistentes a insectos (ver figura II.13). Por lo tanto, los cultivos transgénicos son plantas que se construyen utilizando procesos y herramientas que existen en la naturaleza, imitándola, y por ello no son antinaturales, como algunos grupos argumentan, sino completamente naturales.

Por todo lo anterior, los cultivos transgénicos y sus productos, al ser organismos vivos que contienen genes específicos provenientes de otros integrantes de la biota, implican menor riesgo e impacto al medio ambiente, a la biodiversidad y a la salud humana y animal que las tecnologías basadas en productos de síntesis química. Éstas últimas, ejemplificadas por insecticidas químicos que se han usado de manera irresponsable a lo largo del tiempo, contaminan el medio ambiente y causan daños a la salud.

Los usos y beneficios que los organismos transgénicos y sus productos proveen en diferentes sectores (producción de medicamentos

en el sector salud; producción de alimentos industrializados y plantas en la industria alimentaria) se presentan en esta sección y en el capítulo V. Ellos indican claramente que el planeta se está moviendo hacia una bioeconomía sustentada en la biotecnología, con una participación cada vez más importante de los organismos transgénicos.

Uno de los propósitos de este libro es dar acceso a la información que sustenta la ausencia de daño a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad por el consumo y uso de transgénicos, así como destacar sus beneficios. Dicha información se halla disponible de manera gratuita en las páginas electrónicas de la AMC y de otras instituciones de educación superior e investigación. Se pretende que la opinión pública, la sociedad mexicana y sus gobernantes estén bien informados y sustenten sus decisiones con base en el amplio conocimiento científico que soporta estas consideraciones. Se menciona una vez más que los organismos transgénicos se construyen mediante procesos de transferencia horizontal de ADN y reorganización del genoma, fenómenos que ocurren naturalmente en la biota y que por ello resultan ser de bajo riesgo.

Wallin, 1927; Nass, 1969; Smith, 1979; Herrera Estrella et al., 1983; Caplan et al., 1983; Yang et al., 1985; Gupta y Golding, 1996; Doolittle, 1998; Andersson et al., 1998; Brown, 1999; Bolívar et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Bordenstein, 2003; Ibarra et al., 2003; Margulis y Sagan, 2005; Barrera, 2007; Bolívar et al., 2007; Vielle-Calzada et al., 2009; Horié et al., 2010; Belyi et al., 2010; Bolívar et al., 2011; Price et al., 2012; Xi et al., 2012; Zhenxiang



Figura II.16. Los organismos transgénicos y sus productos se utilizan en la producción de alimentos, medicamentos y vestido.

et al., 2012; Clive ISAAA, 2014; Fuentes et al., 2014; Crisp et al., 2015; Kyndt et al., 2015

Beneficios a la salud humana.

Nuevos medicamentos, fármacos y vacunas

El primer motivo que propició la construcción de células transgénicas fue la producción de

proteínas idénticas a las humanas en organismos genéticamente modificados para hacer frente a problemas de salud. El éxito de este objetivo data de hace más de 35 años gracias a la comercialización de proteínas transgénicas. En las farmacias de México y del mundo existen cerca de 100 medicamentos, incluyendo vacunas, de origen transgénico (llamados

también recombinantes) como la insulina, la hormona del crecimiento, los interferones, los anticoagulantes de la sangre (plasminógeno) y los anticuerpos humanizados, entre otros, que se utilizan para tratar y prevenir enfermedades humanas y animales, incluidas metabólicas e infecciosas, causadas por organismos patógenos como virus y bacterias.

Sin los transgénicos no existirían muchos de estos nuevos medicamentos, ya que anteriormente muchos de ellos se obtenían de cadáveres o de sangre, y varios no se producían a escala comercial. Muchos de estos medicamentos transgénicos se venden ahora como genéricos pues las patentes originales ya han vencido. En México los producen compañías nacionales como Probiomed S.A. y Laboratorios Liomont S.A. (ver figuras II.17 y II.18). Por otro lado, las agencias reguladoras de Estados Unidos y México aprobaron recientemente una nueva vacuna contra el virus de la influenza de origen transgénico, la cual se suma a la que existe contra el virus de la hepatitis B. Se adiciona así al arsenal de productos transgénicos para atender problemas clínicos y posibles infecciones por organismos patógenos. Estos nuevos productos biológicos se producen comercialmente a partir de organismos transgénicos (o células de ellos) y a la fecha no hay reporte de daños a la salud humana por su uso, ni impacto ambiental por el manejo industrial de microorganismos de origen recombinante que producen estos medicamentos (ver figura II.19).

Sin organismos transgénicos no sería posible atender las necesidades de la población enferma de diabetes, anemia, cáncer y muchas otras enfermedades, ya que el abasto estaría limitado no sólo por la baja concentración de estas



Figura II.17. Productos genéricos para la salud a la venta en farmacias de México, basados en proteínas recombinantes de origen transgénico de la compañía mexicana Probiomed S.A.

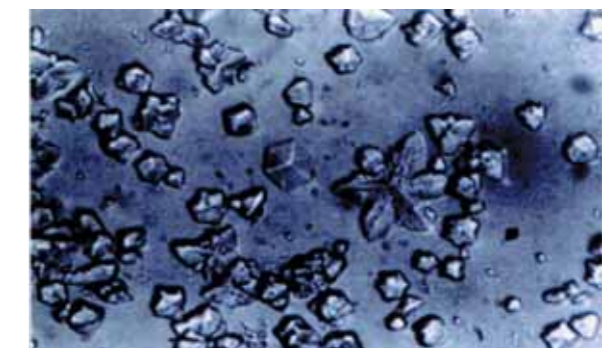


Figura II.18. Cristales de insulina humana producidos por microorganismos transgénicos en el Instituto de Biotecnología de la UNAM.

proteínas en sangre y tejidos humanos, sino por la complejidad ética derivada de un mercado basado en una materia prima de esta naturaleza, es decir el propio ser humano. De hecho, en proteínas como la insulina no existía antes una proteína humana de origen transgénico, sino que se empleaba la producida en cerdo, la cual tiene una estructura ligeramente diferente a la humana y por ello causaba reacciones alérgi-



Figura II.19. Proceso para la producción de medicamentos biotecnológicos.

cas en algunos pacientes diabéticos. Además, de haberse seguido utilizando animales en la producción comercial de proteínas para uso humano se habría incrementado la posibilidad de transmisión de virus potencialmente patógenos. Más aún, los organismos transgénicos que producen proteínas idénticas a las humanas no pueden actualmente ser sustituidos por ninguna otra tecnología. Desde 1981, la utilización como biomedicamentos de estas proteínas de origen transgénico idénticas a las humanas ha contribuido significativamente a mantener y mejorar la salud humana, así como a contener con graves enfermedades como la diabetes, el cáncer y las infecciones causadas por organismos patógenos, incluyendo virus.

Itakura et al., 1977; Goeddel et al., 1979; Pennica et al., 1983; Watson et al., 1988; Copsey y Delnat-

te, 1990; Winter y Milstein, 1991; Rickwood y Southworth, 1995; Watson et al., 1996; Brink et al., 2000; Bolívar et al., 2002; Arias y Muñoz, 2002; Daar et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Arias, 2007; Barrera, 2007; Bolívar et al., 2007; Ramírez y Uribe, 2007; Bio, 2011; flublock.liomont.com/lavacunabiotecnologicaquequieresalvaralmundo/, 2016; Visiongain Business Report 2017, Pharmaceutical contract manufacturing market 2017–2027

Usos y beneficios de organismos transgénicos y sus productos, en particular proteínas, en la industria alimentaria

El uso de proteínas con actividades enzimáticas de origen transgénico en la producción de alimentos ha tenido un impacto importante desde hace muchos años. Un ejemplo es la proteína con actividad enzimática quimosina en la producción de quesos: en Estados Unidos se utiliza en la elaboración de aproximadamente el 70% de la producción, cuando anteriormente sólo se disponía de extracto de estómago de ternera y de bacterias y hongos. Otras enzimas de origen transgénico son las amilasas que se utilizan en la hidrólisis de almidón, las pectinasas en la clarificación de jugos, las glucosa-oxidasas y catalasas para la deshidratación de huevo, las lipasas para la maduración de quesos y la transformación de aceites, las glucosa-isomerasas en la producción de jarabes fructosados, las glucanasas en la producción de cerveza y las lactasas para degradar la lactosa de la leche (ver figura II.20). Asimismo, las proteasas como la tripsina, con actividad enzimática para degradar proteínas, son utilizadas en la elaboración de detergentes biodegradables. Si bien en la mayor par-



Figura II.20. Los organismos transgénicos y sus productos, en particular sus proteínas, se utilizan en la producción de diferentes alimentos como cerveza, queso, leche deslactosada y jugos.

te de estos casos se emplean proteínas de origen transgénico purificadas, existen aplicaciones en la industria cervecera que emplean microorganismos transgénicos completos con una nueva actividad enzimática derivada de la modificación. Otras aplicaciones mejoran la calidad de alimentos eliminando la enzima que los afecta: tal es el caso reciente de manzanas cuyo deterioro oxidativo se detiene al eliminar o silenciar el gen del polifenol oxidasa. Este es uno de

los ejemplos que ha sido obtenido mediante la técnica CRISPR-Cas9 para editar finamente el genoma y eliminar genes.

Brink et al., 2000; Bolívar et al., 2002; Padilla y López-Munguía, 2002; López-Munguía, 2002; Bolívar et al., 2003; Kapuscinski et al., 2003; Por qué Biotecnología, 2006; López-Munguía, 2007; Barrera, 2007; Bolívar et al., 2007; Bio, 2011; Bolívar et al., 2011

Usos y beneficios de plantas transgénicas de primera y segunda generación para el desarrollo de cultivos vegetales

Los primeros cultivos de vegetales transgénicos, llamados de primera generación, llevan sus propios transgenes con capacidades bioinsecticidas que les confieren resistencia o defensa a las plagas de insectos. Fueron diseñados y desarrollados para simultáneamente reducir la cantidad de insecticidas químicos sintéticos que se utilizan en la agricultura y para controlar las plagas de insectos que causan daños devastadores a los cultivos convencionales. Estos objetivos ya se han cumplido, como se detalla extensamente en el capítulo V. Para lograr lo anterior, como se ha señalado, las plantas transgénicas de primera generación llevan un tipo de transgén en su genoma proveniente de la bacteria *Bacillus thuringensis*, la cual también vive en el suelo, que les confiere dicha resistencia. Este transgén (hay varios para diferentes insectos plaga) codifica para una sola proteína con capacidades bioinsecticidas que elimina específicamente insectos plaga cuando éstos muerden a la planta, pero no elimina otros insectos ni daña a otros organismos, ni a la planta que lo contiene. Las amplias y bien sustentadas evidencias científicas de ausencia de daño por consumir plantas transgénicas y sus productos se presentan en el capítulo IV.

La agricultura, como actualmente se practica, es poco sustentable por la pérdida masiva de biodiversidad y por el efecto inespecífico de la mayoría de los insecticidas químicos sintéticos que eliminan tanto plagas como insectos benéficos. Además de afectar la salud de los

campesinos que los aplican, estos insecticidas contaminan suelos y mantos freáticos, varios de ellos son recalcitrantes y algunos causan daños a la salud humana y animal.

Las plantas transgénicas de segunda generación se desarrollaron para incorporar un tipo de transgén adicional que confiere resistencia a herbicidas químicos, en particular al glifosato. Estos se utilizan para eliminar malezas o hierbas malas que crecen y compiten con los cultivos en el campo, reduciendo de manera grave su productividad. El problema se agrava al suministrar nutrientes en forma de fertilizantes (en particular compuestos con fósforo) para promover el crecimiento de los cultivos pero que las malezas aprovechan de manera más eficiente (los fosfatos son utilizados por plantas y bacterias para sintetizar ADN y ARN). Herbicidas químicos sintéticos como el glifosato se usan desde hace 50 años para eliminar malezas que de otra manera tendrían que eliminarse físicamente mediante la labor de campesinos y sus familias, proceso altamente contaminante, injusto y desgastante, conocido en zonas rurales como “desquelitar”.

En el capítulo VIII se presenta una nueva alternativa tecnológica de gran valor para la salud humana, el medio ambiente y la biodiversidad, que permite no utilizar herbicidas químicos para eliminar malezas. Ésta es el uso de plantas transgénicas que emplean el compuesto fosfito en vez de fósforo como fertilizante. Lo extraordinario de esta alternativa es que las hierbas y malezas no crecen en fosfito como fuente de fósforo, y por lo tanto el uso de herbicidas químicos para eliminarlas se reduce. Lo anterior permite vislumbrar un escena-

rio futuro de menor contaminación del medio ambiente por insecticidas y herbicidas químicos sintéticos, y por ende de mayor sustentabilidad y de menor riesgo para la salud. Podríamos considerar esta nueva alternativa como la tercera generación de plantas transgénicas (con genes que confieren propiedades extraordinarias, además de la resistencia a insectos plaga, como la de utilizar el fosfito como fertilizante) para afrontar demandas presentes y futuras.

Dos ejemplos de plantas transgénicas de tercera generación con propiedades extraordinarias, desarrolladas en laboratorios mexicanos, se detallan en el capítulo VIII. Uno es el expuesto líneas arriba acerca de plantas transgénicas que utilizan fosfito como fertilizante; otro es un maíz transgénico que no lleva un transgén que le otorgue nuevas propiedades, sino que alberga fragmentos de ADN de otros orígenes (por ello es transgénico) que le permite modificar la expresión del gen que codifica para una proteína específica y así adquirir resistencia a ciertos factores abióticos del clima, como heladas y calor.

La reciente declaración que a marzo de 2017 firman 123 premios Nobel, la cual se comenta en los capítulos III, IV y VI, señala que las plantas transgénicas que se usan en el campo representan una tecnología perfeccionada, también llamada “agricultura de precisión”, que es superior a las anteriores. Esta tecnología ha permitido reducir tiempos e incertidumbre en la creación de nuevos cultivares, aportando nuevas ventajas en beneficio de la sustentabilidad del medio ambiente y de la sociedad.

Las plantas transgénicas se comercializan desde 1996. Tras más de 20 años de uso a gran es-

cala cabe resaltar que no han ocasionado efectos nocivos a la salud humana, al medio ambiente o a la biodiversidad, más allá de los que ocasiona la agricultura en general. Es importante destacar que la aprobación de toda planta transgénica como alimento humano o animal requiere de un protocolo de análisis para demostrar su inocuidad. Como establecen las agencias y autoridades sanitarias y de inocuidad de diferentes países, incluyendo México, y conforme al Protocolo de Cartagena, la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM) y la Ley General de Salud (ver capítulos IV, VI y X), la evaluación de riesgos debe considerar las características del OGM, en particular el nuevo gen y la proteína que codifica, y el análisis de todos los productos del metabolismo, es decir la composición de la planta en su totalidad. Entre otras pruebas se requiere demostrar la inocuidad y ausencia de daño por el consumo de proteínas de origen transgénico y del alimento transgénico en su conjunto, mediante pruebas de alimentación en animales. Algunas publicaciones (las más importantes se describen en los capítulos IV y VI) señalan efectos negativos posibles y de toxicidad en animales por consumo de algunos cultivos transgénicos. Sin embargo, dichas publicaciones, como la de Séralini y colaboradores, 2012, no están bien sustentadas científicamente ni son concluyentes, pues los mismos experimentos, en condiciones y con controles adecuados, han sido realizados por muchos otros grupos de manera independiente, con reproducibilidad y sin daño a la salud de los animales utilizados.

Por lo anterior, como se indica en los capítulos IV y VI, ni la OMS, ni diversas agencias gubernamentales responsables de la sanidad e

inocuidad alimentaria y del manejo de los productos transgénicos en diferentes países, han considerado que los resultados publicados sobre estudios de toxicidad por alimentación de algunos animales ameriten retirar del mercado algunas de las plantas transgénicas o los productos derivados de ellas que actualmente se consumen. La ingesta de alimentos transgénicos no causa daño a la salud humana ni a la animal, y su uso conlleva grandes beneficios. Los capítulos siguientes explican las consideraciones a favor y analizan las publicaciones en contra del uso de transgénicos, por los supuestos daños, sin sustento científico, acerca de las plantas transgénicas.

Casi toda tecnología tiene sus detractores y la de los transgénicos no es la excepción. El capítulo VI en particular se dedica a contestar a profundidad diversos señalamientos en contra de los cultivares transgénicos. Existen muchos intereses por controlar el mercado mundial de alimentos y, dado que la biotecnología es estratégica para este propósito, tales intereses se comentan en los capítulos señalados.

Herrera Estrella et al., 1983; Caplan et al., 1983; Potrykus, 1989; Nuccio et al., 1999; Cabello et al., 2001; McDuffie et al., 2001; Bolívar et al., 2002; Herrera Estrella et al., 2002; Noyola et al., 2002; Yao et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Herrera Estrella et al., 2003; Purohit, 2003; Rascón-Cruz et al., 2004; APBN, 2004; Trigo y Capp, 2006; OMS, 2006; Bolívar et al., 2007; Dev y Rao, 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Marvier et al., 2007; Duan et al., 2008; Cibiogem, 2008; Vielle-Calzada et al., 2009; Ayala-Rodríguez et al., 2009; Bio, 2011; Bolívar et al., 2011; Band et al., 2011; Agreda Laguna

et al., 2012; Snell et al., 2012; Brookes y Barfoot, 2012; Abbas et al., 2013; Herman y Price, 2013; Koutros et al., 2013; López-Arredondo y Herrera Estrella, 2013; Ricroch, 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Alavanja et al., 2014; Clive ISAAA, 2014; Jones et al., 2014; Klümper y Qaim, 2014; Nicolia et al., 2014; Ricroch et al., 2014; Van Eenennaam y Young, 2014; Cibiogem, 2015; European Commission-Fact Sheet, 2015; Panchin y Tuzhikov, 2016; NASEM, 2016; Xoconostle, 2017

Cifras sobre producción y consumo de plantas transgénicas y productos derivados en el mundo

Variedades transgénicas de maíz, arroz y soya se consumen en muchos países; cada vez es mayor el número de hectáreas que se cultivan con plantas transgénicas. En 2007 se reportaron 114.3 millones de hectáreas y más de 134 millones en 2009 de diferentes variedades de OGM en 27 países, de acuerdo al reporte 2014 del Servicio Internacional para la Adquisición de Aplicaciones Agro-biotecnológicas (ISAAA, por sus siglas en inglés). Para 2015 el monto de hectáreas sembradas de OGM a nivel comercial ascendió a 179.7 millones, que incluyen cultivos en 28 países y empleando 18 millones de agricultores.

En la actualidad se cultivan nueve variedades de plantas transgénicas: arroz, maíz, soya, canola, calabaza, papaya, alfalfa, algodón y papa (ver figura II.21). Ciertamente en Europa existe una situación dividida en relación a los transgénicos pues varios países prohíben su cultivo. Sin embargo, el maíz transgénico se cultiva en cinco países miembros de la Unión Europea (incluyendo España) y los alimentos



Calabaza



Alfalfa



Soya



Canola



Maíz

Figura II.21. Diferentes plantas que se cultivan en variedades transgénicas.

transgénicos se consumen en muchos países europeos: existen 58 productos alimentarios autorizados por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus siglas en inglés). La situación en Europa puede modificarse sustantivamente debido a la reciente propuesta de compra de Monsanto por la compañía alemana Bayer, como se señala en el capítulo X. Las plantas transgénicas se siembran y consumen en nueve países de Iberoamérica, con amplios beneficios para los agricultores que las cultivan, como se detalla en los capítulos IV, V, VI y X.

En Estados Unidos, el 93% de la soya que se cultivó en 2015 es transgénica, al igual que el 90% de maíz y algodón. El 95% del betabel y el 90% de la alfalfa norteamericanos también son transgénicos. México importa desde hace años maíz amarillo transgénico de Estados Unidos; actualmente más del 70% del producto proviene del norte de la frontera para hacer frente a la demanda nacional. Este maíz se utiliza principalmente como alimento pecuario y para procesamiento, aunque algunos mexicanos lo consumen en grano y en otras presentaciones.

Estados Unidos, México y otros países comercializan productos derivados del maíz y de soya transgénicos, y se encuentran dispo-



Figura II.23. El camote es un producto naturalmente transgénico

nibles en los anaqueles de sus supermercados, incluyendo cereales, mermeladas y aceites, como puede apreciarse en la figura II.22. Las plantas transgénicas y sus productos se han consumido por más de 400 millones de habitantes y por más de mil millones de animales en el mundo.

Se estima que para 2050 la población mundial aumentará de 7,000 millones de personas que habitamos actualmente el planeta a 9,000 millones, por lo que los problemas que habrá



Figura II.22. Ejemplos de alimentos procesados que contienen maíz y soya transgénicos.

de enfrentar la humanidad serán cada vez más graves: pérdida de productividad agrícola, deterioro y contaminación por insecticidas químicos y otros compuestos dañinos, contaminantes y recalcitrantes en suelos, escasez de agua, agotamiento de fuentes de energía, calentamiento global y cambio climático, contaminación y daño a la salud por insecticidas y herbicidas químicos, algunos carcinogénicos, nuevas plagas y enfermedades, disminución de áreas verdes y pérdida de biodiversidad (ver figura II.24).

El uso sustentable, responsable y pertinente de organismos transgénicos, en particular los cultivares, no es la única alternativa ni la solución mágica, pero representa una herramienta poderosa que permite plantear escenarios para hacer frente a estas calamidades. Organismos con nuevas propiedades y variedades de plantas transgénicas de tercera generación, capaces de crecer en diferentes agroquímicos y resistentes al frío y a la sequía, permitirán a los países que desarrollen biotecnología afrontar problemas locales y globales, presentes y futuros, como se explica en el capítulo VIII. Será indispensable, asimismo, involucrar las técnicas CRISPR-Cas9 en la construcción de nuevos organismos transgénicos. Los capítulos III, VI, VII y VIII tratan la importancia de sumar conocimientos, recursos y capacidades para contender con las problemáticas señaladas, incluyendo la conservación de variedades nativas.

Es indispensable contar con información sobre la situación del diseño de cultivares transgénicos de diferentes grupos y países, máxime que las patentes que aún los protegen son pro-

piedad de compañías transnacionales, algunas vencidas y otras por vencer. Como se analiza en los capítulos VIII y X, la implementación de legislación adecuada y la información sustentada científicamente sobre los beneficios de los transgénicos ayudará a orientar el desarrollo de OGM hacia aquellos países que resuelvan sus problemáticas específicas con menor impacto ambiental y con el uso adecuado, sustentable y justo de sus recursos naturales. Bloquear la biotecnología y el desarrollo de organismos transgénicos negaría a México la oportunidad de utilizar ciencia y tecnología biológica para atender problemas locales y globales, sobre todo cuando las tecnologías transgénicas están siendo adoptadas y avaladas alrededor del mundo, gracias a los beneficios que implica el uso de OGM, como se detalla en los capítulos III, IV, V y VIII.

Estruch et al., 1997; The Biotech Revolution, 1998; Nuccio et al., 1999; Cabello, 2001; McDuffie et al., 2001; Potrykus, 2001; Barrera et al., 2002; Bolívar et al., 2002; Herrera Estrella et al., 2002; López-Munguía et al., 2002; Noyola et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Rascón-Cruz et al., 2004; Olivier y Magot, 2005; Bolívar et al., 2007; Dev y Rao, 2007; Escenario Base 09-18 Sagarpa México, 2009; Tang et al., 2009; Gilbert, 2010; Band et al., 2011; Bio, 2011; Bolívar et al., 2011; Agreda Laguna et al., 2012; López-Arredondo y Herrera Estrella, 2013; Koutros et al., 2013; Solleiro y Castañeda, 2013; Jones et al., 2014; Alavanja et al., 2014; Clive ISAAA, 2014; Clive ISAAA, 2015; Panorama Agroalimentario, Maíz, 2015: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf; NASEM, 2016; Xoconostle, 2017



Plagas en cultivos de papa y jitomate



Gusano en granos de maíz



Contaminación de ecosistema



Célula cancerosa

Figura II.24. Problemas relevantes y delicados: contaminación, plagas y enfermedades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agreda Laguna K.A. *et al.* 2012. Methods to obtain drought resistant plants. Patente WO2012208506 A1. Desarrollada por B. Xoconostle y colaboradores.
- Abbas H.K. *et al.* 2013. Implications of traits on mycotoxin contamination in maize. Overview and recent experimental results in southern United States. *J. Aric. Food. Chem.* 61(48): 11759–11770.
- Alavanja M.C.R. *et al.* 2014. Non-Hodgkin lymphoma risk and insecticide, fungicide and fumigant use in the agricultural health study. *Plos One* 9(10): e109332.
- Allis C.D., Jenuwein T., y Reinberg D. 2007. Epigenetics. Cold Spring Harbor, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York.
- Allis C.D., Jenuwein T. 2016. The molecular hallmarks of epigenetic control. *Nature Reviews Genetics* 17: 487–500.
- Andersson S., Zomorodippur A., Andersson J. *et al.* 1998. The genome sequence of *Rickettsia prowazaki* and the origin of mitochondria. *Nature* 396: 133–140.
- APBN (Asia Pacific Biotech News). 2004. Green Light for GM Cotton Australia. *APBN* 20, 1125.
- Arias C. 2007. La vacuna contra la hepatitis B; un éxito de la Biotecnología. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 355–370.
- Arias C., Muñoz O. 2002. La biotecnología en el sector salud. En: Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.), Fondo de Cultura Económica y Conacyt, 171–183.
- Avery O., MacLeod C., McCarty R. 1944. Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types. *J. Exp. Med.* 79, 137-158.
- Ayala-Rodríguez A.E., Gutiérrez-Dorado R., Millán-Carrillo J., Mora-Rochín S., López-Valenzuela J.A., Valdez-Ortiz A., Paredes-López O., Reyes-Moreno C. 2009. Nixtamalized flour and tortillas from transgenic maize (*Zea mays L.*), expressing amarantin: Technological and nutritional properties. *Food Chemistry* 114: 50–56.
- Band P.R. *et al.* 2011. Prostate cancer risk and exposure to pesticides in British Columbia farmers. *Prostate* 71 (2): 168-183.
- Barrera H., 2002. Biotecnología en el sector pecuario. En: Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Fondo de Cultura Económica y Conacyt, 225–241.
- Barrera H. 2007. Manipulación genética de animales. Transgénesis y clonación. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 131–165.
- Belyi V. *et al.* 2010. Unexpected inheritance: Multiple integration of ancient bornavirus and ebolavirus/marburgvirus sequences in vertebrate genomes. *Plos Pathogens* 6 (7): e1001030.
- Bio. 2011. Biotechnology Industry Organization. History of Biotechnology. <http://value-sofbiotech.com/biotech.com/biotech-basics/history>.

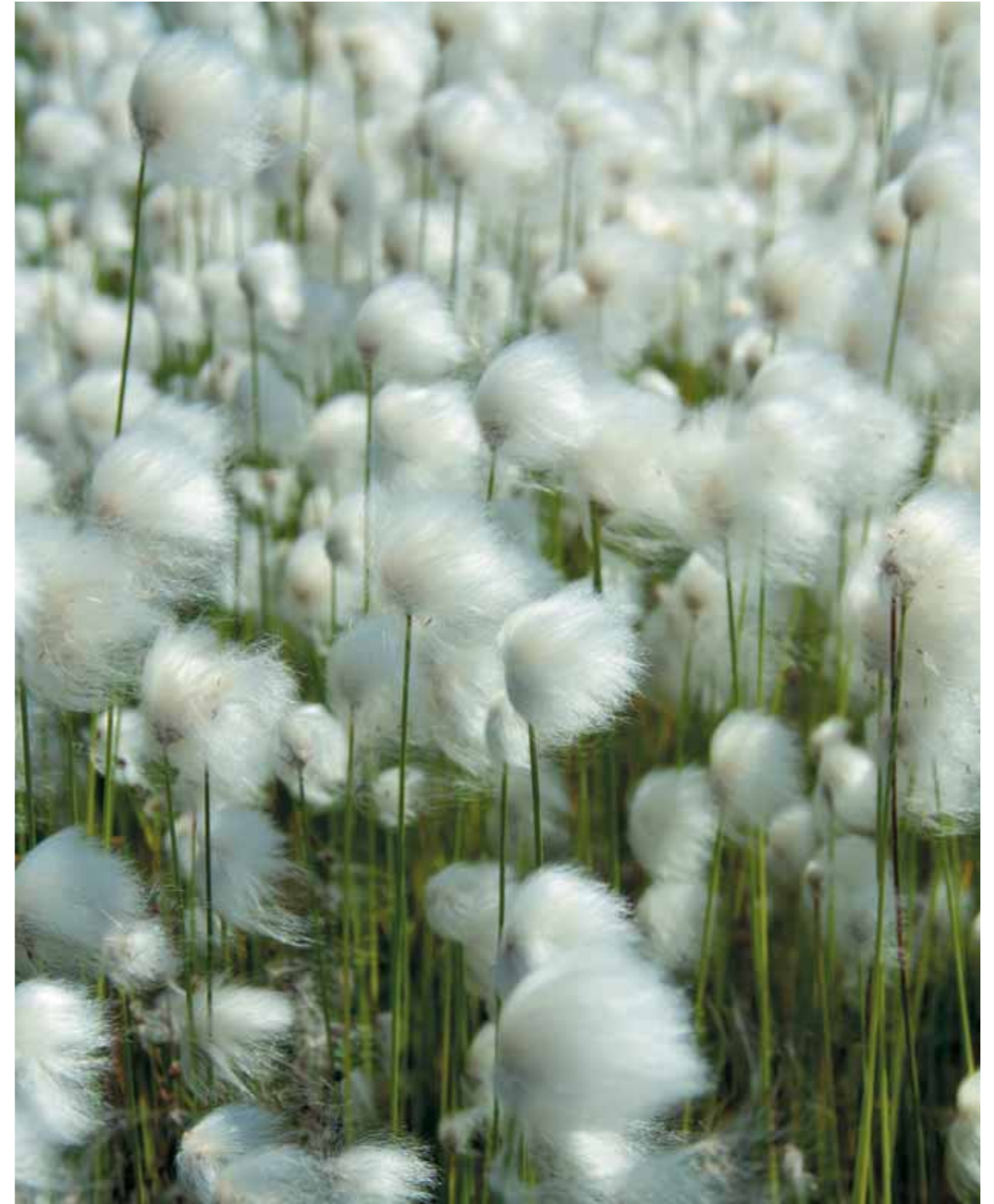
17. Bishop O.T. 2014. Bioinformatics and data analysis in microbiology. Özlem T. Bishop (Ed.). Caister Academic Press, UK.
18. Bolívar F. 2007. Ciencia genómica, proteómica y bioinformática. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 85–116.
19. Bolívar F., Arias C., Arriaga E., Barrera H., Bosch P., Espinosa J., Galindo E., Gálvez A., Gracia A., Herrera Estrella L., Larqué A., López-Munguía A., Muñoz O., Noyola A., Ortega R., Quintero R., Ramírez O., Revah S., Serrato J., Soberón J. y Soberón X. 2002. Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.). Fondo de Cultura Económica y Conacyt.
20. Bolívar F. *et al.* 2003. Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI Módulo 1 (Genómica, Proteómica y Bioinformática), Módulo 3 (Biotecnología Agrícola), Módulo 7 (Ingeniería Celular, Biodiversidad e Industria). El Colegio Nacional.
21. Bolívar F. *et al.* 2007. Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.
22. Bolívar F. *et al.* 2011. Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Comité de Biotecnología, Academia Mexicana de Ciencias.
23. Bolívar F., Rodríguez R., Greene P., Betlach M., Heyneker H., Boyer H., Crossa J., Falkow S. 1977. Construction and characterization of new cloning vehicles. II A multiple purpose cloning vehicle. *Gene* 2: 95–113.
24. Borderstein S.R. 2003. Simbiosis and the origin of species. En: *Insect Symbiosis*. Bourtris K., Miller T. (Eds.). CRC Press, USA.
25. Bosch P. 2002. Importancia de la biotecnología para la economía mexicana. En: Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Fondo de Cultura Económica y Conacyt, 27–41.
26. Brenner S., Jacob F., Messelson M. 1961. An unstable intermediate carrying information from genes to ribosomes for protein synthesis. *Nature* 190: 576–581.
27. Brink M. *et al.* 2000. Developing efficient strategies for the generation of transgenic cattle which produce biopharmaceuticals in milk. *Theriogenology* 53: 139–148.
28. Brookes G., Barfoot P. 2012. Global Impact of biotech crops. Environmental effects 1996–2010. *GM Crops and Food. Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 3(2): 129–137.
29. Brown T.A. 1999. Genomes. Wiley-Liss. New York, USA.
30. Cabello G. *et al.* 2001. A rat mammary tumor model induced by the organophosphorous pesticides parathion and malathion, possibly through acetylcholinesterase inhibition. *Environ. Health Perspect.* 109 (5): 471–479.
31. Caplan A. *et al.* 1983. Introduction of genetic material into plant cells. *Science* 222 (4625): 815–821.
32. Cibogem. 2008. Bioseguridad en la aplicación de la Biotecnología y el uso de los organismos genéticamente modificados. Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados.
33. Cibogem. 2015. Bioseguridad en la aplicación de la Biotecnología y el uso de los organismos genéticamente modificados. Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados.
34. Clive J. 2014. ISAAA. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2014. Brief No. 49, ISAAA: Ithaca, New York.
35. Clive J. 2015. ISAAA, 20th anniversary (1996 to 2015) of the global commercialization of biotech crops and biotech crop highlights in 2015. ISAAA Brief No. 51, ISAAA: Ithaca, New York.
36. Coen E. 1999. The art of genes: how organisms make themselves. Oxford University Press.
37. Cohen S. *et al.* 1973. Construction of biologically functional bacterial plasmids *in vitro*. *PNAS* 70: 3240–3244.
38. Cong L. *et al.* 2013. Multiplex genome engineering using CRISPR. *Science* 339: 819–823.
39. Copsey D., Delnatte S. 1990. Genetically engineered human therapeutic drugs. Copsey D., Delnatte S. (Eds.). Stockton Press, McMillan Publishers, UK.
40. Crick F. 1958. On protein synthesis. Biological replication of macromolecules. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 12: 138.
41. Crisp A. *et al.* 2015. Expression of multiple horizontal acquired genes is a hallmark of both vertebrates and invertebrate. *Genome Biology* 16(50).
42. Cubas P., Vincent C., Coen E. 1999. An epigenetic mutation responsible for natural variation in floral symmetry. *Nature* 401(6749): 157–61.
43. Daar A.S. *et al.* 2002. Top ten biotechnologies for improving health in developing countries. *Nature Genetics* 32: 229–232.
44. Darwin C. 1859. On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favored races in the struggle for life, 1st edition. John Murray, London.
45. Darwin C. 1868. The variation of animals and plants under domestication, 1st edition. John Murray, London.
46. De Souza N. 2013. RNA-guided gene editing. *Nature Methods* 10(3): 189.
47. Dev S.M., Rao N.C. 2007. Socio economic impact of Bt Cotton. Monograph No 3. Hyderabad. Centre for Economic and Social Studies (CESS).
48. Doolittle W. 1998. You are what you eat: a gene transfer ratchet could account for bacterial genes in eukaryotic nuclear genomes. *Trends Genetics* 14: 307–311.
49. Duan J.J. *et al.* 2008. A Meta-analysis of effects of Bt crops on honey bees (Hymenoptera: Apidae). *Plos One* 3(1): e1415.
50. Eitcher S.R., Schmitz R.J., Springer N.M. 2014. Epigenetics: beyond chromatin modifications and complex genetic regulation. *Plant Physiology* 165: 933–947.
51. EscenarioBase09–18. Proyecciones para el sector agropecuario. 2009. Sagarpa, Ciudad de México. www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Escenariobase09.pdf
52. Estruch J. *et al.* 1997. Transgenic plants: An emerging approach to pest control. *Nature Biotechnology* 15: 137–141.
53. European Commission-Fact Sheet: Questions and answers on EU's policies on GMOs. 2015. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-4778_en.htm

54. Fuentes I. *et al.* 2014. Horizontal genome transfer as an asexual path to the formation of new species. *Nature* 511: 232–235.
55. Fuentes M., LaBaer J. 2014. Proteomics: Targeted Technology, Innovations and Applications. Fuentes M., LaBaer J., (Eds.). Caister Academic Press, UK.
56. Gibson D.G. *et al.* 2010. Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science* 329: 52–56.
57. Gilbert L.A. *et al.* 2014. Genome-scale CRISPR-mediated control of gene repression and activation. *Cell* 159 (3): 647–661.
58. Gilbert N. 2010. Food: Inside the hothouses of Industry. *Nature* 466: 548–551.
59. Glick B.R., Pasternack J.J. 1998. Molecular Biotechnology, American Society for Microbiology.
60. Goeddel D. *et al.* 1979. Expression of chemically synthesized genes for human insulin. *PNAS* 76: 106–110.
61. Gracia A. 2007. Peces transgénicos en acuicultura. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 659–673.
62. Gupta R., Golding G. 1996. The origin of the eukaryotic cell. *Trends Biochem. Sci.* 21: 166–171.
63. Gustafsson A. 1979. Linnaeus' Peloria: The history of a monster. *Theoretical and Applied Genetics* 54(6): 241–248.
64. Haig D. 2004. The (dual) origin of epigenetics. Cold Spring Harbor *Symposia on Quantitative Biology* 69(0): 67–70.
65. Hannon G.J. 2003. RNAi: A guide to gene silencing. Cold Spring Harbor, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York.
66. Hayden E.C. 2011. Human genome at ten: Life is complicated. *Nature* 464: 646–647.
67. Heitz E. 1928. Das Heterochromatin der Moose. *Jahrb Wiss Bot* 69: 762–818.
68. Herman R.A., Price W.D. 2013. Unintended compositional changes in genetically modified (GM) crops: 20 years of research. *J. Agric. Food Chem.* 61(48): 11695–11701.
69. Herrera Estrella L. *et al.* 1983. Expression of chimeric genes transferred into plant cells using a Ti-plasmid-derived vector. *Nature* 303: 209–213.
70. Herrera Estrella L. *et al.* 2002. La Biotecnología en el sector agrícola. En: Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Fondo de Cultura Económica y Conacyt, 147–166.
71. Herrera Estrella L., Martínez M. 2003. Aplicaciones y controversias de las plantas transgénicas. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI, Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.). El Colegio Nacional.
72. Herrera Estrella L., Martínez M. 2007. Plantas transgénicas. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 167–194.
73. Heyneker H. *et al.* 1976. Synthetic *lac* operator is functional *in vivo*. *Nature* 263: 748–752.
74. Horie M. *et al.* 2010. Endogenous non-retroviral RNA virus elements in mammalian genomes. *Nature* 463(7277): 84–87.
75. Hutchinson III C.A. *et al.* 2016. Design and synthesis of a minimal bacterial genome. *Science* 351(6280): aad6553 1–11.
76. Ibarra J., Soberón M., Bravo A. 2003. La biotecnología y el control biológico de insectos. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.). El Colegio Nacional, Ciudad de México.
77. Itakura K., Hirose T., Crea R., Riggs A., Heyneker H., Bolívar F., Boyer H. 1977. Expression in *Escherichia coli* of chemically synthesized gene for the hormone somatostatin. *Science* 198(4321): 1056–1063.
78. Itakura K., Riggs A. 1980. Chemical DNA synthesis and recombinant DNA studies. *Science* 209: 1401–1405.
79. Jackson D. *et al.* 1972. Biochemical method for inserting new genetic information into DNA of Simian virus 40: circular SV40 DNA molecules containing lambda phage genes and the galactose operon of *Escherichia coli*. *PNAS* 67: 2904–2909.
80. Jenuwein T. 2001. Translating the Histone Code. *Science* 293(5532): 1074–1080.
81. Jinek M. *et al.* 2012. A programmable dual RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337: 816–821.
82. Jinek M. *et al.* 2013. RNA programmed genome editing in human cells. *eLife* 2: e00471.
83. Jones R.R. *et al.* 2014. Incidence of solid tumours among pesticide applicators exposed to the organophosphate insecticide diazinon in the agricultural health study: an updated analysis. *Occup. Environ. Med.* 72: 496–503.
84. Kapuscinski A.R. *et al.* 2003. Making 'safety first' a reality for biotechnology products. *Nature Biotechnology* 21(6): 599–601.
85. Kleinstiver B.P. *et al.* 2015. Engineering CRISPR-Cas nucleases with altered PAM specificities. *Nature* 523(7561): 481–485.
86. Klümper W., Qaim M. 2014. A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. *Plos One*, 9(11): e111629.
87. Korana H. 1979. Total synthesis of a gene. *Science* 203: 614–625.
88. Kornberg A. 1988. DNA replication. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*. 951: 235–239. [https://doi.org/10.1016/0167-4781\(88\)90091-7](https://doi.org/10.1016/0167-4781(88)90091-7).
89. Koutros S. *et al.* 2013. Risk of total and aggressive prostate cancer and pesticide use in the agricultural health study. *Am. J. Epidemiol.* 177(1): 59–74.
90. Kreuzer H., Massey A. 2005. Biology and Biotechnology. Science, applications and issues. American Society for Microbiology, USA.
91. Kyndt T. *et al.* 2015. The genome of cultivated sweet potato contains *Agrobacterium* T-DNAs with expressed genes: An example of a naturally transgenic food crop. *PNAS* 112(18): 5844–5849.
92. Larqué-Saavedra A. 2016. Biotecnología prehispánica en mesoamérica. *Rev. Fitotec. Mex.* 39(2): 107–115.
93. Larrick J.W. Thomas D.W. Producing proteins in transgenic plants and animals. *Curr. Opin. Biotechnol.* 12(4): 411–418.
94. Law J.A., Jacobsen S.E. 2010. Establishing, maintaining and modifying DNA methylation patterns in plants and animals. *Nature reviews* 11: 204–220.
95. Ledford H. 2016. Riding the CRISPR wave. *Nature* 531: 156–159.
96. Lengeler J. *et al.* 1999. Biology of prokaryotes. Blackwell Science, USA.
97. López-Arredondo D.L., Herrera Estrella L. 2012. Engineering phosphorus metabolism

- in plants to produce a dual fertilization and weed control system. *Nat. Biotechnol.* 30(9): 889–893.
98. López-Arredondo D.L., Herrera Estrella L. 2013. A novel dominant selectable system for the selection of transgenic plants under *in vitro* and greenhouse conditions based on phosphite metabolism. *Plant Biotechnol. J.* 11(4): 516–525.
99. López-Munguía A. 2007. Casos exitosos de la tecnología enzimática y la biocatálisis en México. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 429–450.
100. López-Munguía A. *et al.* 2002. Biotecnología e industria. En: Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Fondo de Cultura Económica y Conacyt, 245–278.
101. Mali P. *et al.* 2013. RNA-guided human genome engineering via Cas 9. *Science* 339: 823–826.
102. Margulis L., Sagan D. 2005. What is life? University of California Press, USA.
103. Martienssen R.A. 2001. DNA methylation and epigenetic inheritance in plants and filamentous fungi. *Science* 293(5532): 1070–1074.
104. Marvier M. *et al.* 2007. A meta-analysis of effects of *Bt* cotton and maize on nontarget invertebrates. *Science* 316(5830): 1475–1477.
105. Maxmen A. 2015. Three technologies that changed genetics. *Nature* 528(7580): S2–S3.
106. McClintock B. 1950. The origin and behavior of mutable loci in maize. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 36(6): 344–55.
107. McDuffie H.H. *et al.* 2001. Non-Hodgkins lymphoma and specific pesticide exposures in men: cross-Canada study of pesticides and health. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 10(11): 1155–1163.
108. Messelson M., Stahl F.W. 1958. The replication of DNA in *E. coli*. *PNAS* 44(7): 671–682.
109. Morgante M. *et al.* 2005. Gene duplication and exon shuffling by helitron-like transposons generate intraspecies diversity in maize. *Nat. Genet.* 37(9): 997–1002.
110. Mulet J.M. 2014. Comer sin miedo. Mitos, falacias y mentiras sobre la alimentación en el siglo XXI. Paidós, Ediciones Destino, Barcelona.
111. Mullis K., Falonna F. 1987. Specific synthesis of DNA *in vitro* via polymerase catalyzed chain reaction. *Meth. Enzymol.* 55: 335–350.
112. Murray K. 1964. The Occurrence of ϵ -N-Methyl Lysine in Histones. *Biochemistry* 3(1): 10–15.
113. Nass S. 1969. Similarities of bacteria and mitochondria. En: *International Review of Cytology*. G.H. Bourne, J.F. Danielli (Eds.). Academic Press, EUA, 25: 55–118.
114. Nelson D.L., Cox M.X. 2008. Lehninger. Principios de bioquímica. Omega, España.
115. Nicolía A. *et al.* 2014. An overview of the last 10 years of genetically engineered crop safety research. *Crit. Rev. Biotechnol.* 34(1): 77–88.
116. Nihongaki Y. *et al.* 2015. Photoactivable CRISPR-Cas9 for optogenetic genome editing. *Nature Biotechnol.* 33: 755–760.
117. Noyola A. *et al.* 2002. Biotecnología, medio ambiente y biodiversidad. En: Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Fondo de Cultura Económica y Conacyt, 187–207.
118. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2016. Genetically engineered crops: experiences and prospects (Cultivares desarrollados por ingeniería genética: experiencias y perspectivas). The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/23395>
119. NSTC (National Science and Technology Council. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), executive office of the president, 1995. Biotechnology for the 21st century: New Horizons. A report of the Biotechnology Research Subcommittee, USA.
120. Nuccio M. *et al.* 1999. Metabolic engineering of plants for osmotic stress resistance. *Current Opinion in Plant Biology* 2: 128–134.
121. Ollivier B., Magot M. (Eds.). 2005. Petroleum microbiology. ASM Press, USA.
122. OMS. 2006. 20 preguntas sobre los alimentos genéticamente modificados (GM).
123. Ortiz S., Ezcurra E. 2003. La liberación de cultivos transgénicos al medio ambiente: esquemas adecuados y su importancia en el manejo del riesgo. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.). El Colegio Nacional, 115–132.
124. Osuna J., Paredes O. 2007. Mejoramiento de características y calidad alimentaria y nutracéutica de plantas mediante biología molecular. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 451–498.
125. Ozden Y. (Ed.). 2012. Transgenic plants; advances and limitations. *InTech*.
126. Padilla J., López-Munguía A. 2002. Alimentos transgénicos. ADN Editores y Conaculta.
127. Panchin A.Y., Tuzhikov A.I. 2016. Published GMO studies find no evidence of harm when corrected for multiple comparisons. *Crit. Rev. Biotechnol.* 1–5. DOI: 10.3109/07388551.2015.1130684.
128. Panorama Agroalimentario. 2015. Maíz 2015. FIRA, Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf
129. Pennica D. *et al.* 1983. Cloning and expression of human tissue-type plasminogen activator cDNA in *E. coli*. *Nature* 301: 214–221.
130. Pinkert C.A. 2016. Transgenic animal technology. C.A. Pinkert (Ed.). 3rd edition. Elsevier B.V.
131. Popp J. *et al.* 2012. The role of Biotechnology in a Sustainable Food Supply. New York, Cambridge University Press, USA.
132. ¿Por qué biotecnología? 2006. www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/doc/El%20Cuaderno%2054.doc
133. Potrykus I. 1989. Gene transfers to cereals: an assessment. *Trends in Biotechnology* 7: 269–273.
134. Potrykus I. 2001. Golden rice and beyond. *Plant Physiol.* 125: 1157–1161.
135. Potsova M.J. (Ed.). 2014. Genome Analysis: Current Procedures and Applications. Caister Academic Press, UK.
136. Premio Nobel de Medicina. 1983. Press Release. Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureaates/1983/press.html
137. Price D.C. *et al.* 2012. *Cyanophora* genome elucidates origin of photosynthesis in algae and plants. *Science* 335(6070): 843–847.

138. Prudhomme M. *et al.* 2006. Antibiotic stress induces genetic transformability in human pathogen *S. pneumoniae*. *Science* 313: 189–192.
139. Purohit S. 2003. *Agricultural biotechnology*. Agrobios, India.
140. Qi L.S. *et al.* 2013. Repurposing CRISPR as an RNA-guided platform for sequence-specific control of gene expression. *Cell* 152(5): 1173–1183.
141. Quadrana L., Colot V. 2016. Plant Transgenerational Epigenetics. *Annu. Rev. Genet.* 50: 19.1–19.25. DOI: 10.1146/annurev-genet-120215-035254.
142. Revah S., Ortiz I. 2007. El desarrollo de bioprocesos para el tratamiento de aire contaminado por fuentes fijas En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 625–673.
143. Ramírez O.T., Uribe J. 2007. Biotecnología farmacéutica moderna en México. El caso de Probiomed, S.A. de C.V. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 391–428.
144. Rascón-Cruz Q. *et al.* 2004. Accumulation, assembly and digestibility of amarantin expressed in transgenic tropical maize. *Theor. Appl. Genet.* 108: 335–342.
145. Rickwood S., Southworth A. 1995. *New Technologies in Biopharmaceuticals*. Financial Times Managements Reports, London.
146. Ricroch A.E. 2013. Assessment of GE food safety using “-omics” techniques and long-term animal feeding studies. *New Biotechnology* 30(4): 349–354.
147. Ricroch A.E. *et al.* 2013. Long-term and multi-generational animal feeding studies. En: *Animal nutrition with transgenic plants*. Flachowsky G. (Ed.). Oxfordshire, UK CABI Biotechnology Series, 112–127.
148. Ricroch A.E. *et al.* 2014. Looking back at safety assessments of GM food/feed: An exhaustive review of 90-day animal feeding studies. *Int. J. of Biotechnol.* 13(4): 230–256.
149. Saha A., Wittmeyer J., Cairns B.R. 2006. Chromatin remodelling: The industrial revolution of DNA around histones. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 7(6): 437–447.
150. Sánchez F. *et al.* 1975. Transformation of *Escherichia coli* K-12 by linear DNA from *Salmonella typhi*. *Microb. Genet. Bull.* 38: 13–14.
151. Sanders M.F., Bowman J.L. 2012. *Genetic analysis: An integrated approach*. Benjamin Cummings, Boston.
152. Saunders N.A., Lee M.A. 2013. *Real-Time PCR: Advanced Technologies and Applications*. N.A. Saunders y M.A. Lee (Eds.). Caister Academic Press, UK.
153. Sinagawa-García S.Y. *et al.* 2004. Safety assessment by *in vitro* digestibility and allergenicity of genetically modified maize with an amaranth 11S globulin. *J. Agricultural and Food Chemistry* 52: 2709–2714.
154. Smith D. 1979. From extracellular to intracellular: the establishment of a symbiosis. *Proceedings of the Royal Society of London* 204:115–130.
155. Smith H.O., Wilcox K.W. 1970. A restriction enzyme from *H. influenzae*. I. Purification and general properties. *J. Mol. Biol.* 51(2): 379–391.
156. Smith H.S. 2013. *Genentech: The beginning of Biotech*. The University of Chicago Press, Chicago & London.
157. Snell C. *et al.* 2012. Assessment of the health impact of GM plant diets in long-term and multigenerational animal feeding trials: a literature review. *Food Chem. Toxicol.* 50(3-4): 1134–1148.
158. Soberón J., Golubov J. 2007. Biotecnología y biodiversidad. En: *Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna*. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 299–354.
159. Soberón X., Montero G.M. 2007. Ingeniería de proteínas y evolución dirigida En: *Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna*. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 195–218.
160. Solleiro J.L., Castañón R. 2013. *Introducción al ambiente del maíz transgénico. Análisis de ocho casos en Iberoamérica*. México: Agrobio México y CambioTec.
161. Stillman, B., Stewart, D.J. 2004. *Epigenetics*. Cold Spring Harbor, NY: Cold Spring Harbor Laboratory.
162. Strahl B.D., Allis C.D. 2000. The language of covalent histone modifications. *Nature* 403(6765): 41–45.
163. Suzuki M.M., Bird A. 2008. DNA methylation landscapes: Provocative insights from epigenomics. *Nature Reviews Genetics* 9(6): 465–476.
164. Tagahian D., Nickoloff J. 1995. Electrotransformation of chinese hamster ovary cells. *Methods Mol. Biol.* 48: 115–121.
165. Tang G.W. *et al.* 2009. Golden rice is an effective source of vitamin A. *American Journal of Clinical Nutrition* 89: 1776–1783.
166. Targeted Technology, Innovations and Applications. 2014. M. Fuentes y J. LaBaer (Eds.). Caister Academic Press, UK.
167. *The Biotech revolution. Analysis of future technologies and markets*. 1998. Technical insights, John Wiley and Sons, USA.
168. Torres E. *et al.* 2007. *Biocontrol de plagas agrícolas y enfermedades*. En: *Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna*. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 505–560.
169. Trigo E.J., Capp E.J. 2006. The performance of agricultural sector during the period 1996–2006. En: *Ten years of genetically modified crops in Argentine agriculture*. Argenbio, Argentina.
170. Van Eenennaam A.L., Young A.E. 2014. Prevalence and impacts of genetically engineered feedstuffs on livestock populations. *J. Anim. Sci.* 92(10): 4255–4278.
171. Venter J.C. *et al.* 2001. The sequence of the human genome. *Science* 291(5507): 1304–1351.
172. Vielle Calzada J. P. *et al.* 2009. The Palomero genome suggests metal effects on domestication. *Science* 326, 1078–1085.
173. Viniegra G. 2007. *Desarrollo y aplicación del proceso biofermel, una fermentación láctica para el aprovechamiento eficiente de la melaza por el ganado*. En: *Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna*. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 579–595.
174. Visiongain Business Report 2017. *Pharmaceutical contract manufacturing market 2017–2027*.
175. Waddington C.H. 1942. The epigenotype. *Endeavour* 1: 18–20.

176. Waddington C.H. 1956. The genetic assimilation of the bithorax phenotype. *Evolution* 10: 1–13.
177. Waddington C.H. 1957. The strategy of the genes; a discussion of some aspects of theoretical biology. Allen & Unwin, London.
178. Wallin I. 1927. Symbiogenesis and the origin of species. Williams and Wilkins, Baltimore.
179. Waltz E. 2015a. Non Browning GM apple cleared for market. *Nat. Biotech.* 33(4): 326–327.
180. Waltz E. 2015b. USDA approves next generation GM potatoes. *Nat. Biotech.* 33(1): 12–13.
181. Waltz E. 2016. CRISPR edited crops free to enter the market, skip regulation. *Nat. Biotech.* 34(6): 582.
182. Watson J., Crick F. 1953a. Genetical implications of the structure of DNA. *Nature* 171: 964–967.
183. Watson J., Crick F. 1953b. Molecular structure of nucleic acids: A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature* 171: 737–738.
184. Watson J. *et al.* 1988. Molecular Biology of the Gene. Benjamin/Cummings Publishing Company, USA.
185. Watson J. *et al.* 1996. Recombinant DNA. W.H. Freeman & Co, USA.
186. Winter G., Milstein C. 1991. Man made antibodies. *Nature* 349: 293–299.
187. Xi Z. *et al.* 2012. Horizontal transfer of expressed genes in parasitic flowering plant. *BMC Genomics* 13: 227.
188. Xoconostle B. 2017. Comunicación personal a F. Bolívar sobre las características de la planta transgénica de maíz CIEA-9, las cuales se describen en el capítulo VIII.
189. Yang D. *et al.* 1985. Mitochondrial origins. *PNAS* 82: 4443–4447.
190. Yao J.H. *et al.* 2002. Techniques for producing transgenic animals and the recent developments. *Di Yu Jun Yi Da Xue Xue Bao* 22: 78–81.
191. Ye X. *et al.* 2000. Engineering the provitamin A biosynthetic pathway into rice endosperm. *Science* 287: 303–305.
192. Zhang Y. 2001. Transcription regulation by histone methylation: Interplay between different covalent modifications of the core histone tails. *Genes & Development* 15(18): 2343–2360.
193. Zhenxiang X. *et al.* 2012. Horizontal transfer of expressed genes in parasitic flowering plant. *BMC Genomics* 13: 227.





CAPÍTULO III

DOCUMENTOS RELEVANTES A FAVOR DE LOS TRANSGÉNICOS Y LA BIOTECNOLOGÍA

- DECLARACIONES DE DOS GRUPOS DE PREMIOS NOBEL
- REPORTES DE ACADEMIAS DE CIENCIAS Y MEDICINA DE DIFERENTES PAÍSES

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan y comentan importantes documentos elaborados por grupos de expertos y asociaciones científicas y, sobre todo, por varias academias de ciencias de América y Europa que han dado su apoyo y recomendaciones para el uso responsable y sustentable de los transgénicos y la biotecnología. Dichos documentos señalan y sustentan que ésta es una tecnología responsable y respetuosa con la salud y el medio ambiente, y que tiene beneficios importantes. Entre estos documentos resaltan dos declaraciones firmadas por 25 premios Nobel, la primera, y por 123, la segunda (ver figuras III.1 y III.1 bis, y los anexos 4 y 5). También se incluye un completo y muy reciente trabajo (2016) elaborado por las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos (NASEM, por

sus siglas en inglés) que integran el Consejo Nacional de Investigación de Estados Unidos (NRC, por sus siglas en inglés), sobre las plantas (cultivares) desarrolladas por ingeniería genética: experiencias y prospectivas (ver figura III.9). Recordemos que las academias de ciencias en los diferentes países están integradas por los académicos más distinguidos, expertos en sus áreas que realizan estudios, reportes y recomendaciones para los gobiernos y para informar a la sociedad sobre diferentes asuntos, problemas y oportunidades. Entre estos documentos existen varios reportes sobre la biotecnología y los transgénicos, algunos de los cuales se presentan en este capítulo. Las academias de ciencias del planeta integran la Red Global de Academias de Ciencias, de la cual la Academia Mexicana de Ciencias es miembro y, por ende, participa e interviene en estudios y recomendaciones a nivel global.

DECLARACIÓN A FAVOR DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y DE LOS OGM, FIRMADA POR 123 PREMIOS NOBEL, 2017

Esta declaración va dirigida a los líderes de Greenpeace, a Naciones Unidas y a los gobiernos de las naciones. Se desprende del documento que expone que las plantas transgénicas que se usan en el campo representan una tecnología perfeccionada, llamada agricultura de precisión (*precision agriculture*), que es superior, más avanzada por lo preciso, a las anteriores, lo cual ha permitido reducir los tiempos y la incertidumbre en la creación de nuevos cultivares en beneficio de la sustentabilidad del medio ambiente y de la sociedad.

La declaración apareció en junio de 2016 y para marzo de 2017 ya había sido firmada por 123 premios Nobel. Una declaración similar firmada por 25 premios Nobel había sido publicada en 2012; entre los firmantes estaba el Dr. Norman Bourlag, gran defensor de la biotecnología y los transgénicos que no aparece en la declaración del año 2016 debido a que falleció en 2009. La primera declaración de 2012 (ver figura III.1 bis y anexo 5) también estuvo firmada, entre otros, por Mario Molina, James Watson, Arthur Kornberg y David Baltimore, quienes también figuran en la declaración de 2016. Cabe señalar que en la declaración del año 2012 casi todos los firmantes eran recipientes de premios de medicina, química o física. En la del año 2017, la mayor parte siguen siendo de estas áreas, pero aparecen las firmas de siete premios Nobel de Economía. Estas declaraciones se basan en los reportes y documentos elaborados por diferentes instan-

cias, en particular, por las academias de ciencias de diferentes países, y específicamente, en el reporte elaborado en 2016 por las NASEM de Estados Unidos, que se comenta más adelante (ver figura III.9).

Esta nueva declaración, a diferencia de la anterior que se aboca a defender la biotecnología agrícola y los organismos transgénicos, también condena las acciones de Greenpeace, algunas incluso vandálicas, en sus campañas en contra de los transgénicos en general y, en particular, por impedir el crecimiento y el uso del arroz dorado. Esta variedad de arroz transgénico fue diseñada para incrementar los precursores de la vitamina A en este cereal, principal alimento en Asia. Muchos consumidores de arroz en aquel continente, y en particular los más pobres, no tienen la posibilidad de llevar una dieta balanceada, lo que se refleja en una deficiencia importante de vitamina A, lo cual puede causar ceguera e incluso la muerte. Como también se señala en esta declaración, la deficiencia de vitamina A es causa de muerte en varios cientos de miles de infantes anualmente, en particular, niños menores de un año. Este caso del arroz dorado se comenta más ampliamente en el capítulo X. Hacemos hincapié en que muchos de los firmantes de esta declaración son científicos, verdaderos expertos en sus áreas, investigadores y profesores que han realizado extraordinarias contribuciones para describir y entender los componentes y el funcionamiento a nivel molecular de la célula viva, como hemos comentado en el capítulo II, entre ellos: J. Watson, P. Berg, A. Kornberg, H. Smith, W. Gilbert, H. Varmus, K. Mullis y D. Baltimore.

El anexo 4 incluye el listado de los 123

Figura III.1. Declaración premios Nobel, 2016: "Laureates Letter Supporting Precision Agriculture (GMOs)" [Carta firmada por 123 premios Nobel a favor de la agricultura de precisión (OGM)].

Se agradece a Sir Richard J. Roberts, Ph.D. F.R.S. y premio Nobel de Medicina 1993, la autorización para reproducir esta carta. Reprinted by permission granted by Sir Richard J. Roberts, Ph.D. F.R.S., 1993 Nobel Laureate in Medicine.

premios Nobel que para marzo de 2017 habían firmado esta declaración, entre otras 10,500 personas, muchas de ellas científicos, de varios países, incluyendo México.

Laureates Letter Supporting Precision Agriculture (Declaración de 123 premios Nobel a favor de la agricultura de precisión), 2016: <http://supportprecisionagriculture.org/> / http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html

Se entiende por agricultura de precisión el uso de tecnología precisa, como las mediciones satelitales y de otros tipos, útiles para propiciar un manejo más eficiente y preciso de las granjas. Se sustenta en la observación, la medición y la respuesta a la variabilidad de las cosechas por diferentes factores. El uso de los transgénicos queda englobado en este concepto de tecnología de mayor precisión ya que la modificación del genoma de las plantas trans-

génicas es mucho más precisa por la integración de uno o dos genes, a diferencia de las variedades convencionales, en donde ocurren muchos más cambios en los genomas. Además, las plantas transgénicas han sido detallada y molecularmente caracterizadas por las ciencias ómicas. Finalmente, las tecnologías CRISPR-Cas9 para la edición fina del genoma, van a permitir la construcción de organismos transgénicos de tercera y cuarta generación, mucho más precisos una vez que se inactiven genes blancos y los nuevos transgenes se incorporen en los sitios del genoma previamente seleccionados.

DECLARACIÓN A FAVOR DE LA BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA Y DE LOS OGM, FIRMADA POR 25 PREMIOS NOBEL, 2012

Esta declaración reúne a destacados miembros de la comunidad científica; algunos, verdaderos expertos y pioneros en el área de la biología molecular y la biotecnología, como James Watson, Arthur Kornberg y Norman Borlaug. La declaración también cuenta con el apoyo de Mario Molina, aun siendo experto y pionero en otras áreas. La declaración reconoce que las técnicas de ingeniería genética para modificar organismos son seguras y pueden contribuir al bienestar humano, mejorando la agricultura, la salud y el medio ambiente (ver figura III.1 bis y anexo 5).

AgBioWorld Declaration in support of agricultural biotechnology (Declaración de 25 premios Nobel a favor de la biotecnología relacionada con la agricultura), 2012: www.agbioworld.org/declaration/



Figura III.2. Carátula del reporte EASAC, 2013: "Planting the future: opportunities and challenges for using crop genetic improvement technologies for sustainable agriculture" (Plantando el futuro: oportunidades y retos por el uso de plantas mejoradas genéticamente para la agricultura sustentable). Se agradece el permiso del Secretariado de la EASAC para reproducir esta carátula. Reprinted with the permission granted by the EASAC Secretariat.

REPORTE DEL CONSEJO ASESOR DE LAS ACADEMIAS DE CIENCIAS DE EUROPA RESPECTO AL USO DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEJORAMIENTO GENÉTICO, 2013

Este consejo, conformado por las Academias Nacionales de Ciencias de los países miembros de la Unión Europea, en 2013 publicó un reporte titulado "Planting the future: opportunities

 The image shows the AgBioWorld logo, which consists of a globe icon and the text 'AgBioWorld' in a green, bold font. Below the logo is the title 'Scientists In Support Of Agricultural Biotechnology'. The main text of the declaration is as follows:

We, the undersigned members of the scientific community, believe that recombinant DNA techniques constitute powerful and safe means for the modification of organisms and can contribute substantially in enhancing quality of life by improving agriculture, health care, and the environment.

The responsible genetic modification of plants is neither new nor dangerous. Many characteristics, such as pest and disease resistance, have been routinely introduced into crop plants by traditional methods of sexual reproduction or cell culture procedures. The addition of new or different genes into an organism by recombinant DNA techniques does not inherently pose new or heightened risks relative to the modification of organisms by more traditional methods, and the relative safety of marketed products is further ensured by current regulations intended to safeguard the food supply. The novel genetic tools offer greater flexibility and precision in the modification of crop plants.

No food products, whether produced with recombinant DNA techniques or with more traditional methods, are totally without risk. The risks posed by foods are a function of the biological characteristics of those foods and the specific genes that have been used, not of the processes employed in their development. Our goal as scientists is to ensure that any new foods produced from recombinant DNA are as safe or safer than foods already being consumed.

Current methods of regulation and development have worked well. Recombinant DNA techniques have already been used to develop 'environmentally-friendly' crop plants with traits that preserve yields and allow farmers to reduce their use of synthetic pesticides and herbicides. The next generation of products promises to provide even greater benefits to consumers, such as enhanced nutrition, healthier oils, enhanced vitamin content, longer shelf life and improved medicines.

Through judicious deployment, biotechnology can also address environmental degradation, hunger, and poverty in the developing world by providing improved agricultural productivity and greater nutritional security. Scientists at the international agricultural centers, universities, public research institutions, and elsewhere are already experimenting with products intended specifically for use in the developing world.

We hereby express our support for the use of recombinant DNA as a potent tool for the achievement of a productive and sustainable agricultural system. We also urge policy makers to use sound scientific principles in the regulation of products produced with recombinant DNA, and to base evaluations of those products upon the characteristics of those products, rather than on the processes used in their development.

Figura III.1 bis. Declaración AgBioWorld, 2012: "Scientists in support of agricultural biotechnology" (Científicos a favor de la biotecnología agrícola).

Carta firmada por 25 premios Nobel y otros destacados investigadores. Se agradece al Prof. Channapatna S. Prakash la autorización para reproducir esta carátula.

Reprinted by permission granted by Prof. Channapatna S. Prakash.

Statement by the AAAS Board of Directors On Labeling of Genetically Modified Foods

AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE
20 October 2012

There are several current efforts to require labeling of foods containing products derived from genetically modified crop plants, commonly known as GM crops or GMOs. These efforts are not driven by evidence that GM foods are actually dangerous. Indeed, the science is quite clear: crop improvement by the modern molecular techniques of biotechnology is safe. Rather, these initiatives are driven by a variety of factors, ranging from the persistent perception that such foods are somehow “unnatural” and potentially dangerous to the desire to gain competitive advantage by legislating attachment of a label meant to alarm. Another misconception used as a rationale for labeling is that GM crops are untested.

The EU, for example, has invested more than €300 million in research on the biosafety of GMOs. Its recent report¹ states: “The main conclusion to be drawn from the efforts of more than 130 research projects, covering a period of more than 25 years of research and involving more than 500 independent research groups, is that biotechnology, and in particular GMOs, are not per se more risky than e.g. conventional plant breeding technologies.” The World Health Organization, the American Medical Association, the U.S. National Academy of Sciences, the British Royal Society, and every other respected organization that has examined the evidence has come to the same

conclusion: consuming foods containing ingredients derived from GM crops is no riskier than consuming the same foods containing ingredients from crop plants modified by conventional plant improvement techniques.

Civilization rests on people's ability to modify plants to make them more suitable as food, feed and fiber plants and all of these modifications are genetic. Twentieth century advances in the science of genetics opened the way to using chemicals and radiation as means of accelerating genetic change to produce nutritionally enhanced foods like lycopene-rich Rio Star grapefruit and quite literally thousands of other improved fruit, vegetable and grain crop varieties. Modern molecular genetics and the invention of large-scale DNA sequencing methods have fueled rapid advances in our knowledge of how genes work and what they do, permitting the development of new methods that allow the very precise addition of useful traits to crops, such as the ability to resist an insect pest or a viral disease, much as immunizations protect people from disease.

In order to receive regulatory approval in the United States, each new GM crop must be subjected to rigorous analysis and testing. It must be shown to be the same as the parent crop from which it was derived and if a new protein trait has been

added, the protein must be shown to be neither toxic nor allergenic. As a result and contrary to popular misconceptions, GM crops are the most extensively tested crops ever added to our food supply. There are occasional claims that feeding GM foods to animals causes aberrations ranging from digestive disorders, to sterility, tumors and premature death. Although such claims are often sensationalized and receive a great deal of media attention, none have stood up to rigorous scientific scrutiny. Indeed, a recent review of a dozen well-designed long-term animal feeding studies comparing GM and non-GM potatoes, soy, rice, corn and triticale found that the GM and their non-GM counterparts are nutritionally equivalent².

It is the long-standing policy of the Food and Drug Administration (FDA) that special labeling of a food is required if the absence of the information provided poses a special health or environmental risk. The FDA does not require labeling of a food based on the specific genetic modification procedure used in the development of its input crops. Legally mandating such a label can only serve to mislead and falsely alarm consumers.

Approved by the AAAS Board of Directors on 20 October 2012



¹ http://ec.europa.eu/research/biosociety/pdf/a_decade_of_eu-funded_gmo_research.pdf
² Snell C, Bernheim A, Berge J-B, Kuntz M, Pascal G, Paris A and Ricoch A E (2012). Assessment of the health impact of GM plant diets in long-term and multigenerational animal feeding trials: a literature review. Food and Chemical Toxicology, 50: 1134-48.

Figura III.3. Declaración AAAS, 2012: “Statement by the Board of Directors of the American Association for the Advancement of Science (AAAS) on labelling of genetically modified foods” (Pronunciamiento del Consejo Directivo de la AAAS sobre el etiquetado de alimentos genéticamente modificados).

Se agradece a la AAAS la reproducción de esta declaración. Licencia No. OP-00090582.

Statement reprinted with permission granted by AAAS. License number OP-00090582.

and challenges for using crop genetic improvement technologies for sustainable agriculture” (Plantando el futuro: oportunidades y retos por el uso de la tecnología de plantas mejoradas genéticamente para la agricultura sustentable). La intención del reporte fue asesorar a los políticos y tomadores de decisión europeos, analizando la información con la que se contaba y abordando los motivos por los cuales se debe reconocer el valor de estas tecnologías de plantas transgénicas y promover su uso y su desarrollo (ver figura III.2).

Reporte EASAC, 2013: www.easac.eu

DECLARACIÓN DE LA AAAS SOBRE

LA SEGURIDAD DE LOS OGM, 2012

La Asociación Americana para el Avance de la Ciencia de Estados Unidos (AAAS, por sus siglas en inglés) es responsable de la publicación de la revista *Science* y en el documento titulado “Statement by the AAAS Board of Directors on labeling of genetically modified foods” (Pronunciamiento del Consejo Directivo de la AAAS sobre el etiquetado de alimentos genéticamente modificados) señala que:

“Existen esfuerzos para propiciar el etiquetado de alimentos que contengan productos derivados de cosechas de plantas genéticamente modificadas o transgénicas. Estos esfuerzos no se deben a que los OGM sean peligrosos. De hecho, la ciencia es muy clara: el mejoramiento de cosechas por técnicas modernas de biotecnología, es seguro” (ver figura III.3).

[There are several current efforts to require labeling of foods containing products derived from genetically modified crop plants, commonly known as GM crops or GMOs. These efforts are not driven by evidence that GM foods are actually dangerous. Indeed, the science is quite clear: crop improvement by the modern molecular techniques of biotechnology is safe].

Statement by the Board of Directors of the American Association for the Advancement of Science (AAAS) on labelling of genetically modified foods (Pronunciamiento del Consejo Directivo de la AAAS sobre el etiquetado de alimentos genéticamente modificados), 2012: www.aaas.org/aaas_GM_statement.pdf

REPORTE DE LA PAS SOBRE LAS PLANTAS

TRANSGÉNICAS Y LA SEGURIDAD ALIMENTARIA, 2009

La Academia Pontificia de las Ciencias del Vaticano (PAS, por sus siglas en inglés) publicó el siguiente estudio realizado por un panel de expertos: “Transgenic plants for food security in the context of development” (Plantas transgénicas para la seguridad alimentaria en el contexto del desarrollo) (PAS Study Week, Ciudad del Vaticano, 15–19 de mayo de 2009). Entre algunas de las principales conclusiones alcanzadas se encuentran:

- El crecimiento demográfico requiere del desarrollo de nuevos sistemas agrícolas y nuevas tecnologías.
- Las consecuencias del cambio climático y las demandas por el agua para su uso agrícola afectarán nuestra capacidad para

alimentar a un planeta con población creciente.

- La agricultura como actualmente se practica, es insustentable, evidenciado por la pérdida masiva de tierra de cultivo y de biodiversidad, y por el uso inaceptable de altas concentraciones de pesticidas en todo el planeta.

- La aplicación adecuada de los OGM y otras técnicas moleculares en agricultura, están contribuyendo a atender algunas de estas demandas, necesidades y retos.

- No hay nada intrínseco acerca de los OGM para el mejoramiento de cosechas

que haga que las plantas *per se*, o sus productos, sean no seguras como alimento.

Reporte PAS, 2009: www.pas.va/content/dam/accademia/pdf/newbiotechnology.pdf

LIBRO DEL COMITÉ DE BIOTECNOLOGÍA
DE LA ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS SOBRE
EL USO RESPONSABLE DE LOS OGM, 2011

El Comité de Biotecnología de la AMC, del cual son miembros siete premios Nacional de Ciencias otorgado por el Gobierno Federal, publicó en 2011 el libro *Por un uso responsable de los or-*

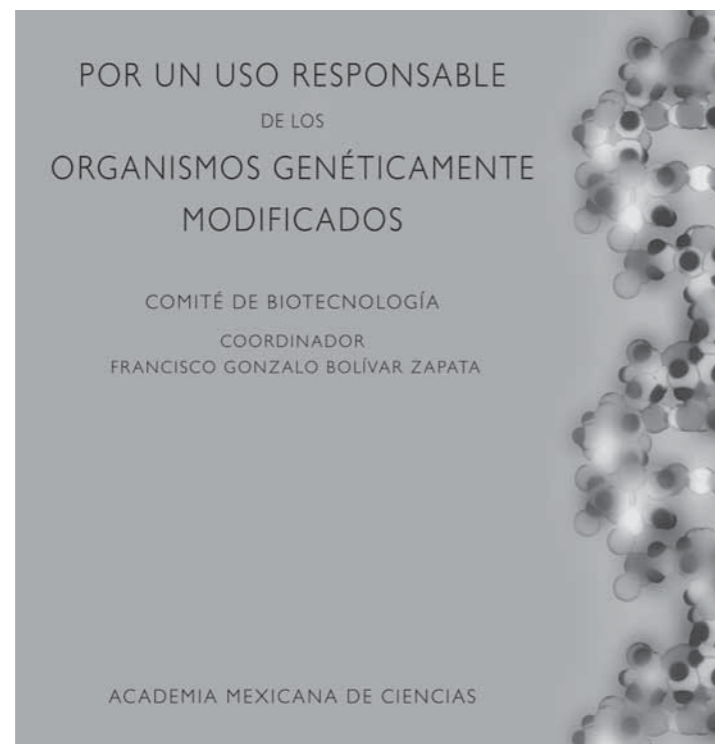


Figura III.4. Carátula del libro *Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados*, Bolívar y colaboradores, Comité de Biotecnología, Academia Mexicana de Ciencias, México, 2011.

Se agradece a la Academia Mexicana de Ciencias la autorización para reproducir esta carátula.

ganismos genéticamente modificados. El documento señalado es el antecesor de esta publicación. Entre otras recomendaciones el comité reconoce que se requiere una política de Estado que contemple el uso responsable de estos organismos para garantizar una utilización más justa y equitativa de esta tecnología en beneficio de la sociedad y la biota mexicanas. Los integrantes del comité son miembros de diferentes instituciones nacionales de educación superior e investigación científica, expertos reconocidos por sus pares en el mundo en diferentes disciplinas. Asimismo, este comité ha publicado varios otros documentos sobre la biotecnología y sus amplios beneficios, mismos que se encuentran en la página de la AMC y son de libre acceso (ver figura III.4).

Libro de Bolívar et al., AMC, 2011: <http://www.coniunctus.amc.edu.mx/libros/OGM.pdf>

REPORTE DE LA COMISIÓN EUROPEA SOBRE
LA IMPORTANCIA DE LA BIOTECNOLOGÍA, 2010

El Consejo para la Investigación y la Innovación de la Comisión Europea es responsable de desarrollar los programas marco para la investigación, el desarrollo tecnológico y las actividades demostrativas de la ciencia y la innovación científica. Dentro de estos programas marco, desde 1982 se inició un programa de financiamiento destinado a la investigación sobre ingeniería genética. La Comisión Europea ha publicado los resultados de esta inversión en dos compendios. En la presentación del segundo volumen, “Una década de investigación sobre organismos genéticamente modificados (2001–2010)” (ver figura



Figura III.5. Carátula del reporte Unión Europea, 2010: “A decade of EU-funded GMO research (2001–2010)” [Una década de investigación sobre OGM (2001–2010)]. Se agradece a la European Commission, Directorate-General for Research la autorización para reproducir esta carátula. Reprinted with permission granted by the European Commission, Directorate-General for Research.

III.5), se destaca que la conclusión principal que se puede obtener de los esfuerzos de más de 130 proyectos de investigación en biotecnología, abarcando un periodo de más de 25 años e involucrando a más de 500 grupos de investigación independientes, es que la biotecnología, y en particular los OGM, no son *per se* más riesgosos que las técnicas de mejoramiento convencional.

Reporte European Commission/European Research Area/Food, Agriculture and Fisheries, and Biotechnology (Comisión Europea/Área de Investiga-

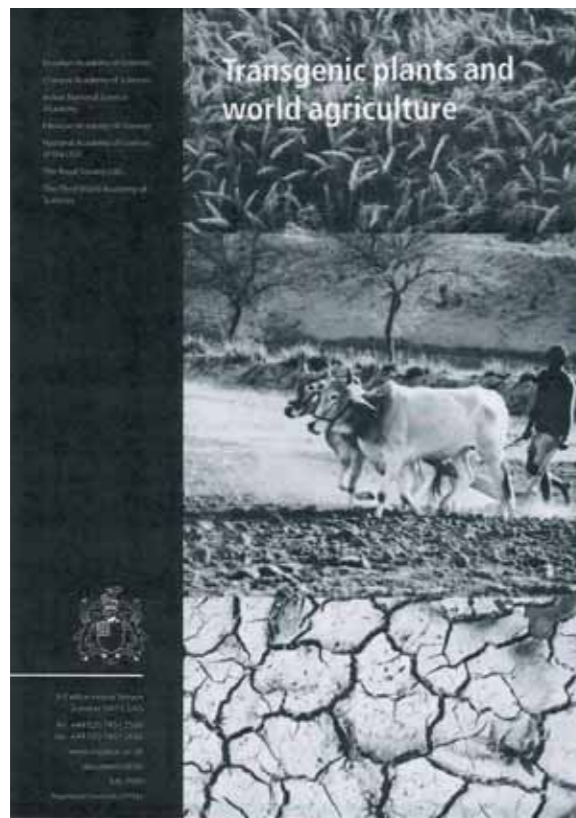


Figura III.6. Carátula del reporte The Royal Society, 2000: "Transgenic plants and world agriculture" (Plantas transgénicas y agricultura en el planeta).

Se agradece a The Royal Society el permiso para reproducir esta carátula.

Reprinted with permission granted by The Royal Society.

ción Europea/Alimentación, Agricultura y Pesca, y Biotecnología), 2010: <https://bookshop.europa.eu/en/a-decade-of-eu-funded-gmo-research-2001-2010-pbKINA24473/>

REPORTE DE THE ROYAL SOCIETY Y OTRAS ACADEMIAS DE CIENCIAS SOBRE PLANTAS TRANSGÉNICAS Y AGRICULTURA, 2000

Este reporte fue elaborado en el año 2000 por varias academias de ciencias de diferentes países, incluyendo la brasileña, la china, la india,

la Academia Mexicana de Ciencias, la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, The Royal Society del Reino Unido, y la del Tercer Mundo (ver figura III.6). En el documento se señala la importancia de utilizar la biotecnología y los transgénicos de manera responsable y sustentando las decisiones en información científica disponible. Se comenta la importancia de esta tecnología para ayudar a contender con muchas de las demandas de una población mundial en crecimiento extraordinario, lo cual implica grandes necesidades en un planeta cada vez más explotado y con grandes problemas ambientales. También, se subraya la importancia de hacer accesible esta tecnología para los diferentes granjeros, campesinos y productores del mundo, con el fin de poder lidiar con las necesidades locales y, a la vez, mejorar su calidad de vida. Varias de las consideraciones y recomendaciones de este documento aparecen también en otros documentos elaborados posteriormente por las mismas academias, que se presentan a continuación.

Reporte The Royal Society (UK), Brazilian Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Indian National Science Academy, Mexican Academy of Sciences, National Academy of Sciences of the USA, The Third World Academy of Sciences, 2000: https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2000/10062.pdf

REPORTE DE LAS NASEM SOBRE CULTIVARES GENÉTICAMENTE MODIFICADOS, 2010

Este reporte sobre el impacto de los cultivos genéticamente modificados en la sustentabilidad

de las granjas en Estados Unidos fue elaborado en 2010 por el Consejo Nacional de Investigación de Estados Unidos, conformado por las tres Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos (NASEM). El reporte indica que muchos agricultores en Estados Unidos utilizan plantas transgénicas desde 1966 (ver figura III.7), y concluye que los agricultores de Estados Unidos están optando por dicha tecnología: "Se están dando cuenta de los sustanciales beneficios económicos y ambientales, tales como costos menores de producción, menos problemas de plagas, reducción en el uso de pesticidas y mejores cosechas, comparados con aquellos de los cultivos convencionales".

Reporte NASEM, 2010: <https://doi.org/10.17226/12804>

REPORTE DE LAS NASEM SOBRE PLANTAS DESARROLLADAS POR INGENIERÍA GENÉTICA, 2016

Este reporte, publicado en mayo de 2016, también fue elaborado por las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina (NASEM), a través del Comité para el Estudio de Cultivos Desarrollados por Ingeniería Genética. En este extraordinario y valioso reporte técnico sobre las plantas transgénicas, se compendian y se detallan los amplios beneficios y la ausencia de daño por utilizar plantas transgénicas (ver figura III.8).

Dicho trabajo contiene nueve capítulos y siete apéndices en más de 400 páginas. Por considerarlo relevante, aquí se señalan los títulos de estos capítulos: 1) "The study of genetically engineered crops by the National Academies" (El

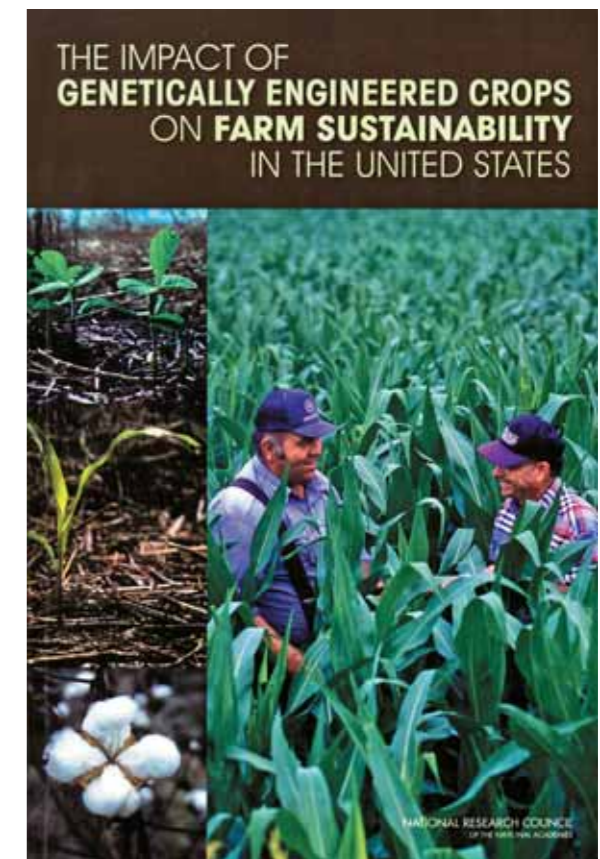


Figura III.7. Carátula del reporte NASEM, 2010: "The impact of genetically engineered crops on farms sustainability in the United States" (El impacto de cultivos modificados por ingeniería genética en la sustentabilidad de las granjas en Estados Unidos). Se agradece el permiso para reproducir esta carátula a la National Academy of Sciences, cortesía de la National Academies Press, Washington, D.C.

Reprinted with permission from NASEM (2010) by the National Academy of Sciences, courtesy of the National Academies Press, Washington, D.C.

estudio realizado por las NASEM sobre cosechas o cultivos desarrollados por ingeniería genética; 2) "The framework of the report" (El marco del reporte); 3) "Genetically engineered crops through 2015" (Cosechas modificadas por ingeniería genética hasta 2015); 4) "Agronomic and environmental effects of genetically engineered crops" (Efectos agronómicos y ambientales de

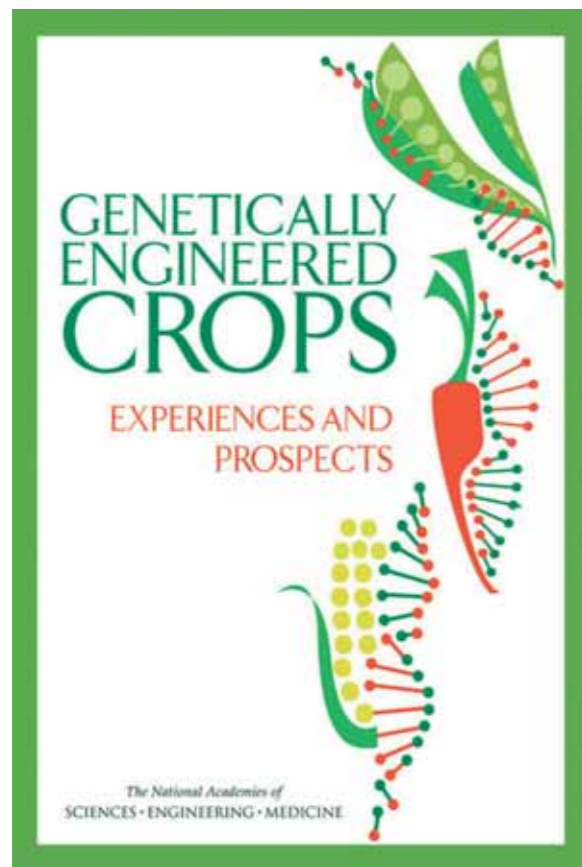


Figura III.8. Carátula del reporte NASEM, 2016: “Genetically engineered crops: experiences and prospects” (Plantas desarrolladas por ingeniería genética: experiencias y prospectivas).

Se agradece el permiso para reproducir esta carátula a la National Academy of Sciences, cortesía de la National Academies Press, Washington, D.C.

Reprinted with permission from NASEM Report (2016) by the National Academy of Sciences, courtesy of the National Academies Press, Washington, D.C.

cosechas desarrolladas por ingeniería genética); 5) “Human health effects of genetically engineered crops” (Efectos a la salud humana de las cosechas desarrolladas por ingeniería genética); 6) “Social and economic effects of genetically engineered crops” (Efectos sociales y económicos de las cosechas modificadas por ingeniería genética); 7) “Future of genetically engineered techno-

logies” (Futuro de las tecnologías de la ingeniería genética); 8) “Future of genetically engineered crops” (Futuro de las cosechas desarrolladas por ingeniería genética), y 9) “Regulation of current and future genetically engineered crops” (Normatividad actual y futura de las cosechas desarrolladas por ingeniería genética). Este reporte fue elaborado por un comité de 20 expertos en diferentes áreas y disciplinas relacionadas con la investigación, presidido por el Dr. Fred Gould, un experto en ecología y genética de plagas de insectos, profesor distinguido de la Universidad de Carolina del Norte, Estados Unidos. A lo largo de varios meses, el comité se reunió con muchos otros especialistas en disciplinas relacionadas, provenientes de diferentes países, entre ellos, el Dr. Luis Herrera Estrella, de México, coautor de este libro. La intención de esto fue recabar información adicional a la presentada por los integrantes del comité, y así sustentar mejor las consideraciones y conclusiones. También, este comité en el año 2014 entrevistó al Dr. Séralini con relación a sus publicaciones, donde señala el supuesto daño por el consumo de transgénicos.

Reporte NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>

A lo largo de este reporte se insiste en que no ha habido daño a la salud ni al medio ambiente por el uso y el consumo de las plantas transgénicas ni sus productos. Y, por el contrario, se señalan los amplios beneficios de diferentes tipos en diversos sectores, por el uso de esta tecnología.

De hecho, muchas de las consideraciones, ejemplos y referencias bibliográficas que se presentan en este libro, incluyendo el capítulo

XI de conclusiones y recomendaciones finales, están presentes y coinciden con los señalamientos del reporte NASEM, 2016.

REPORTE DE THE ROYAL SOCIETY SOBRE PLANTAS GENÉTICAMENTE MODIFICADAS, 2016

Este reporte fue elaborado por The Royal Society que es la academia de ciencias del Reino Unido e incluye a los mejores científicos de la comunidad. Aquí se analizan con detalle varias de las preguntas más comunes sobre las plantas genéticamente modificadas y sus cosechas. Las respuestas señalan la inocuidad y los beneficios de las plantas transgénicas que se utilizan como alimento (ver figura III.9).

Reporte The Royal Society, 2016: <https://royalsociety.org/~media/policy/projects/gm-plants/gm-plant-q-and-a.pdf>

DOCUMENTOS, REPORTES Y ARTÍCULOS CIENTÍFICOS ADICIONALES A FAVOR DE LA BIOTECNOLOGÍA Y LOS OGM

Además de las declaraciones de los premios Nobel, los reportes de academias, asociaciones y consejos mencionados, existe un amplio conjunto de libros y documentos que presentan casos de uso responsable y los subsecuentes éxitos y/o las ventajas de los organismos transgénicos y la biotecnología. Entre ellos destacan: Hall, 1987; NRC, 1989; Kornberg, 1995; NSTC, 1995; Bolívar, 1998; Bolívar, 2001; NRC,

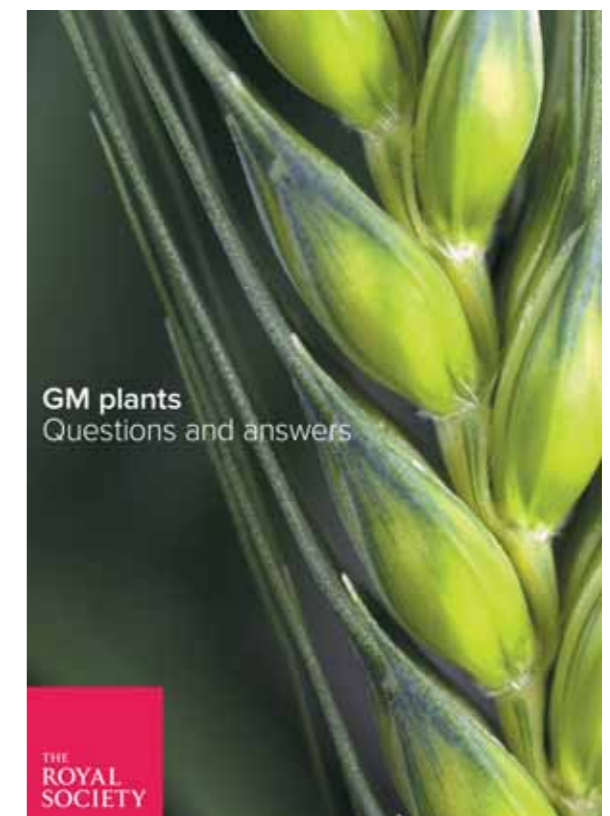


Figura III.9. Carátula del reporte The Royal Society, 2016: “GM plants. Questions and answers” (Plantas genéticamente modificadas. Preguntas y respuestas).

Se agradece a The Royal Society el permiso para reproducir esta carátula.

Reprinted with permission by The Royal Society.

2002a; NRC, 2002b; Bolívar *et al.*, 2002; Daar, 2002; Padilla y López-Munguía, 2002; Bolívar, 2003; Bolívar *et al.*, 2003; Bolívar y Herrera Estrella, 2003; Bolívar y López-Munguía, 2003; NRC, 2004; Bolívar *et al.*, 2007; Villalobos, 2008; Ozden, 2012; Popp, 2012; Smith, 2013; Mulet, 2014; CibioGem, 2015; Brookes, 2016; Fahlgren *et al.*, 2016, y Pinkert, 2016.



Fig. III.10. Cultivos de maíz y algodón transgénicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AAAS (American Association for the Advancement of Science). 2012. Statement by the Board of Directors of the AAAS on labelling of genetically modified foods USA (Pronunciamento del Consejo Directivo de la AAAS sobre el etiquetado de alimentos genéticamente modificados). www.aaas.org/aaas_GM_statement.pdf
2. AgBioworld. 2012. Declaration of support of agricultural biotechnology (Declaración de apoyo a la biotecnología relacionada con la agricultura). www.agbioworld.org/declaration/index.html
3. Bolívar F. *et al.* 2011. Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados. Comité de Biotecnología. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México. <http://www.coniunctus.amc.edu.mx/libros/OGM.pdf>
4. EASAC (European Academies Science Advisory Council). 2013. Policy report. Planting the future: opportunities and challenges for using crop genetic improvement technologies for sustainable agriculture (Plantando el futuro: oportunidades y retos para el uso de cosechas generadas por mejoramiento genético para una agricultura sustentable). www.easac.eu/fileadmin/Reports/Planting_the_Future/EASAC_Planting_the_Future_FULL_REPORT.pdf / www.easac.eu
5. European Commission / European Research Area / Food, Agriculture and Fisheries, and Biotechnology. 2010. A decade of EU-funded GMO research (2001–2010) [Una década de financiamiento europeo a la investigación de OGM (2001–2010)]. Luxembourg: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Bélgica. www.researchgate.net/profile/Danuta_Cichocka/publication/233770770_A_decade_of_EU-funded_GMO_research_2001-2010links/09e4150b5ec0a1c71d000000/A-decade-of-EU-funded-GMO-research-2001-2010.pdf?origin=publication_detail / <https://bookshop.euroopa.eu/en/a-decade-of-eu-funded-gmo-research-2001-2010-pbKINA24473/>
6. Laureates Letter Supporting Precision Agriculture (Declaración de premios Nobel a favor de la agricultura de precisión). 2016. <http://supportprecisionagriculture.org/> http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html
7. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2010. The Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States (El impacto de cosechas desarrolladas por ingeniería genética en la sustentabilidad de las granjas en Estados Unidos de América). Committee on the Impact of Biotechnology on Farm-Level, Economics and Sustainability, Board on Agriculture and Natural Resources, Division on Earth and Life Studies. The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/12804>
8. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2016. Genetically engineered crops: experiences and prospects (Cultivos desarrollados por ingeniería genética: experiencias y perspectivas). The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/23395>
9. PAS (Pontifical Academy of Sciences). 2009. Transgenic plants for food security in the context of development (Plantas transgénicas para la seguridad alimentaria en el contexto del desarrollo). PAS Study Week, Cd. del Vaticano. www.pas.va/content/dam/accademia/pdf/new_biotechnology.pdf

10. The Royal Society. 2016. GM plants. Questions and answers. <https://royalsociety.org/~media/policy/projects/gm-plants/gm-plant-q-and-a.pdf>
11. The Royal Society, Brazilian Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Indian National Science Academy, Mexican Academy of Sciences, National Academy of Sciences of the USA, The Third World Academy of Sciences. 2000. Transgenic plants and world agriculture (Plantas transgénicas y agricultura global). www.amc.unam.mx/Noticias/contenido_docs/trans.html / https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2000/10062.pdf

OTROS DOCUMENTOS, REPORTES

Y ARTÍCULOS A FAVOR DE LA BIOTECNOLOGÍA

Y LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS

1. Bolívar F. 1998. Obra científica. Trabajos seleccionados de divulgación científica. Tomo III. Biología molecular, ingeniería genética y biotecnología. El Colegio Nacional, Ciudad de México.
2. Bolívar F. 2001. Obra científica. Tomo IV. La genética moderna: fundamentos y horizontes. El Colegio Nacional, Ciudad de México.
3. Bolívar F. 2003. Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 1. Genómica, proteómica y bioinformática. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). El Colegio Nacional, Ciudad de México.
4. Bolívar F. *et al.* 2002. Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), 2ª edición. Conacyt y Fondo de Cultura Económica, Ciudad de México.
5. Bolívar F. *et al.* 2003. Recomendaciones para el desarrollo y consolidación de la biotecnología en México. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.). Conacyt, Academia Mexicana de Ciencias, Comisión Intersecretarial de Bioseguridad y Organismos Genéticamente Modificados, e Instituto de Biotecnología / UNAM, Ciudad de México.
6. Bolívar F. *et al.* 2007. Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), 2ª edición. El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.
7. Bolívar F., Herrera-Estrella L. 2003. Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3. Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera-Estrella (Coords.). El Colegio Nacional, Ciudad de México.
8. Bolívar F., López-Munguía A. 2003. Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 7. Ingeniería celular, biodiversidad e industria. Francisco G. Bolívar Zapata y A. López-Munguía (Coords.). El Colegio Nacional, Ciudad de México.
9. Brookes G. 2016. Adoption and impact of genetically modified (GM) crops in Australia: 20 years' experience. CropLife Australia.
10. CibioGem. 2015. Bioseguridad en la aplicación de la biotecnología y el uso de los organismos genéticamente modificados. Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados, Ciudad de México.
11. Daar A.S. *et al.* 2002. Top ten biotechnologies for improving health in developing countries. *Nature Genetics* 32: 229–232.
12. Fahlgren N. *et al.* 2016. Plant scientists: GM technology is safe. *Science* 351(6275): 824.
13. Hall S.S. 1987. Invisible Frontiers: The race in synthesize a human gene. Tempus Books of Microsoft Press, USA.
14. Kornberg A. 1995. The golden helix: inside biotech ventures. University Sciences Books, USA.
15. Mulet J.M. 2014. Comer sin miedo. Mitos, falacias y mentiras sobre la alimentación en el siglo XXI. Paidós. Ediciones Destino. Barcelona, España.
16. NRC (National Research Council). 1989. Field testing genetically modified organisms. Framework for decisions. The National Academies Press, USA.
17. NRC (National Research Council). 2002a. Environmental effects of transgenic plants. The scope and adequacy of regulation. The National Academies Press, USA.
18. NRC (National Research Council). 2002b. Animal biotechnology. Science based concerns. The National Academies Press, USA.
19. NRC (National Research Council). 2004. Safety of genetically engineered foods. The National Academies Press, USA.
20. NSTC (National Science and Technology Council). 1995. Biotechnology for the 21st century: new horizons. Un reporte del Subcomité de Investigación en Biotecnología, elaborado por la Oficina del Asesor Científico de la Presidencia de USA.
21. Ozden Y. 2012. Transgenic plants; advances and limitations. *InTech*. Y. Ozden (Ed.). DOI: 10.5772/1409.
22. Padilla J., López-Munguía A. 2002. Alimentos transgénicos. ADN Editores y Conaculta, Ciudad de México.
23. Pinkert C.A. 2016. Transgenic animal technology. C.A. Pinkert (Ed.), 3rd edition., Elsevier B.V.
24. Popp J. *et al.* 2012. The role of biotechnology in a sustainable food supply, Cambridge University Press, New York.
25. Smith H.S. 2013. Genentech: The beginning of biotech. The University of Chicago Press, Chicago & London..
26. Villalobos A.V. 2008. Los transgénicos. Oportunidades y amenazas. Mundi Prensa y Universidad Autónoma de Chapingo.



CAPÍTULO IV

AUSENCIA DE DAÑO POR EL CONSUMO DE PRODUCTOS TRANSGÉNICOS COMO ALIMENTO EN HUMANOS Y ANIMALES

- LOS ALIMENTOS TRANSGÉNICOS SON INOCUOS
- ANÁLISIS DEL TRABAJO DE SÉRALINI *ET AL.* 2012
- DECISIONES DE AGENCIAS RESPONSABLES DE LA SEGURIDAD ALIMENTARIA

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan y comentan varios reportes de las academias de ciencias y medicina de diferentes países y, en particular, evidencias científicas, muchas de ellas publicadas en revistas arbitradas, que sustentan el bajo riesgo, la inocuidad y la ausencia de daño de los organismos genéticamente modificados, y especialmente, de las plantas transgénicas y sus productos cuando se consumen como alimento para humanos y animales. También se comentan las decenas de artículos en los que se señala que los cultivares transgénicos son similares a los cultivares de donde éstos se generaron, mediante la caracterización por ciencias ómicas, y que, por ende, existe equivalencia sustantiva y metabólica entre estos cultivos. Asimismo, se incluyen y se comentan artículos publicados en los años 2012 y 2014 por Séralini

y colaboradores, en los que afirman que hay daño en los animales que consumieron plantas transgénicas o sus productos. Otra publicación más reciente (2016) de este mismo grupo, señala que las plantas transgénicas no son similares metabólica y composicionalmente a las parentales y que, por ello, no existe equivalencia sustantiva con los cultivos convencionales. Estas tres publicaciones de Séralini y colaboradores aquí mencionadas se refutan y rechazan con la amplia y contundente información publicada y presentada.

OGM: INOCUIDAD, AUSENCIA DE DAÑO
Y EQUIVALENCIA SUSTANTIVA RESPECTO
A CULTIVOS CONVENCIONALES

En esta sección se presentan consideraciones y evidencias científicas que sustentan la inocuidad y la ausencia de daño por consumir plan-

tas transgénicas y sus productos, así como la equivalencia sustantiva con los cultivos convencionales por su similitud con las plantas parentales. Como se mencionó en el capítulo II, las plantas transgénicas y sus productos iniciaron su comercialización en 1996, bajo un esquema muy detallado de evaluación, previo a su aprobación como alimento. A la fecha, hay cientos de evaluaciones de eventos transgénicos en diversas partes del mundo, algunos de los cuales se presentan y analizan a continuación, y todos ellos demuestran la inocuidad y la ausencia de daño en animales por consumir alimentos transgénicos y su equivalencia sustantiva y composicional con los alimentos convencionales, mediante experimentos *in vivo* e *in vitro*.

Más de 1,800 publicaciones científicas realizadas en diferentes laboratorios del mundo y que se han publicado en revistas arbitradas por pares, particularmente por grupos de universidades y centros de investigación europeos, sobre la seguridad, la inocuidad y los efectos de los OGM a la salud, la agricultura y el medio ambiente. La mayoría de estas publicaciones han sido en revistas que cuentan con comités editoriales y reconocidos evaluadores con prestigio. Varias de estas publicaciones se encuentran señaladas en los reportes de las academias de ciencias y medicina de diferentes países y en los metaanálisis que se presentan y comentan en este capítulo, incluyendo uno de Nicolai y colaboradores del año 2014 que compila y revisa 1,783 publicaciones.

Gracias a esta amplia y contundente información, se cuenta con resultados repetibles, derivados de diferentes grupos de investiga-

ción en distintos países, con metodologías técnicamente adecuadas, lo cual da mayor certeza a las conclusiones que emanan de estas investigaciones independientes, enlistadas en breve.

Lo anterior ha permitido a diferentes investigadores realizar estudios compilados y presentados en metaanálisis de la información existente sobre aspectos específicos, incluyendo la revisión conjunta de la evidencia resultante de la amplia investigación disponible. Esta información ha permitido generar importantes consideraciones y conclusiones contundentes que aquí se señalan.

En términos generales, estos metaanálisis, agrupados por revisiones de la literatura de varias decenas de artículos científicos arbitrados, muestran que los alimentos transgénicos y sus productos:

i) Son inocuos para la salud humana y animal. Se han utilizado en animales por periodos largos de 90 días sin presentar daños a la salud de los roedores. En Europa este exigido por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus siglas en inglés). Los experimentos fueron realizados por 44 grupos de investigación de todo el mundo, quienes publicaron sus resultados en revistas arbitradas. Adicionalmente, en este análisis se tomó en cuenta la opinión de 60 documentos de la EFSA sobre dichos experimentos. Los resultados señalan la ausencia de daño en animales por consumir alimentos transgénicos —en particular, plantas transgénicas y sus derivados.

En algunos de estos artículos también se expone que las plantas transgénicas han sido amplia y detalladamente caracterizadas por di-

ferentes grupos, usando ciencias ómicas (análisis de decenas de artículos arbitrados). Los resultados obtenidos demuestran que los cultivos transgénicos son muy parecidos a las plantas parentales; que no existen diferencias importantes entre las miles de moléculas que integran los metabolismos de unas y otras, por lo que se consideran metabólicamente equivalentes. Por último, no se tiene registro de efectos no planeados o inesperados del análisis de cultivos transgénicos por ciencias ómicas, comparativamente con las plantas parentales.

Por lo anterior, los cultivos transgénicos son equivalentes composicionalmente a los cultivos convencionales, conforme a los datos detectados mediante el análisis de ciencias ómicas y otras metodologías.

ii) Por la equivalencia metabólica y sustantiva, por estar compuestos por los mismos componentes, son también nutricionalmente equivalentes a los convencionales y pueden usarse con seguridad como alimento humano o animal, después de los resultados sobre inocuidad comentados previamente.

iii) Las plantas transgénicas y sus derivados se han usado por más de 20 años, para alimentar a mil millones de animales, sin detrimento, sin daño a la salud o a la productividad de los animales.

iv) Se han utilizado para alimentar a cientos de millones de humanos en muchos países, sin evidencia de daño reportada.

Congruente con los resultados y señalamientos de los metaanálisis que respaldan la

inocuidad de los transgénicos, se encuentra el reporte de mayo de 2016 de las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos (NASEM, por sus siglas en inglés): “Genetically engineered crops: experiences and prospects” (Plantas desarrolladas por ingeniería genética: experiencias y perspectivas) y, por su relevancia, vale la pena compartir aquí las conclusiones del capítulo 5, “Human health effects of genetically engineered crops” (Efectos en la salud humana por cultivos transgénicos):

“Las investigaciones que se han llevado a cabo en estudios con animales y sobre la composición química de alimentos transgénicos, no revelan diferencias que pudieran implicar un riesgo más alto para la salud humana por el consumo de transgénicos en comparación con sus contrapartes no transgénicas. Estudios epidemiológicos a largo plazo no han estado enfocados directamente al consumo de alimentos transgénicos, pero sí se dispone de series de datos epidemiológicos que no muestran ni enfermedades ni condiciones crónicas en poblaciones correlacionadas con consumo de transgénicos. El comité no ha encontrado evidencia persuasiva de efectos adversos a la salud directamente atribuibles al consumo de alimentos transgénicos. Nuevos métodos para medir la composición de alimentos a través de las ciencias ómicas proporcionan valoraciones amplias, no específicas, de miles de moléculas de ARN, de proteínas y compuestos de plantas. Cuando se uti-

lizan estos métodos, las diferencias entre plantas transgénicas y convencionales son pequeñas en relación con las variaciones naturales en variedades generadas de manera tradicional. Las diferencias, por sí solas, no indican un problema de seguridad. Algunos datos indican que ciertos cultivos transgénicos resistentes a los insectos son benéficos para la salud humana al reducir la intoxicación con insecticida”.

[The research that has been conducted in studies with animals and on chemical composition of GE food, reveals no differences that would implicate a higher risk to human health, from eating GE than from eating their non GE counter parts. Long-term epidemiological studies have not directly addressed GE food consumption, but available time series epidemiological data do not show any disease or chronic condition in populations that correlate with consumption. The committee could not find persuasive evidence of adverse health effects directly attributed to consumption of GE food. New methods to measure food composition using “omic” sciences, provide a broad, non targeted assessment of thousands of plant RNA, proteins and compounds. When these methods have been used, the differences found in comparisons of GE and non-GE plants, have been small relative to the naturally occurring variations found in conventionally bred crops varieties. Differences in their own, do not indicate a safety problem. There is some evidence that GE

insect resistant crops have benefits to human health by reducing insecticide poisonings].

Esta conclusión reitera la tesis del análisis científico-técnico realizado a las más de 1,800 referencias en apoyo a los cultivos transgénicos y sus productos que demuestran total inocuidad y grandes beneficios por su uso.

Ricroch, 2013; Nicolai et al., 2014; Ricroch et al., 2014; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS SOBRE INOCUIDAD POR CONSUMO Y EQUIVALENCIA RESPECTO A CULTIVOS CONVENCIONALES

Aquí se presenta y se comenta un conjunto de artículos científicos que analizan las evidencias de inocuidad en animales de laboratorio (roedores) tras consumir alimentos transgénicos por periodos largos de 90 días, requisito en la Unión Europea, definido por la EFSA y otras agencias e instancias en el mundo. En algunos de estos artículos, que utilizan los metaanálisis, se comentan también los resultados obtenidos mediante ciencias ómicas de la caracterización de plantas transgénicas en comparación con las plantas parentales, utilizadas como alimento.

► Snell y colaboradores en 2012 publicaron una revisión que analiza y evalúa en la literatura publicada en revistas científicas con revisión por pares, el impacto en la salud de animales por el consumo de diversos cultivos transgénicos en periodos largos y multigeneracionales (ver figura IV.1).

Este metaanálisis incluyó 12 estudios de alimentación a largo plazo (de 90 días a más de dos años) y 12 estudios multigeneracionales (de dos a cinco generaciones) que se llevaron a cabo mediante diferentes métodos.

En este trabajo los investigadores concluyen que las plantas genéticamente modificadas (GM)

son equivalentes nutricionalmente a sus contrapartes convencionales y pueden usarse de manera segura como alimento humano y para forrajes.

► La Dra. Ricroch en 2013 publicó una revisión de la literatura en revistas científicas con revisión de pares, que analiza y evalúa la segu-



Figura IV.1. Carátula del artículo de Snell y colaboradores, 2012: “Assessment of the health impact of GM plant diets in long-term and multigenerational animal feeding trials: a literature review” (Valoración del impacto en la salud por dietas con plantas genéticamente modificadas en periodos largos y multigeneracionales en pruebas de alimentación en animales: una revisión de la literatura), *Food and Chemical Toxicology* 50(3–4), 1134–1148.

Se agradece el permiso de Elsevier para incluir esta carátula. Licencia número 4061440414806.

Permission granted by Elsevier. License number 4061440414806.

ridad de los cultivos GM en la salud, utilizando animales alimentados con plantas transgénicas y sus productos por periodos largos, multigeneracionales y bajo diferentes enfoques, incluyendo el análisis con ciencias ómicas de las plantas utilizadas como alimento.

En este artículo se analizan 17 estudios de alimentación a largo plazo y 16 estudios multigeneracionales en diferentes animales alimentados con alimentos transgénicos. También se presenta el análisis de los perfiles ómicos de diferentes plantas transgénicas en decenas de experimentos independientes publicados en revistas arbitradas (ver figura IV.2). Los resultados indican y señalan que:

- Decenas de comparaciones entre líneas GM y no GM con investigaciones “ómicas” (transcriptómica, proteómica, metabolómica). “Las comparaciones de perfiles con ómicas revelan que la modificación genética tiene menor impacto sobre la expresión de genes que el mejoramiento convencional. No existen diferencias metabólicas importantes entre las variedades transgénicas y los cultivos parentales. No hay efectos no esperados del análisis de las plantas transgénicas, y son sustancialmente equivalentes a las plantas parentales comerciales. Más aun, factores ambientales (como la localidad del campo del cultivo, la temporada de muestreo, las prácticas agrícolas) tienen mayor impacto que la transgénesis”.
- 17 estudios de alimentación a largo plazo (más de 90 días).
- 16 estudios multigeneracionales (de 2 a 10 generaciones).

En dicho artículo se señala que no existe daño reportado por el consumo de plantas transgénicas en periodos largos de 90 días ni en estudios multigeneracionales. También, que las plantas transgénicas han sido caracterizadas por diferentes grupos usando ciencias ómicas. En este análisis de decenas de publicaciones arbitradas se demuestra que los cultivares transgénicos son muy parecidos a las plantas parentales y que no existen diferencias importantes entre las miles de moléculas que integran los metabolismos de ambos grupos. Por lo anterior, se puede afirmar que las plantas son metabólicas y sustancialmente equivalentes. Además, no se han detectado efectos no planeados o inesperados en los cultivos transgénicos, analizados por ciencias ómicas, en comparación con los cultivos parentales. Este análisis también indica que las variedades de maíz generadas por mutágenos permitidos en las técnicas de mejoramiento tradicional —y que se utilizan comercialmente y consumen desde hace muchos años sin daño a la salud—, tienen mayores diferencias que las detectadas entre las plantas transgénicas y los parentales convencionales.

Este mismo grupo de la Dra. Ricroch y colaboradores publicó en 2011 el trabajo “Evaluation of genetically engineered crops, using transcriptomic, proteomic, and metabolomic profiling”, y en 2013 el artículo “Long term and multi-generational animal feeding studies”.

► La Dra. Ricroch y colaboradores en 2014 publicaron un muy importante artículo, y el más reciente que incluye el metaanálisis de varios artículos: “Looking back at safety

assessments of GM food/feed: an exhaustive review of 90 day animal feeding studies” (Revisando la valoración de la inocuidad de la alimentación y del alimento genéticamente modificado: una revisión exhaustiva de los estudios de alimentación a animales por periodos de 90 días).

En esta publicación se hace una nueva revisión, más extensa y actual, de un total de 44 artículos publicados en revistas científicas arbitradas de laboratorios independientes, utilizando nueve diferentes cosechas transgénicas como alimento para diferentes animales, principalmente roedores, por periodos largos



Figura IV.2. Carátula del artículo de Ricroch, 2013: “Assessment of GE food safety using ‘omics’ techniques and long-term animal feeding studies” (Evaluación de la inocuidad del alimento genéticamente modificado, utilizando ciencias ómicas y animales alimentados por periodos largos), *New Biotechnology* 30, 4, 349–354.

Se agradece el permiso de Elsevier para incluir esta carátula. Licencia número 4064911006926.

Permission granted by Elsevier. License number 4064911006926.

de 90 días (ver figura IV.3). En este análisis también se toman en cuenta 60 opiniones de la EFSA sobre estos 44 artículos, muchas de ellas publicadas en el *EFSA Journal*. Lo anterior implica que se cuenta con un total de 104

documentos y opiniones sobre este asunto de la inocuidad por alimentación con cultivos transgénicos en periodos largos de alimentación a roedores. En este metaanálisis se analizan 27 casos, de diferentes países, que evalúan

la alimentación a ratas con maíz transgénico, incluyendo un caso de Healy y colaboradores, 2008, que incorpora el análisis de la cepa MON88017 (Healy y colaboradores, 2008: “Results of a 13 week safety assurance study with rats fed grain from corn rootworm-worm protected glyphosate tolerante MON88017 corn”), y otro de Liu y colaboradores, 2012 (“A 90 day subchronic feeding study of genetically modified maize expressing cry-1A protein in Spague-Dawley rats”).

Este metaanálisis confirma lo presentado en todos los metaanálisis de las revisiones previas de decenas de artículos publicados, como los de Snell y colaboradores, 2012; Ricroch, 2013; Ricroch y colaboradores, 2013, y otros. En todos estos trabajos se señala la ausencia de efectos negativos, dañinos, de significancia biológica o toxicológica en los animales por consumir alimentos provenientes de plantas transgénicas por periodos largos de 90 días.

Se señala que la EFSA (2011b) requiere de este tipo de estudios de 90 días de duración en experimentos de alimentación a animales con productos transgénicos. También es uno de los procedimientos que señala la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) para caracterizar los alimentos transgénicos.

En el anexo 6 se incluye el listado de las decenas de artículos sobre la caracterización de las plantas transgénicas mediante ciencias ómicas, y en el anexo 7 la lista de los 44 experimentos de alimentación por periodos largos de 90 días a diferentes animales con varias plantas transgénicas, y las 60 opiniones científico-técnicas adicionales de la EFSA sobre estas publicaciones

relacionadas con la inocuidad de los alimentos transgénicos, lo cual suma varias decenas de documentos, provenientes de los artículos de Ricroch, 2013, y de Ricroch y colaboradores, 2014.

Batista et al., 2008; Healy et al., 2008; Fratamico et al., 2009; EFSA, 2011b; Ricroch et al., 2011; Liu et al., 2012; Snell et al. 2012; Ricroch, 2013; Ricroch et al., 2013; Ricroch et al., 2014

OTRAS PUBLICACIONES SOBRE LA INOCUIDAD DE ALIMENTOS TRANSGÉNICOS Y LA EQUIVALENCIA COMPOSICIONAL ENTRE CULTIVOS TRANSGÉNICOS Y CONVENCIONALES

En el estudio de Herman y Price, 2013, se presentan y analizan más de 80 publicaciones en revistas indexadas con revisión por pares que documentan la equivalencia composicional entre cultivos GM y convencionales. Este metaanálisis señala que no se han identificado efectos no esperados en la composición de cultivos GM a lo largo de 20 años evaluando y midiendo los niveles y los efectos principalmente de las proteínas de los cultivos transgénicos, comparativamente con los cultivos parentales. En 2017, Herman y colaboradores publicaron un artículo en el cual se demuestra que la composición del maíz transgénico del evento DAS-01507-1 en siete diferentes cruces, tiene menos alteraciones que los maíces tradicionales. Estos resultados son congruentes y complementan los resultados obtenidos y analizados por Ricroch, 2013, y Ricroch y colaboradores, 2014.

Herman y Price, 2013; Ricroch, 2013; Ricroch et al., 2014; Herman et al., 2017



Figura IV.3 . Carátula del artículo de Ricroch y colaboradores, 2014: “Looking back at safety assessments of GM food/feed: an exhaustive review of 90 day animal feeding studies” (Revisando la valoración de la inocuidad en la alimentación y el alimento genéticamente modificado: una revisión exhaustiva de los estudios de alimentación a animales por periodos de 90 días), *International Journal of Biotechnology* 13: 230–256.

Se agradece el permiso de INDERSCIENCE Publishers para incluir esta carátula, <http://www.inderscience.com>

Permission granted by INDERSCIENCE Publishers, <http://www.inderscience.com>



Figura IV.4. Animales alimentados con maíz transgénico en Estados Unidos. Más de mil millones de animales, y cientos de millones de humanos, se han alimentado con granos transgénicos sin presentar daños a la salud, como se señala en el artículo de Van Eenennaam y Young, 2014.

REPORTE SOBRE AUSENCIA DE DAÑO EN MIL MILLONES DE ANIMALES QUE CONSUMIERON ALIMENTOS TRANSGÉNICOS Y SUS PRODUCTOS

En el trabajo de Van Eenennaam y Young se presentan estudios de salud y productividad en animales alimentados con piensos (forrajes) de plantas transgénicas. En 2014 estos autores publicaron el impacto de una alimentación con cultivos GM para ganado y aves, una comparación de parámetros de productividad y salud en animales alimentados con piensos de cultivos convencionales (1983–1996) y con piensos de cultivos GM (2000–2011). Estos datos, que representan e incluyen a más de mil millones de animales alimentados con piensos GM, no revelan ningún detrimento o daño a la salud o productividad de los mismos.

La información anterior es muy relevante por varias razones; entre ellas, poder señalar

que los animales que se utilizan como alimento para humanos, no presentan daños a la salud por consumir plantas transgénicas o sus derivados, lo cual debería disminuir la desconfianza hacia el consumo de animales, y sus múltiples productos, alimentados con transgénicos. Estos resultados se suman a la evidencia que indica que no hay riesgo ni daño a la salud humana por el consumo, a largo plazo, de animales —o sus productos— alimentados con cultivos transgénicos y sus derivados.

Van Eenennaam y Young, 2014

TRABAJO DE SÉRALINI Y COLABORADORES, 2012, QUE REPORTA CÁNCER EN RATAS QUE CONSUMIERON MAÍZ TRANSGÉNICO

Este artículo y sus conclusiones han sido ampliamente analizados, rechazados y refutados

por muchos, como se analiza en los siguientes párrafos. Existe, además, un trabajo reciente de Séralini y colaboradores, 2016, donde se señala la ausencia de equivalencia sustantiva entre cultivares. Dicha publicación se incluye y rebate al final de este capítulo.

El estudio original de Séralini y colaboradores, 2012, “Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize” (Toxicidad en periodos largos por un herbicida tipo ‘Roundup’ y un maíz genéticamente modificado tipo ‘Roundup’), se publicó en la revista *Food and Chemical Toxicology* (50, 4221–4231) en septiembre de 2012. Inmediatamente fue recibido con fuertes críticas de la comunidad científica, en particular la europea, con cuestionamientos que empezaron por la forma inusual y arbitraria en la que fueron presentados los resultados a la prensa y, en lo tocante al contenido, abarcaron desde un diseño experimental deficiente y la validez de los resultados, hasta el uso inadecuado e incorrecto de animales de laboratorio. En el año 2014, el editor de la revista de circulación internacional, *Food and Chemical Toxicology*, después de haber analizado el amplio, importante y bien sustentado conjunto de señalamientos en contra de la validez del artículo, la interpretación de los resultados y las amplias y sustentadas descalificaciones por diferentes instancias, retractó la publicación de Séralini y colaboradores del año 2012 (Séralini *et al.*, 2014a) (ver figura IV.5).

En junio de 2014 Séralini y su grupo volvieron a publicar sin cambio alguno, sin tomar en cuenta ninguna de las múltiples sugerencias y cuestionamientos que se comentaron, los mismos datos, el mismo artículo original,

en la revista abierta *Environmental Sciences Europe* (Séralini *et al.*, 2014b). Es interesante que, a pesar de que transcurrieron dos años de la publicación original, el grupo de Séralini no tuvo interés en repetir los experimentos tomando en cuenta algunas de las sugerencias hechas por la comunidad científica internacional; ni siquiera tuvieron interés en modificar la discusión de sus resultados para dar respuesta a algunos de los cuestionamientos hechos por sus pares, incluidas algunas asociaciones de médicos y expertos en toxicología y, en particular, las señaladas por la EFSA y por las seis Academias Nacionales Francesas (de Ciencias, de Medicina, de Agricultura, de Farmacia, de Tecnología y de Veterinaria), en los pronunciamientos sobre las muy amplias deficiencias de esta publicación de Séralini y colaboradores, 2012, algunas de las cuales se señalan aquí.

Después de analizar los amplios señalamientos y evidencias en contra del artículo de Séralini y colaboradores, 2012, no hay razones de peso que sustenten que el editor, como señalaron algunos, no resistiera las presiones y se vendiera a la compañía Monsanto, dueña de la semilla de maíz transgénico NK630, usada por Séralini y su grupo en la publicación que fue retractada. Los señalamientos de descalificación y las evidencias en contra de la calidad del trabajo de Séralini y colaboradores son contundentes; en particular, las señaladas por la EFSA que se presentan en la figura IV.7.

“Cuando los resultados de un experimento no reflejan lo que observamos en el mundo real, los científicos saben que el diseño del

experimento o su interpretación están mal e intentan corregirlo. Séralini insiste que sus experimentos e interpretaciones son correctos; la realidad es que están mal”.

Alan Mcugen

[When the results of an experiment fail to reflect what we observe in the real world, the scientist knows the experimental de-

sign or interpretation must be wrong and tries to correct it. But Séralini insists his experiments and interpretations are fine; it's reality that's wrong].

Alan Mcugen

Entre los elementos y documentos que estuvieron a disposición del editor de la revista *Food and Chemical Toxicology* para retractar la



Figura IV.5. Carátula del aviso de retractación por parte del editor de la revista *Food and Chemical Toxicology*, respecto a la publicación del artículo de Séralini y colaboradores, 2012: "Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize" [*Food Chem. Toxicol.* 50 (2012), 4221–4231]. Este aviso fue publicado en *Food and Chemical Toxicology* 63, 244, en el año 2014.

Se agradece el permiso de Elsevier para incluir esta carátula. Licencia número 4061440536877.

Permission granted by Elsevier. License number 4061440536877.

publicación, destacan varias cartas y documentos, entre ellos:

a) Pronunciamiento de la EFSA sobre el artículo de Séralini y colaboradores publicado en la revista *Food and Chemical Toxicology* el 19 septiembre de 2012. Este pronunciamento fue publicado en el *EFSA Journal*, 2012, y se incluye como figura IV.6.

En la revisión final del artículo mencionado, el resumen y las conclusiones señalan que:

“La EFSA observa que el estudio de Séralini *et al.* 2012 tiene objetivos poco claros y se reporta de manera inadecuada en la publicación, con un conjunto clave de detalles omitidos en cuanto al diseño, la conducta y el análisis. Sin estos detalles es imposible dar peso a los resultados.

No se pueden sacar conclusiones sobre la diferencia en la incidencia de tumores entre los grupos bajo estudio, basándose solamente en el diseño, el análisis y los resultados reportados [...] Debido a que el estudio de Séralini *et al.* 2012 contiene un diseño, análisis y reporte inadecuados, EFSA concluye que es de una calidad científica insuficiente para una evaluación sobre inocuidad. Por consiguiente, la EFSA concluye que este estudio no impacta la continua evaluación de glifosato, y que no ve la necesidad de reabrir la evaluación existente sobre la seguridad de maíz NK603 y sus eventos apilados”.

[EFSA notes that the Séralini *et al.* 2012 study has unclear objectives, and is inade-

quately reported in the publication, with many key details of the design, conduct and analysis being omitted. Without such details, it is impossible to give weight to the results. Conclusions cannot be drawn on the differences in tumors incidence between the treatment groups, on the basis of the design, the analysis and the results reported [...] Considering that the study of Séralini *et al.* 2012, is of inadequate design, analysis and reporting, EFSA find that it is of insufficient scientific quality, for safety assessment. Therefore, EFSA concludes that this study does not impact the ongoing reevaluation of glyphosate and does not see a need to reopen the existing safety evaluation of maize NK603 and its related stacks].

b) Carta enviada al editor de la revista por la Sociedad Europea de Patología Toxicológica (ESTP, por sus siglas en inglés), en la que explican las fallas del estudio de Séralini y colaboradores, 2012, y la interpretación errónea de los datos.

Esta carta fue elaborada por expertos europeos de la Sociedad Europea de Patología Toxicológica. Dicho grupo, integrado por expertos que conocen la problemática de la patología toxicológica, cuestionó duramente el trabajo mencionado. Se cita a continuación el último párrafo de esta carta, cuyo texto completo puede consultarse en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.043>

“La ESTP llega a la conclusión de que los datos sobre patología presentados en este documento y su relevancia para el análisis

de riesgo para humanos, son cuestionables y no han sido correctamente interpretados ni mostrados debido al hecho de que no concuerdan con los protocolos establecidos para la interpretación de estudios de

carcinogenicidad en roedores. La descripción de la patología y las conclusiones de este estudio no son profesionales. Existen malas interpretaciones sobre los tumores y los procesos biológicos relacionados. Mal



Figura IV.6. Carátula del pronunciamiento final de la EFSA respecto al artículo de Séralini y colaboradores, 2012: "Final review of the Séralini *et al.* (2012a) publication on a 2 year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603 as published online on 19 September 2012 in *Food and Chemical Toxicology*" (Revisión final de la publicación de Séralini *et al.* (2012a) sobre la alimentación en roedores durante periodos de dos años con formulaciones de glifosato y maíz GM NK603, publicado en línea el 19 de septiembre de 2012 en *Food and Chemical Toxicology*), *EFSA Journal* 10 (11), 2986, 2012.

© European Food Safety Authority (2012) Carátula reproducida con el permiso de John Wiley & Sons, Ltd. Contrato No. 108405.

Permission granted by John Wiley & Sons, Ltd. Contract number 108405.

uso de la terminología del diagnóstico; imágenes que no son informativas y que presentan cambios que no corresponden a la narrativa. Nos gustaría terminar nuestro comentario con una pregunta: ¿cuál fue la lógica científica que llevó a los evaluadores de la revista y al Consejo Editorial de *Food and Chemical Toxicology* a aceptar la publicación de este artículo?"

[The ESTP comes to the conclusion that the pathology data presented in this paper are questionable and not correctly interpreted and displayed because they don't concur with the established protocols for interpreting rodent carcinogenicity studies and their relevance for human risk assessment. The pathology description and conclusion of this study are unprofessional. There are misinterpretations of tumors and related biological processes. Misuse of diagnostic terminology; pictures are not informative and presented changes do not correspond to the narrative. We would like to finish our commentary with a question: what is the scientific rationale that led the journal reviewers and the Editorial Board of *Food and Chemical Toxicology* to accept this article for publication?].

c) Comunicado de prensa de las seis Academias Nacionales Francesas donde exponen insuficiencias metodológicas y de interpretación, por lo que el trabajo de Séralini y colaboradores, 2012, no permite ninguna conclusión fiable. Además, cuestionan profundamente la manera en la que dieron a conocer los resul-

tados: un comunicado de prensa con cláusula de confidencialidad prohibiendo la consulta de expertos (se incluye como anexo 8 de este documento).

Comunicado de prensa de las Academias Nacionales Francesas, 2012: www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/avis1012.pdf

Estas tres cartas y otras fueron enviadas al editor de la revista *Food and Chemical Toxicology*, solicitando que se retractara el artículo de Séralini y colaboradores, 2012. Estos documentos fueron publicados en la misma revista *Food and Chemical Toxicology*.

Barale-Thomas, 2013; Panchin, 2013; Schorsch, 2013; Tribe, 2013

d) Adicionalmente, el artículo de Séralini y colaboradores, 2012, fue refutado y descalificado por decenas de análisis hechos por especialistas y comunicados por agencias encargadas de la evaluación de inocuidad y seguridad de alimentos, algunos de las cuales se listan a continuación, incluyendo varias europeas adicionales a las mencionadas:

AFSCA, 2012: www.favv.be/raadgevendcomite/verslagenvergaderingen/_documents/2012-10-24_Punt-4_NL_Séralini-studie_RC.pdf; ANSES, 2012: www.anses.fr/sites/default/files/documents/BIOT2012sa0227.pdf; BfR, 2012: www.bfr.bund.de/cm/349/feeding-study-in-rats-with-genetically-modified-nk603-maize-and-with-a-glyphosate-containing-formulation-roundup-published-bei-Séralini-et-al-2012.pdf; CFIA, 2012: www.hc-sc.gc.ca/fn-an/gmf-agm/Séralini-eng.php; CTNBIO,



Figura IV.7. Carátula del Aviso de las Academias Nacionales Francesas enviado al editor de la revista *Food and Chemical Toxicology* respecto a la publicación de Séralini y colaboradores, 2012

(Avis des Académies nationales d'Agriculture, de Médecine, de Pharmacie, des Sciences, des Technologies, et Vétérinaire sur la publication récente de G.E. Séralini *et al.* sur la toxicité d'un OGM).

Se agradece el permiso de la vicepresidenta de la Academia de Ciencias de Francia, Mme. Cathérine Cesarsky, para incluir esta carátula.

Permission granted by Mme. Cathérine Cesarsky, Vicepresident of the French Academy of Sciences.

2012: www.conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/comunicacion/prensa/CTNBIO-Brasil-Seralini1725.pdf;
EFSA, 2012a: www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf;
HCB, 2012: www.hautconseildesbiotechnologies.fr/sites/www.hautconseildesbiotechnologies.fr/files/file_fields/2015/07/05/cplehcbrendsonavisurletudepublieeparleprSeralini.pdf / www.hautconseil

desbiotechnologies.fr/sites/www.hautconseildesbiotechnologies.fr/files/file_fields/2015/06/30/121019etudeSeraliniaviscshcb.pdf;
FSANZ, 2016: www.foodstandards.gov.au/consumer/gmfood/Seralini/Pages/default.aspx

Es importante remarcar que la publicación de Séralini y colaboradores, del año 2014 (idén-

tica a la del año 2012), fue analizada detallada y exhaustivamente por el comité de las NASEM, encargado de evaluar los asuntos relacionados con los posibles efectos a la salud humana por el consumo de los cultivos transgénicos. En 2014, dicho comité se entrevistó directamente con Séralini quien les presentó, comentó y discutió sus resultados y consideraciones (Séralini, 2014c: "Presentation to the National Academies of Sciences' Committee on Genetically Engineered Crops. Past experiences and future prospects"). Y, como se ve en detalle en el capítulo 5 del reporte de las NASEM, los resultados y argumentos de Séralini no modificaron la postura ni las conclusiones del comité respecto a este asunto, conclusiones señaladas al inicio de este capítulo. El comité de las NASEM seguramente tomó en cuenta los amplios argumentos y consideraciones en contra del artículo de Séralini y colaboradores presentados al editor de la revista *Food and Chemical Toxicology*, entre ellos, el pronunciamiento de la EFSA, así como los señalamientos de las NASEM, de las Academias Nacionales Francesas, y de la Sociedad Europea de Patología Toxicológica, entre otras instancias europeas que se señalaron previamente.

Cabe subrayar que el tipo de trabajo del grupo de Séralini y colaboradores, publicado en los años 2012 y 2014, fue repetido por varios otros grupos en condiciones técnicas adecuadas y controladas, ampliamente comentadas en Snell y colaboradores, 2012; Ricroch, 2013 y, en particular, en Ricroch y colaboradores, 2014, donde se analizan 44 artículos científicos y 60 opiniones de la EFSA que indican que no existen efectos negativos en los roedores por el consumo de los cultivos transgénicos y sus

productos, incluyendo un maíz propiedad de Monsanto. Estos resultados respecto al consumo animal de alimento transgénico por periodos largos y con ausencia de daño, fueron considerados por los expertos del comité de las NASEM que elaboró el reporte mencionado, así como también por la EFSA, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios de México (Cofepris), como se señala más adelante.

En relación con la ausencia de daño de los transgénicos por su consumo, se revisó el artículo de Panchin y Tuzhikov, 2016, incluido en el reporte de las NASEM, 2016, que analiza con detalle siete artículos publicados que señalan los supuestos efectos negativos por el consumo de OGM; entre estos artículos, los de Séralini y colaboradores, 2012 y 2014, en los que se indica que el alimento transgénico causa cáncer. Panchin y Tuzhikov insisten en que después de llevar a cabo un análisis estadístico más adecuado de los datos reportados en estos siete artículos (Bonferroni correction), las conclusiones sobre el efecto negativo de los OGM reportados en estos artículos no se sostienen. Es importante subrayar que el reporte de las tres academias NASEM, 2016, sobre las plantas transgénicas, analiza a detalle la información relacionada con posibles efectos cancerígenos en humanos por el consumo de transgénicos, incluyendo los trabajos ampliamente descalificados de Séralini y su grupo, de los años 2012 y 2014.

Aviso de las Academias Nacionales Francesas, 2012: www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/avis1012.pdf

EFSA, 2012a: www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf; Séralini et al., 2012; Snell et al., 2012; ESTP, 2013: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.043> Barale-Thomas, 2013; Panchin, 2013; Ricroch, 2013; Schorsch, 2013; Tribe, 2013; Ricroch et al., 2014; Séralini et al., 2014a; Séralini et al., 2014b; Séralini et al., 2014c; NASEM, 2016: <http://doi.org/10.17226/23395>; Panchin y Tuzhikov, 2016

METAANÁLISIS DE 1,783 ESTUDIOS SOBRE EL BAJO RIESGO Y LA AUSENCIA DE DAÑO POR EL USO DE LAS PLANTAS TRANSGÉNICAS

Con el propósito de completar y conjuntar de manera amplia y contundente la información que sustenta la inocuidad de las plantas transgénicas y sus productos, es importante señalar

que en el año 2014, Nicolía y colaboradores publicaron un extenso metaanálisis de 1,783 publicaciones científicas sobre el bajo riesgo de los transgénicos. Estos estudios los realizaron diferentes grupos en varios países. El trabajo incluyó una revisión de la literatura científica publicada en los últimos 10 años en revistas científicas que cumplen con el requisito de la revisión por pares como parte de su proceso para publicación. Este grupo concluye que con la investigación con la que se cuenta hasta ahora, no se ha detectado ningún peligro significativo asociado directamente con el uso de cultivos genéticamente modificados. Los autores reconocen que el gran reto de esto es la comunicación a la sociedad, a la opinión pública ya que, pese a la evidencia contundente del bajo riesgo de estos organismos, se mantiene un intenso debate al respecto (ver figura IV.8).

Como se señaló ya, el muy amplio número de trabajos científicos contundentes y reproducibles, arbitrados por pares, publicados en más de 1,800 revistas científicas, reportes y libros, recomendaciones, opiniones, dictámenes de la EFSA, apoyos respecto al bajo riesgo, la inocuidad y la ausencia de daño por el consumo de los organismos genéticamente modificados y sus productos, se presentan y analizan en este libro, así como en el reporte de las tres NASEM de Estados Unidos sobre plantas transgénicas. El propósito es dar a conocer adecuadamente la información sobre los organismos transgénicos y ayudar a orientar las decisiones basadas en la evidencia científica respecto a la ausencia de daño por consumir cultivos transgénicos y sus productos, así como los beneficios de su uso. Es importante señalar que en este extraor-

dinario artículo de Nicolía y colaboradores también se analiza el asunto del flujo génico y el polen transgénico.

Asimismo, es importante destacar e insistir en que las dos declaraciones de grupos de premios Nobel en apoyo a los OGM señalan que el consumo de alimentos transgénicos no ha generado daños a la salud, y no tendría por qué generarlos.

Nicolía et al., 2014: <http://dx.doi.org/10.3109/07388551.2013.823595>; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>

DECISIONES DE AGENCIAS Y AUTORIDADES RESPONSABLES DE LA SEGURIDAD ALIMENTARIA RESPECTO A LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS Y SUS PRODUCTOS

Como importante apoyo técnico y científico a los argumentos del bajo riesgo, la inocuidad y la ausencia de daño por consumir plantas transgénicas y sus productos, se suma el hecho de que las autoridades y agencias responsables de la seguridad y la inocuidad alimentaria —como la Cofepris, la FDA y la EFSA— no han retirado del mercado ninguno de los medicamentos ni productos de origen transgénico aprobados que se utilizan en las industrias alimentaria y de la salud y, en particular, los productos de plantas transgénicas y sus derivados que actualmente se consumen comercialmente en muchos países (ver figura IX.11). En México, como se señala también en los capítulos VI y X, la Cofepris ha otorgado más de 100 autorizaciones para la



Figura IV.8. Carátula del artículo de Nicolía y colaboradores, 2014: “An overview of the last 10 years of genetically engineered crop safety research” (Un análisis de los últimos 10 años de investigación en la seguridad de las plantas generadas por ingeniería genética), Crit. Rev. Biotechnol. 34(1), 77–88.

Carátula reproducida con el permiso de Taylor & Francis Group. Factura No. 947303438.

Permission granted by Taylor & Francis Group. Invoice number 947303438.



Figura IV.9. Logos de las agencias y autoridades responsables de evaluar la inocuidad y la seguridad de medicamentos y alimentos, incluyendo los OGM o transgénicos, en diferentes países o comunidades.



Figura IV.10. Carátulas de las dos publicaciones de la EFSA de los años 2012 y 2014, con declaraciones y opiniones científicas sobre los OGM.

© European Food Safety Authority (2012) / © European Food Safety Authority (2014).
Carátulas reproducidas con el permiso de John Wiley & Sons, Ltd. Contrato No. 108405.

Permissions granted by John Wiley & Son, Ltd. Contract number 108405.

importación de diferentes alimentos transgénicos para consumo animal y humano, desde hace muchos años. Además, se subraya que el 70% del maíz amarillo transgénico importado de Estados Unidos que se utiliza en México para satisfacer la demanda, es principalmente para consumo de animales, aunque también se consume por humanos. Tampoco la Organización Mundial de la Salud ha cambiado su posición original sobre los alimentos transgénicos que se señala en el documento “20 preguntas sobre los alimentos genéticamente modificados”, incluido en el anexo 3. Ya se indicó que en Europa existe una situación dividida con relación a los transgénicos ya que varios países prohíben su cultivo. Sin embargo, el maíz transgénico se cultiva en cinco países miembros de la Unión Europea, y los alimentos transgénicos se consumen en muchos países, existiendo 58 productos alimentarios autorizados por la EFSA.

Escenario Base 09–18, Sagarpa, México, 2009: <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Escenariobase09.pdf>; FDA, 2013: http://ceragmc.org/files/cera/GmCropDatabase/decdocs/DAS444066/DAS444066_soybean_US_food_feed.pdf; FDA, 2015 www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/geplants/submissions/ucm436173.htm; European Commission-Fact Sheet: Questions and answers on EU's policies on GMOs, 2015: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-4778_en.htm; Panorama Agroalimentario, Maíz, 2015: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf

A manera de ejemplo aquí se presentan, por un lado, una opinión científica y, por otro,

una declaración de la EFSA sobre los alimentos transgénicos. Una de ellas del año 2012 (ver figura IV.10) y la otra más reciente, de agosto de 2014. El panel de expertos de la EFSA analizó de manera colegiada la información presentada por los países miembros de la Unión Europea respecto a la seguridad de los OGM, y concluye que con base en la documentación presentada por Francia, no hay evidencia científica específica, en términos de riesgos a la salud humana o al medio ambiente, que apoye la notificación de una medida de emergencia que pudiera invalidar la evaluación de riesgos previa realizada al evento de maíz [MON810, transgénico].

EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO), 2012b: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efa.2012.2705/epdf>; FDA, 2013: http://ceragmc.org/files/cera/GmCropDatabase/decdocs/DAS444066/DAS444066_soybean_US_food_feed.pdf; Solleiro y Castañón, 2013; EFSA, 2014: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efa.2014.3809/epdf>; European Commission-Fact Sheet: Questions and answers on EU's policies on GMOs, 2015: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-4778_en.htm; FDA, 2015: www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/geplants/submissions/ucm436173.htm

ARTÍCULO DE MESNAGE Y COLABORADORES, 2016, QUE CUESTIONA LA EQUIVALENCIA SUSTANTIVA ENTRE CULTIVOS TRANSGÉNICOS Y CONVENCIONALES

En la etapa final de la preparación de este libro, la revista *Scientific Reports* publicó un artículo de Mesnage y colaboradores, 2016, en el que uno de los coautores es Seralini. En dicho trabajo se utiliza la planta de maíz transgénico

co NK603, misma que algunos de estos autores presentaron en sus estudios publicados en los años 2012 y 2014 (exactamente el mismo artículo), en donde se señala que este maíz transgénico causa daño a los animales que lo consumen, resultados que han sido ampliamente descalificados. En este nuevo reporte se señala que el proceso de transformación genética causa alteraciones que hacen dudar que la variedad transgénica sea sustancialmente equivalente a la línea parental que le dio origen, habiendo utilizado los mismos métodos de las ciencias ómicas, con análisis proteómico y metabolómico. Los autores reportan que los niveles de 117 proteínas y 91 metabolitos resultaron alterados en la variedad transgénica respecto a la parental. Aunque los resultados de estos experimentos se han utilizado por los autores para alertar de manera alarmante al lector, sin una comparación adecuada y señalando que el maíz transgénico no es equivalente al tradicional, lo verdaderamente sorprendente es que las diferencias sean tan pequeñas. Considerando que el maíz tiene un potencial para producir más de 75.000 diferentes proteínas y las decenas de miles de metabolitos que produce una planta de maíz, es realmente una sorpresa que un número tan reducido de moléculas biológicas, sólo 117 proteínas (0.1%) y 91 metabolitos (0.2%), tengan un nivel ligeramente distinto respecto a su progenitor convencional. Como se ha señalado por la Dra. Ricroch, 2013, el análisis entre variedades de maíz, o nuevas variedades generadas por mutágenos permitidos en las técnicas de mejoramiento tradicional, ha mostrado que las variaciones y las diferencias

en las plantas transgénicas son menores que aquellas encontradas entre diferentes variedades de maíz, o las obtenidas por mutagénesis, muchas de las cuales se utilizan comercialmente y se consumen desde hace muchos años sin tener registros de daños a la salud. Por lo anterior, este trabajo de Mesnage, Séralini y colaboradores, más que una alerta, como intentan los autores, respecto a cambios alarmantes en un producto transgénico, debe considerarse una evidencia adicional a las decenas de artículos científicos publicados en revistas arbitradas, analizados por la Dra. Ricroch, 2013, y comentado en el reporte de las NASEM, 2016, sobre plantas generadas por ingeniería genética. En estos últimos estudios se utilizaron las ciencias ómicas con métodos sofisticados de análisis para demostrar que las variedades transgénicas son metabólica y sustancialmente equivalentes, similares, en las que no existen grandes diferencias con relación a las tradicionales y a las parentales, y que tampoco existen efectos no planeados o inesperados del análisis por ciencias ómicas en los cultivos transgénicos. Los trabajos de Herman y Price, 2013, y de Herman y colaboradores, 2017, sobre equivalencia composicional también respaldan las conclusiones que sostienen que los cultivos transgénicos son sustancialmente equivalentes, incluyendo lo reportado por Mesnage y colaboradores.

Healy et al., 2008; Séralini et al., 2012; Herman y Price, 2013; Ricroch, 2013; Ricroch et al., 2014; Mesnage et al., 2016; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; Herman et al., 2017

CONCLUSIONES SOBRE LA AUSENCIA DE DAÑO A LA SALUD POR CONSUMO DE OGM Y LA EQUIVALENCIA ENTRE CULTIVARES

En este capítulo se presentó y analizó un conjunto de más de 1,800 artículos científicos organizados en varios metaanálisis, en los que se señala y se sustenta la ausencia de daño a la salud humana y animal por consumir plantas transgénicas y sus productos, así como la equivalencia metabólica, sustantiva y nutricional respecto a las plantas convencionales.

Entre estos artículos, resulta relevante la información del más reciente de la Dra. Ricroch y colaboradores, publicado en 2014. En esta publicación se hace una revisión más extensa y actual de un total de 44 artículos arbitrados por pares, en revistas arbitradas de laboratorios independientes, utilizando nueve diferentes cosechas transgénicas como alimento para diferentes animales, principalmente roedores, por periodos largos de 90 días, conforme lo mandatan las autoridades de seguridad, en particular la EFSA. También, en este análisis se toman en cuenta 60 opiniones de la EFSA. Lo anterior implica que se cuenta con 104 documentos, incluyendo opiniones de la EFSA, sobre la seguridad alimentaria en roedores alimentados con transgénicos por periodos largos. En este metaanálisis se analizan 27 casos que evalúan la alimentación de ratas con maíz transgénico de diferentes países. El listado de los 104 documentos se incluye como uno de los anexos de este libro.

En este metaanálisis se confirma lo presentado en otros metaanálisis de las revisiones de decenas de artículos publicados en los artícu-

los de Snell y colaboradores, 2012; Ricroch y colaboradores, 2013, y Ricroch, 2013. En todos estos trabajos se señala la ausencia de efectos negativos o dañinos, de significancia biológica o toxicológica, en animales que consumieron alimentos provenientes de plantas transgénicas por periodos largos de 90 días.

También, en algunos de estos artículos se destaca que las plantas transgénicas han sido ampliamente caracterizadas por diferentes grupos, usando las técnicas de las ciencias ómicas. La Dra. Ricroch, en el año 2013 analizó decenas de artículos publicados en revistas arbitradas, y concluye que los cultivares transgénicos son muy parecidos a las plantas parentales; que no existen diferencias importantes o cambios relevantes entre las miles de moléculas que integran los metabolismos de dichas plantas, medidas por estos métodos, y que son, por lo tanto, metabólica, composicional y sustancialmente equivalentes. Lo anterior es congruente y sustenta la ausencia de daño por el consumo de plantas transgénicas, también sustenta que no hay efectos no planeados inesperados del análisis por ciencias ómicas de las plantas transgénicas, comparativamente con los cultivos parentales.

Como se señaló en el inciso anterior y se remarca por su importancia en las conclusiones, en la etapa final de la preparación de este libro salió publicado un reporte de Mesnage y colaboradores, 2016, donde uno de los coautores es Séralini. Este trabajo se realizó en el mismo evento de maíz NK603 con el cual algunos de los autores del artículo publicaron previamente, en el año 2012, que su consumo causa daño a la salud. En este nuevo reporte los autores

señalan que el proceso de transformación genética causa alteraciones que hacen dudar que la variedad transgénica sea sustancialmente equivalente a la línea parental que le dio origen. Los autores reportan pequeñas diferencias en algunos niveles de los metabolitos celulares. Lo sorprendente es que las diferencias sean tan pequeñas. Se remarca que el trabajo de la Dra. Ricroch, 2013, presenta la caracterización de decenas de variedades transgénicas mediante ciencias ómicas, encontrando pequeñas diferencias y, por ello, semejanza metabólica. Por lo anterior, este trabajo de Mesnage, Séralini y colaboradores del año 2016, más que alertar, como intentan los autores, sobre alarmantes cambios en un producto transgénico, debe considerarse una evidencia adicional a las decenas de artículos analizados por la Dra. Ricroch, en la cual se demuestra que las variedades transgénicas son sustancialmente equivalentes a las variedades tradicionales. Los trabajos de Herman y Price, 2013, y de Herman y colaboradores, 2017, sobre equivalencia composicional también sustentan las conclusiones que respaldan que los cultivos transgénicos son sustancialmente equivalentes.

En congruencia con la ausencia de daño de los transgénicos como alimentos, se revisó el artículo de Panchin y Tuzhikov del año 2016, incluido en el reporte de las NASEM, 2016, que analiza con detalle siete artículos publicados que señalan los supuestos efectos negativos por el consumo de OGM, entre estos artículos, los de Séralini y colaboradores, de los años 2012 y 2014, en los que se indica que el alimento transgénico causa cáncer. Panchin y Tuzhikov insisten en que después de llevar a cabo un

análisis estadístico más adecuado de los datos reportados en estos siete artículos (Bonferroni correction), no se sostienen las conclusiones sobre el efecto negativo de los OGM reportados en estos artículos. Es importante recalcar que el reporte de las tres academias NASEM, 2016, sobre las plantas transgénicas, analiza a detalle la información relacionada con posibles efectos cancerígenos en humanos por el consumo de transgénicos, incluyendo los trabajos ampliamente descalificados de Séralini y su grupo, de los años 2012 y 2014. Y, como ya se señaló, las conclusiones del comité señalan no haber encontrado ningún posible daño por el consumo de plantas transgénicas y sus productos como alimento. Por ello, hasta la fecha no existe ningún sustento científico contundente que avale que el ingerir alimentos transgénicos pueda causar daño y, en particular, cáncer en los humanos o animales que los consuman.

En materia de salud animal, el importante estudio de Van Eenennamm y Young, 2014, muestra que en el periodo de 2000 a 2010 se alimentó a más de mil millones de animales de todo tipo, con maíz y soya transgénicos. El trabajo concluye que no se presentó ningún problema de salud en estos animales, ni se vio afectada su productividad. En este sentido, cabe remarcar e insistir que después de 20 años del uso y consumo masivo de alimentos y productos derivados de cultivos transgénicos por cientos de millones de humanos y animales en muchos países y en diferentes continentes, incluyendo México, a la fecha no existe ningún reporte de algún hospital o agencia de medicina humana que relacione el consumo de estos alimentos con daños a la salud humana o animal.

Se reitera entonces que la amplia y contundente evidencia científico-técnica, incluyendo los reportes de academias de ciencias y medicina de varios países y la reciente declaración (2016), firmada por 123 premios Nobel, indica que no hay prueba que sustente los supuestos daños a la salud humana o animal por el consumo de alimentos transgénicos o sus productos, sino al contrario, se pueden contar amplios beneficios, incluyendo aspectos justamente relacionados con la salud al dejar de utilizar insecticidas químicos, como se analiza en el siguiente capítulo.

En congruencia con la inocuidad de las plantas transgénicas y sus productos, autoridades y agencias encargadas de la inocuidad y la seguridad alimentaria de varios países —en particular la EFSA de la Unión Europea y la Cofepris de México—, no han retirado los productos transgénicos que se encuentran actualmente en el mercado, aunque algunos de los cultivares transgénicos han sido cuestionados con señalamientos en contra y, por ello, reevaluados, sin cambios en la decisión final para su comercialización y consumo. También se subraya que la EFSA, en el artículo que envía a la revista *Food and Chemical Toxicology* en el año 2012 para que se retractara el artículo de Séralini y colaboradores, concluye lo siguiente con relación al her-

bicida glifosato: “Este estudio no impacta la reevaluación del glifosato”. Como se ha señalado ya, el glifosato se utiliza con las plantas transgénicas para eliminar las malezas, y la EFSA es la responsable de fijar los límites de las concentraciones de los herbicidas que se utilizan en las siembras. Ciertamente, en Europa se aplican concentraciones de herbicidas adecuadas y, por ende, permitidas. Su uso en estas concentraciones autorizadas no debe generar daño. Su abuso en concentraciones más altas o con mayores frecuencias, pudieran tener efectos negativos en la salud. En el capítulo VI se comenta con mayor detalle este tema.

Se concluye y enfatiza que la amplia y contundente información científica y técnica indica que no existe evidencia de daño por el consumo de plantas transgénicas y sus productos, aunque existen publicaciones en contra como las de Séralini y colaboradores, que seguirán apareciendo. Sin embargo, si en algún momento se detectara y demostrara por diferentes grupos de manera independiente, algún daño por el uso, y en particular por el consumo, de alguna planta transgénica, ese transgénico se debería retirar del mercado, como se han retirado ciertos medicamentos por sus efectos secundarios.



Figura IV.11. En 44 reportes en revistas arbitradas, señalados en la revisión de Ricoch y colaboradores, 2014, se muestra que no existe daño por alimentar roedores con diferentes alimentos transgénicos por periodos largos, como lo solicita la EFSA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AFSCA (Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire). 2012. www.favv.be/raadgenvendcomite/verslagenvergaderingen/_documents/2012-10-24_Punt-4_NL_Seralini-studie_RC.pdf
2. AgBioWorld. 2012. Declaration of support of agricultural biotechnology (Declaración de apoyo a

la biotecnología relacionada con la agricultura). www.agbioworld.org/declaration/index.html

3. Académies Nationales d' Agriculture, de Médecine, de Pharmacie, des Sciences, des Technologies et Vétérinaire. 2012. Avis sur la publication récente de G.E. Séralini *et al.* sur la toxicité d' un OGM, 19 october, 2012. www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/avis1012.pdf

4. Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). 2012. Relatif à l'analyse de l'étude de Séralini *et al.* (2012) "Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize". www.anses.fr/sites/default/files/documents/BIOT2012sa0227.pdf
5. Barale-Thomas E. 2013. Letter to the editor. *Food Chem. Toxicol.* 53: 473-474.
6. Batista R. *et al.* 2008. Microarray analyses reveal that plant mutagenesis may induce more transcriptomic changes than transgene insertion. *PNAS* 105(9): 3640-3645.
7. BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). 2012. Feeding study in rats with genetically modified NK603 maize and with a glyphosate containing formulation (Roundup) published by Séralini *et al.* (2012). www.bfr.bund.de/cm/349/feeding-study-in-rats-with-genetically-modified-nk603-maize-and-with-a-glyphosate-containing-formulation-roundup-published-bei-seralini-et-al-2012.pdf
8. CFIA (Canadian Food Inspection Agency). 2012. Statement on the Séralini *et al.* (2012) publication on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603. www.hc-sc.gc.ca/fn-an/gmf-agm/seralini-eng.php
9. CTNBIO (The Brazilian National Technical Commission on Biosafety). 2012. www.conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/comunicacion/prensa/CTNBIO-Brasil-Seralini1725.pdf
10. EFSA (European Food Safety Authority). 2011. Guidance on conducting repeated-dose 90 day oral toxicity study in rodents on whole food/feed. *EFSA J.* 9(12): 2438-2459.
11. EFSA (European Food Safety Authority). 2012a. Final review of the Séralini *et al.* (2012a) publica-
tion on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603 as published online on 19 September 2012 in *Food and Chemical Toxicology*. *EFSA J.* 10(11): 2986. www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf
12. EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO). 2012b. Scientific opinion on a request from the European Commission related to the emergency measure notified by France on genetically modified maize MON 810 according to article 34 of regulation (EC) No.1829/2003. *EFSA J.* 10(5): 2705, 21pp. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2012.2705/epdf>
13. EFSA (European Food Safety Authority). 2014. Statement on a request from the European Commission related to the emergency measure notified by France under article 34 of regulation (EC) 1829/2003 to prohibit the cultivation of genetically modified maize MON 810. *EFSA J.* 12(8): 3809, 18pp. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2014.3809/epdf>
14. Escenario Base 09-18. Proyecciones para el sector agropecuario. 2009. Sagarpa, Ciudad de México. www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Escenariobase09.pdf
15. ESTP (European Society of Toxicologic Pathology). 2013. Serious inadequacies regarding the pathology data presented in the paper by Séralini *et al.* (2012). *Food Chem. Toxicol.* 53: 465-466. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.043>
16. European Commission-Fact Sheet. 2015. Questions and answers on EU's policies on GMOs. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-4778_en.htm
17. FDA (U.S. Food and Drug Administration). 2013. Biotechnology Consultation Note to the File BNF No.000133. <http://cera-gmc.org/files/cera/Gm>

- CropDatabase/decdocs/DAS444066/DAS444066_soybean_US_food_feed.pdf
18. FDA (U.S. Food and Drug Administration). 2015. Biotechnology Consultation Note to the File BNF No.000141. www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/geplants/submissions/ucm436173.htm
 19. Fratamico P. 2008. The application of “omics” technology for food safety and research. *Food-born Patho. Dis.* 5: 369–370.
 20. FSANZ (Food Standards Australia New Zealand). 2012. Response to Séralini paper on the long-term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. www.foodstandards.gov.au/consumer/gmfood/Seralini/Pages/default.aspx
 21. HCB (Haut Conseil des Biotechnologies). 2012. Le Haut Conseil des Biotechnologies rend son avis sur l'étude publiée par le Professeur Séralini (El Alto Consejo Francés de Biotecnología emite su dictamen sobre el estudio publicado por el profesor Séralini). www.hautconseildesbiotechnologies.fr/sites/www.hautconseildesbiotechnologies.fr/files/file_fields/2015/07/05/cplehcbrendsonavissurletudepublieeparleprSeralini.pdf / [www.hautconseildesbiotechnologies.fr/files/file_fields/2015/06/30/121019etudeSeralinia-vischshcb.pdf](http://www.hautconseildesbiotechnologies.fr/sites/www.hautconseildesbiotechnologies.fr/files/file_fields/2015/06/30/121019etudeSeralinia-vischshcb.pdf).
 22. Healy C. *et al.* 2008. Results of a 13-week safety assurance study with rats fed grain from corn rootworm-protected, glyphosate-tolerant MON 88017 corn. *Food and Chem. Toxicol.* 46: 2517–2524
 23. Herman R.A., Price W.D. 2013. Unintended compositional changes in Genetically Modified (GM) crops: 20 years of research *J. Agric. Food Chem.* 61(48): 11695–11701.
 24. Herman R.A. *et al.* 2017. Stacking transgenic event DAS-01507-1 alters maize composition less than traditional breeding. *Plant Biotechnology Journal.* 1-9. DOI: 10.1111/pbi.12713
 25. Laureates Letter Supporting Precision Agriculture (Declaración de premios Nobel a favor de la agricultura de precisión). 2016. http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html
 26. Liu P. *et al.* 2012. A 90-day subchronic feeding study of genetically modified maize expressing Cry1Ac-M protein in Sprague-Dawley rats. *Food and Chemical Toxicology* 50 (9): 3215–3221.
 27. Mesnage R. *et al.* 2016. An integrated multi-omics analysis of the NK603 Roundup-tolerant GM maize reveals metabolism disturbances caused by the transformation process. *Sci. Rep.* 6: 37855. DOI: 10.1038/srep37855.
 28. NASEM (National Academies of Science, Engineering, and Medicine). 2016. Genetically engineered crops: experiences and prospects (Cultivares desarrollados por ingeniería genética: experiencias y prospectivas). The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/23395>
 29. Nicolia A. *et al.* 2014. An overview of the last 10 years of genetically engineered crop safety research. *Crit. Rev. Biotechnol.* 34(1): 77–88. <http://dx.doi.org/10.3109/07388551.2013.823595>
 30. Panchin A.Y. 2013. Toxicity of roundup-tolerant genetically modified maize is not supported by statistical tests. *Food Chem. Toxicol* 53: 475.
 31. Panchin A.Y., Tuzhikov A.I., 2016. Published GMO studies find no evidence of harm when corrected for multiple comparisons. *Crit. Rev. Biotechnol.*, 1–5. DOI: 10.3109/07388551.2015.1130684.
 32. Panorama Agroalimentario. 2015. Maíz 2015. FIRA, Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial, Ciudad de México. www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf
 33. Ricroch A.E. *et al.* 2011. Evaluation of genetically engineered crops, using transcriptomic, proteomic, and metabolomic profiling techniques. *Plant Physiology* 155: 1752–1761.
 34. Ricroch A.E. 2013. Assessment of GE food safety using “-omics” techniques and long-term animal feeding studies. *New Biotechnology* 30(4): 349–354.
 35. Ricroch A.E. *et al.* 2013. Long-term and multi-generational animal feeding studies. En: *Animal nutrition with transgenic plants.* G Flachowsky (Ed.). Oxfordshire, UK CABI Biotechnology Series, 112–127.
 36. Ricroch A.E. *et al.* 2014. Looking back at safety assessment of GM food/feed: an exhaustive review of 90-day animal feeding studies. *Int. J. Biotechnol.* 13(4): 230–256.
 37. Schorsch F. 2013. Serious inadequacies regarding the pathology data presented in the paper by Séralini *et al.* (2012). *Food Chem. Toxicol.* 53: 465–466.
 38. Séralini G.E. *et al.* 2012. Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Food Chem. Toxicol.* 50(11): 4221–4231.
 39. Séralini G.E. *et al.* 2014a. Republished study: long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Environmental Sciences Europe* 26: 14.
 40. Séralini G.E. *et al.* 2014b. Retraction notice to “Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize [*Food Chem. Toxicol.* 50 (2012): 4221–4231]. *Food Chem. Toxicol.* 63, 244.
 41. Séralini G.E. 2014c. Presentation to the National Academies of Sciences. Committee on Genetically Engineered Crops. Past experiences and future prospects. September, 2016, USA.
 42. Snell C. *et al.* 2012. Assessment of the health impact of GM plant diets in long-term and multi-generational animal feeding trials: a literature review. *Food Chem. Toxicol.* 50(3-4): 1134–1148.
 43. Solleiro J.L., Castañón R. 2013. Introducción al ambiente del maíz transgénico. Análisis de ocho casos en Iberoamérica. México: Agrobio México y CambioTec.
 44. Tribe D. 2013. Letter to the editor. *Food Chem. Toxicol* 53, 467–472.
 45. Van Eenennaam A.L., Young A.E. 2014. Prevalence and impacts of genetically engineered feedstuffs on livestock populations. *J. Anim. Sci.* 92(10): 4255–4278.



CAPÍTULO V

EFFECTOS BENÉFICOS EN LA AGRICULTURA, EL MEDIO AMBIENTE, LA BIODIVERSIDAD Y LA SALUD POR EL USO DE PLANTAS TRANSGÉNICAS, TAMBIÉN VENTAJAS ECONÓMICAS

INTRODUCCIÓN

Como ya se señaló, los cultivos transgénicos que cuentan con sus propios insecticidas biológicos fueron diseñados para contender con las plagas de insectos, y así reducir el uso de insecticidas químicos sintéticos que en muchas áreas se siguen utilizando para eliminar las plagas de insectos (ver figuras V.1, V.II y V.III). El propósito de las plantas transgénicas se ha logrado y además se han obtenido beneficios adicionales, tanto económicos como en materia de salud humana y animal, ya que algunos insecticidas químicos causan cáncer, o incrementan el riesgo de generarlo, y contaminan el medio ambiente. Asimismo, la reducción en el uso de insecticidas presenta claras ventajas adicionales para los insectos y otros artrópodos que no son plaga y que viven en los campos de cultivo sin causar daño a las

plantas cultivadas. La reducción en el uso de productos químicos en el campo incide directamente en la disminución de contaminantes ambientales. Además, como ya se ha señalado y se presenta más ampliamente en el capítulo VIII, existe una nueva alternativa tecnológica extraordinaria que permite también reducir el uso de herbicidas químicos que se requieren para matar las malezas que crecen con los cultivos, ya que todos los agroquímicos pueden tener efectos en la salud si se abusa de ellos. Una vez implementada a nivel comercial, los amplios beneficios de esta nueva capacidad serán mucho mayores. Es un hecho que los agricultores de distintos países que están usando cultivos transgénicos, están adoptando esta tecnología por los amplios beneficios que les aporta. A continuación se presenta una serie de consideraciones sobre las amplias ventajas de las plantas transgénicas lo cual indica que, en

relación al campo, el planeta se mueve hacia el uso cada vez más frecuente e importante de los cultivos transgénicos, y hacia lo que podríamos llamar una bioeconomía sustentada en la biotecnología. Sin embargo, es importante recordar e insistir que todas estas plantas transgénicas están diseñadas y desarrolladas para ser utilizadas de manera responsable y sustentable con la biodiversidad y el medio ambiente. Su fin último es contender con demandas alimentarias y con problemáticas ambientales causadas por otras tecnologías, como el uso indiscriminado de insecticidas químicos sintéticos.

BENEFICIOS PARA AGRICULTORES QUE ESTÁN INTERCAMBIANDO EL USO DE INSECTICIDAS QUÍMICOS POR BIOTECNOLOGÍA

Existen testimonios de productores de diferentes países, en particular de Iberoamérica (incluida España) y Estados Unidos, y datos técnicos sobre los beneficios que implica la drástica reducción en el uso de insecticidas químicos sintéticos, en beneficio de la economía y la salud de los campesinos y el medio ambiente. De hecho, se comentaron los reportes realizados por las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos (NASEM, por sus siglas en inglés) de 2010 y el reciente de 2016, donde se señalan las razones por las cuales los agricultores de ese país están dejando de usar insecticidas químicos sintéticos con diferentes beneficios como resultado, incluyendo los de la salud y el económico.

Existen publicaciones relacionadas con las experiencias y los beneficios de la siembra y

el uso de maíz y otros vegetales transgénicos, como soya y algodón, en países iberoamericanos, integradas en el libro *Introducción al ambiente de maíz transgénico. Análisis de ocho casos en Iberoamérica*, de Solleiro y Castañón, 2013, en el cual se presentan los datos sobre la liberación al ambiente de maíz y otros cultivares transgénicos en ocho países de Iberoamérica —Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Honduras, Uruguay, México y España. Por otro lado, existen documentos previos sobre beneficios por el uso de los cultivares transgénicos en Argentina. Los resultados indican que no hay evidencia de daño o contaminación por maíz transgénico, sino de coexistencia con los maíces convencionales. En los capítulos IV y VI se detallan los elementos y las consideraciones en relación con la ausencia de daño. Sin embargo, se insiste que no hay datos que sugieran daño por la coexistencia entre cultivares transgénicos y convencionales. La existencia conjunta o coexistencia no implica per se algún daño. Incluso, como ya se ha señalado, muchos agricultores en estos países y en otros, están adoptando los cultivos transgénicos por los múltiples beneficios que conllevan. En el caso de México, la experiencia de la siembra de maíz transgénico se ha detenido por la demanda colectiva presentada ante el Poder Judicial para impedir y bloquear la siembra de este tipo de cultivo, aunque hasta el año 2012 se habían registrado más de 100 autorizaciones de siembra de vegetales transgénicos, entre ellos maíz, tema que se presenta con todo detalle en el capítulo VI.

También existen otros trabajos recientes de varios grupos y lugares que indican los benefi-

cios de los cultivos transgénicos. Por ejemplo, una publicación del Instituto Flamenco de Biotecnología de Bélgica (VIB), del año 2014, presenta un estudio sobre cómo la producción del algodón transgénico en India ha aumentado de manera significativa, pasando de ser un país importador a uno exportador de fibra de calidad, con claros beneficios para los agricultores que la siembran. Otra publicación reciente del VIB, 2016, indica las ventajas del uso de plantas transgénicas. En congruencia con lo anterior y en general con los puntos que se presentan en este capítulo, el uso de insecticidas químicos sintéticos en India ha disminuido de manera dramática en los últimos cinco años. Asimismo, en la publicación del VIB, 2014, se comentan las declaraciones de la activista Vantana Shiva, no sólo patéticas sino muchas de ellas falsas, en contra de la siembra de algodón transgénico en India. Estos señalamientos adversos se presentan con más detalle en el capítulo VI.

En este contexto es relevante señalar que en el reporte de las NASEM, 2016, en la sección relacionada con los efectos de exposición de campesinos a insecticidas y herbicidas, se señala que existe evidencia de que el algodón transgénico, en países en desarrollo, está asociado con la reducción del envenenamiento por insecticidas, reportado por Dev y Rao, 2007, y por Qaim y Kouser, 2013. De hecho, existen varios estudios donde se analizan los efectos sobre la salud de distintos insecticidas químicos y los resultados indican daño, incluyendo cáncer, tal y como se señala en las publicaciones de Cabello y colaboradores, 2001, McDuffie y colaboradores, 2001, Band y colaboradores, 2011, Koutros y colaboradores, 2013, Alavanja

y colaboradores, 2014, y Jones y colaboradores, 2014.

Un comentario importante en esta sección del documento es que la exposición al herbicida químico glifosato, como lo muestran los artículos de De Ross y colaboradores, 2005, Mink y colaboradores, 2011, y Mink y colaboradores, 2012, aparentemente no incrementa el riesgo a desarrollar cáncer u otras enfermedades. En este sentido, el reciente reporte de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, 2016) señala que el glifosato, cuando se usa en concentraciones adecuadas, no representa ningún problema para la salud. En el capítulo VI se incluyen consideraciones adicionales sobre el glifosato.

No obstante, es importante señalar que el abuso o el uso irresponsable, muchas veces por desconocimiento, de toda tecnología, incluyendo las biológicas, puede generar problemas. Más puntualmente: los bioinsecticidas tipo CryA y el herbicida químico glifosato, han desarrollado resistencia en insectos y en hierbas, respectivamente, y su consecuente abuso pudiera incrementar el riesgo de daños a la salud, como la mayoría de los agroquímicos. Hay que insistir en que el desarrollo de las resistencias es resultado de mecanismos naturales con los que cuentan los organismos vivos para contender con determinados problemas y que se presentan en la naturaleza por el abuso de una tecnología. Por ello, es necesario un uso responsable de la tecnología, para así poder contender con las resistencias y evitar a tiempo los abusos de sustancias tóxicas (herbicidas e insecticidas químicos entre otros), lo cual también ocurre con el uso irresponsable y

el abuso de los antibióticos para contender con patógenos de humanos y animales. Además, el uso irresponsable de las tecnologías, los agroquímicos, y en particular la utilización de herbicidas en cantidades y frecuencias superiores a las autorizadas, puede generar no sólo resistencia, sino también problemas a la salud. Aquí es importante señalar que las empresas que introducen este tipo de tecnologías, en conjunto con las autoridades locales y federales de cada país, deben emitir recomendaciones y reglamentos para hacer un uso responsable de la tecnología y evitar así que sus beneficios se vean disminuidos por un uso inadecuado e irresponsable de la misma. Además, en países que son centros de origen, como México, el uso de los cultivos transgénicos debe darse buscando conservar la biodiversidad regional. En los capítulos VI y X se comenta el caso de nuestro país y se señala cómo la Ley de Bioseguridad define zonas libres de transgénicos en los centros de origen. En el capítulo VI también se analiza bajo otro enfoque, en particular el del rechazo a los productos transgénicos, la situación en diferentes países, incluyendo México.

Vale la pena reiterar aquí que la reducción en el uso de insecticidas químicos sintéticos implica múltiples beneficios para los campesinos que lo están llevando a cabo: en la salud, en lo económico y en lo social por el hecho de tener una mejor calidad de vida, con mayores recursos económicos, con una mejor salud y un medio ambiente menos contaminado, y por ende con beneficio social por la suma de los elementos anteriores. Se subraya que la reducción en el uso de los insecticidas químicos ha tenido también importantes beneficios para

el medio ambiente y la biodiversidad ya que muchos de estos compuestos no son biodegradables, contaminan, son recalcitrantes, tienen efectos indeseados en los insectos que no son plagas; además, el uso de los cultivos transgénicos ha permitido, de manera indirecta, una reducción en los gases de efecto invernadero. Por otro lado, estos cultivos han incrementado la productividad y las ganancias de los campesinos que han decidido utilizarlas, como señala el reporte sobre plantas transgénicas de las NASEM, 2016, y varios de los metaanálisis que se comentan a continuación, aunque estrictamente hablando, las plantas transgénicas de primera y de segunda generación no fueron diseñadas para incrementar la productividad de las cosechas, pero el hecho de dejar de comprar y de usar insecticidas químicos sintéticos, se tradujo en una mayor productividad para los usuarios.

Es importante remarcar que, por sus múltiples efectos contaminantes y dañinos, la reducción en el uso de insecticidas químicos en el campo era, y sigue siendo, el propósito primario de la creación de plantas transgénicas de primera generación, además de contender con las plagas de insectos. Estos objetivos, como se ha señalado, se han logrado contundentemente, sin dejar de lado los amplios beneficios adicionales obtenidos por los usuarios y el medio ambiente, como se observa en los metaanálisis que se presentan a continuación.

Cabe insistir en que las plantas transgénicas que se usan en el campo representan una tecnología perfeccionada, llamada por el grupo de premios Nobel en su declaración del año 2016 “agricultura de precisión”, refirién-

dose a una tecnología superior, más avanzada por lo preciso, y con grandes beneficios señalados en este capítulo. Esta tecnología ha permitido reducir los tiempos y la incertidumbre en la creación de nuevos cultivares con ventajas que se ven reflejadas en beneficios para la sustentabilidad del medio ambiente y de la sociedad.

Cabello et al., 2001; McDuffie et al., 2001; De Ross et al., 2005; Trigo y Cap, 2006; Dev y Rao, 2007; NASEM, 2010: <https://doi.org/10.17226/12804>; Mink et al., 2011; Band et al., 2011; Mink et al., 2012; Qaim y Kouser, 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Koutros et al., 2013; Alavanja et al., 2014; Jones et al., 2014; EFSA, 2016: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2016.4468/epdf>; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; Laureates Letter

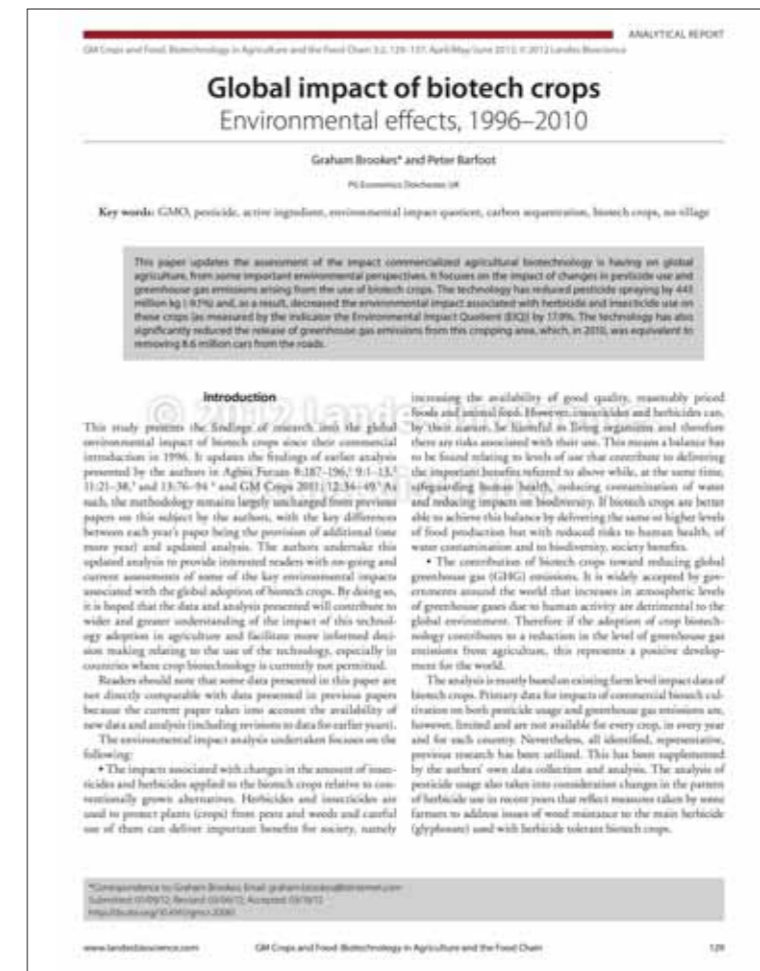


Figura V.1. Carátula del artículo de Brookes y Barfoot, 2012: “Global impact of biotech crops: environmental effects, 1996–2010” (Impacto global de las cosechas producidas por biotecnología: efectos en el medio ambiente, 1996–2010),

GM Crops and Food. Biotechnology in Agriculture and the Food Chain 3(2), 129–137.

Este artículo es de libre acceso y no se requiere permiso especial para incluir su carátula.

This is an open-access article licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial

3.0 Unported License.

Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html; reporte técnico de la Fundación Antama, 2016

BENEFICIOS AMBIENTALES, ECONÓMICOS Y SOCIALES POR LA REDUCCIÓN DE INSECTICIDAS QUÍMICOS SINTÉTICOS

En esta sección se comparten tres reportes elaborados en Europa y Estados Unidos que incluyen metaanálisis sobre los beneficios económicos y sociales de los cultivos transgénicos debido a la reducción —y potencial interrupción— en el uso de insecticidas químicos sintéticos, así como el impacto sobre el medio ambiente. A continuación se presentan los datos que sustentan dichas propuestas (2011–2014).

- Un primer reporte presenta un metaanálisis sobre el impacto global de las cosechas producidas por organismos transgénicos en el periodo 2006–2010, publicado por Brookes y Barfoot, 2012.

Este estudio (ver figura V.1) señala, soporta y detalla con datos, lo que se comentó anteriormente: la importante reducción en el uso de insecticidas químicos sintéticos. En particular, se ha reducido la cantidad de pesticida aplicado vía fumigación en 443 millones de kilogramos. Asimismo, la disminución en los gases de efecto invernadero en las áreas de cultivo, en el año 2010 fue equivalente a remover ocho millones de automóviles.

- Un segundo reporte presenta un metaanálisis del impacto económico de cosechas de OGM.

Este metaanálisis, basado en 147 estudios a nivel mundial y realizado por investigadores de la Universidad de Goettingen, Alemania (ver figura V.2), revela que, en promedio, la adopción de esta biotecnología ha reducido en 37% el uso de pesticidas químicos, ha incrementado la productividad de las cosechas en 22%, y ha incrementado las ganancias de los agricultores en 68 por ciento.

El reporte también brinda evidencia robusta de los beneficios de las cosechas de OGM para los agricultores que han utilizado los cultivos transgénicos, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo.

- Un tercer reporte presenta un metaanálisis sobre el impacto y los beneficios económicos de los cultivos transgénicos.

El trabajo de Brookes y Barfoot, publicado en la página web de PG Economics, analiza estos impactos a nivel global desde 2005 y publica sus resultados en diversas revistas. En la revisión más reciente, publicada en el año 2014, muestran que de 1996 a 2012 ha habido un beneficio neto para los agricultores de 18.8 mil millones de dólares para 2012, y un total acumulado durante los 17 años de uso comercial de la tecnología de 116.6 mil millones de dólares (ver figura V.3), lo que muestra que, si bien las empresas productoras de semillas transgénicas han tenido un beneficio económico importante, los más beneficiados por la tecnología, hasta la fecha, han sido los agricultores que la utilizan”.

Brookes y Barfoot, 2012; Brookes y Barfoot, 2014; Klümper y Qaim, 2014

BENEFICIOS ADICIONALES PARA LA BIODIVERSIDAD POR LA REDUCCIÓN EN EL USO DE INSECTICIDAS QUÍMICOS SINTÉTICOS

En esta sección se presentan evidencias de los beneficios ambientales por la reducción en el uso de insecticidas químicos sintéticos. En

particular, beneficios para insectos que no son plagas y que pueden ser benéficos, como los polinizadores, entre ellos: las abejas.

Al utilizar plantas con genes que les proporcionan una defensa biológica contra las plagas, ya no se devasta de manera indiscriminada la diversidad de insectos y otros organis-



Figura V.2. Carátula de la publicación de Klümper y Qaim, 2014: “A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops” (Un metaanálisis de los impactos de las cosechas genéticamente modificadas), *Plos One* 9(11): e111629.

Este artículo publicado en Plos One es de acceso libre “CC-BY” y no se requiere permiso especial para reproducir esta carátula.

Open-access article published by Plos One license “CC-BY”.

mos benéficos que existen en las milpas y en los sembradíos que son destruidos de manera indiscriminada por la fumigación con insecticidas químicos, por ser inespecíficos, una práctica común en la agricultura convencional.

Esto ha sido documentado extensamente en un artículo de Marvier y colaboradores, 2007 (ver fi-

gura V.4), en el que se presenta un metaanálisis que recopila más de 40 estudios de campo sobre los efectos en la diversidad de invertebrados en cultivos de algodón y maíz transgénicos, en comparación con otros sistemas agrícolas. Allí se muestra que existe mayor diversidad de artrópodos en cultivos GM que en cultivos de agricultura convencional.



Figura V.3. Carátula de la publicación de Brookes y Barfoot, 2014: “Economic impact of GM crops. The global income and production effects, 1996–2012” (Impacto económico de las cosechas genéticamente modificadas: ingreso global y efectos en la producción en el periodo 1996–2012), *GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 5(3), 65-75.

Este artículo es de acceso libre y no se requiere permiso especial para incluir esta carátula.

This is an open-access article licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

AUSENCIA DE DAÑO EN ABEJAS POR EL USO DE LAS PROTEÍNAS TRANSGÉNICAS UTILIZADAS PARA ELIMINAR PLAGAS DE INSECTOS

Se cuenta con un reporte donde se revisa un metaanálisis de 25 estudios que evaluaron de manera independiente los efectos de las pro-

teínas Cry de Bt en abejas (ver figura V.5). Los autores Duan y colaboradores, 2007, concluyen que:

“Nuestros resultados muestran que las proteínas Cry utilizadas en cultivos GM comercializados para el control de lepi-

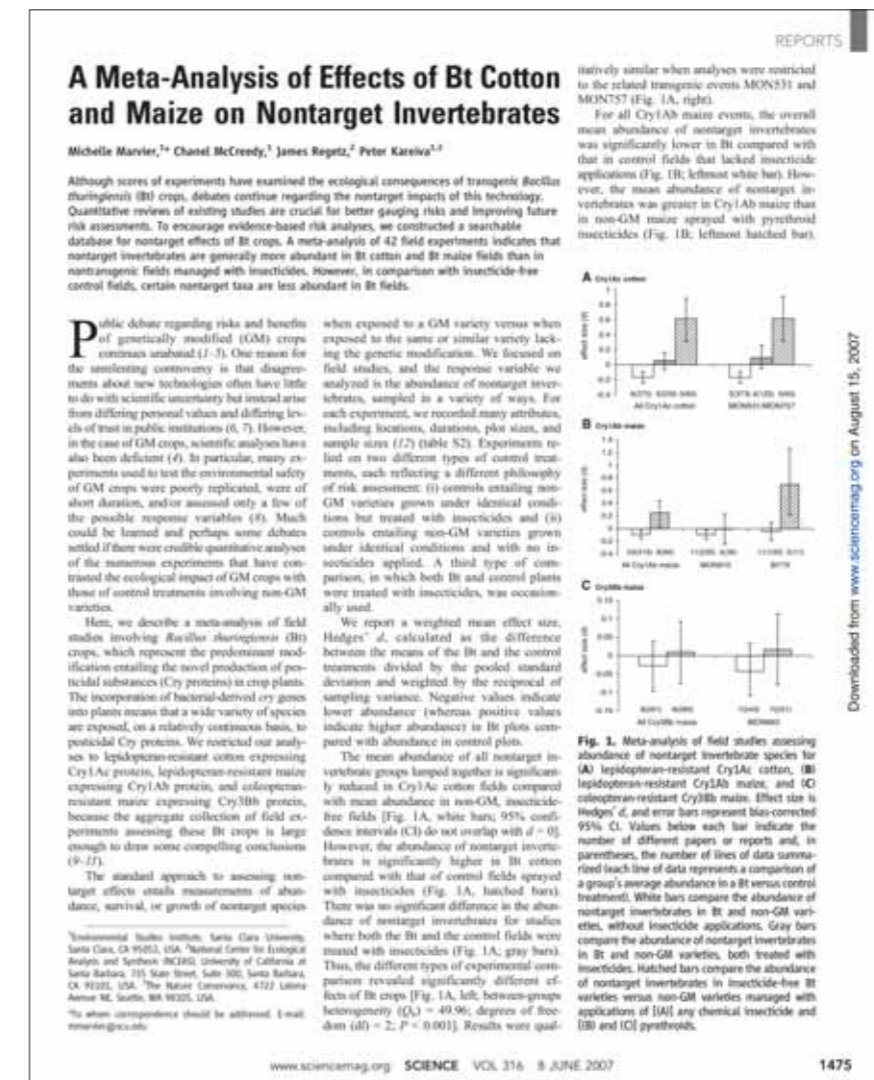


Figura V.4. Carátula de la publicación de Marvier y colaboradores, 2007: “A meta-analysis of effects of Bt cotton and maize on non target invertebrates” (Un metaanálisis de los efectos del algodón y el maíz Bt en invertebrados que no son el objetivo), *Science* 316: 5830, 1475–1477.

Se agradece a AAAS/ Science el permiso para reproducir esta carátula. Licencia No. OP-00090582.

Permission granted by AAAS/Science. License number OP-00090582.

dópteros y coleópteros, no afectan negativamente la sobrevivencia de larvas o adultos de abejas en condiciones de laboratorio”. Este estudio muestra, contrario a los que se ha afirmado por algunos grupos ecologistas, que los cultivos Bt (plantas

transgénicas que llevan el gene de resistencia a insectos de *Bacillus thuringiensis*), no afectan a las abejas ni su producción de miel.

Marvier, 2007; Duan et al., 2008



Figura V.5. Carátula de la publicación de Duan y colaboradores, 2008: “A meta-analysis of effects of Bt crops on honey bees (*Hymenoptera apidae*)” [Un metaanálisis de los efectos del algodón Bt en abejas productoras de miel (*Hymenoptera apidae*)]. *Plos One* 3(1): e1415.

Este artículo publicado en Plos One es de acceso libre “CC-BY” y no se requiere permiso especial para reproducir esta carátula.

Open-access article published by Plos One license “CC-BY”.



Figura V.6. Indudablemente debe reducirse la exposición a insecticidas químicos, muchos de los cuales generan problemas a la salud y algunos pueden tener efectos carcinogénicos.

BENEFICIOS ADICIONALES A LA SALUD HUMANA POR EL CONSUMO DE PLANTAS TRANSGÉNICAS

Como se ha señalado ya, existe evidencia científica y técnica del daño a la salud humana por el uso de insecticidas químicos sintéticos; algunos generan cáncer o incrementan el riesgo de generarlo, y varios de ellos son recalcitrantes (ver figura V.6). Éste es un problema cada vez más grave que se debe atender reduciendo el uso de insecticidas químicos que se emplean de manera indiscriminada para eliminar plagas de insectos en los cultivos convencionales, y que además contaminan en mayor o menor medida los suelos y los mantos freáticos.

Cabello, 2001; McDuffie, 2001; Band et al., 2011; Koutros et al., 2013; Jones et al., 2014; Alavanja et al., 2014; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>

Por otro lado, una investigación publicada por Abbas y colaboradores, 2013, reporta que el uso de cultivos transgénicos de maíz reduce los daños causados por algunos insectos plaga, debido a la disminución de hongos que producen micotoxinas, algunas muy dañinas y posibles carcinogénicas, como las aflatoxinas. La razón de la reducción en la colonización de hongos en granos transgénicos es que los insectos ya no muerden los granos GM y, por ello, no se presenta el daño en su cubierta, necesario



Figura V.7. Uno de los beneficios de reducir el uso de insecticidas químicos es que, de esta manera, no se eliminan insectos benéficos para los cultivos, entre ellos, los polinizadores como las abejas. Las plantas transgénicas no matan a estos insectos, a diferencia de los insecticidas químicos que son inespecíficos y matan todo tipo de insectos.

para que el hongo se instale en el grano. Los autores señalan y reconocen que el desarrollo de variedades transgénicas resistentes a insectos representa una herramienta importante para la disminución de micotoxinas en granos para alimentación humana y animal. Este asunto es-

ta ya reportado previamente por Hammond desde el año 2002.

Hammond, 2002; Cabello et al., 2001; McDuffie et al., 2001; Band et al., 2011; Abbas et al., 2013; Jones et al., 2014; Alavanja et al., 2014

CONCLUSIONES SOBRE LOS AMPLIOS BENEFICIOS DE UTILIZAR PLANTAS TRANSGÉNICAS

En este capítulo se señalaron y comentaron las evidencias que sustentan los amplios y variados beneficios para los usuarios de las plantas transgénicas. El dejar de comprar y de utilizar insecticidas químicos representa ventajas económicas contundentes, pero también existen ventajas adicionales muy importantes que se desprenden del uso de cultivos transgénicos y sus productos: para la salud humana y de los animales, además de los efectos benéficos para la biodiversidad (reflejados en la diversidad de insectos) y para el medio ambiente (al dejar de fumigar). Adicionalmente, se cuenta con beneficios sociales por la suma de todas estas ventajas, incluyendo un mejor desarrollo individual y colectivo. Aquí se analizaron publicaciones científico-técnicas y reportes presentados en varios metaanálisis que señalan que los cultivos transgénicos han contribuido de manera importante a la reducción de insecticidas químicos sintéticos. Como ya se ha subrayado, éste fue el principal propósito de la construcción de plantas transgénicas resistentes a las plagas de insectos: la utilización sustentable de plantas transgénicas que llevan sus propios genes bioinsecticidas.

Lo anterior ha redundado en amplios beneficios, en particular para los agricultores. Tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, entre ellos, varios países iberoamericanos, los cultivos transgénicos les han permitido incrementar la productividad de las cosechas y, por ende, sus ganancias al no tener que comprar insecticidas químicos, por lo que algunos grupos en estas naciones están adop-

tando dicha tecnología. Una precisión sobre las plantas transgénicas de primera y de segunda generación es que no fueron diseñadas para aumentar la productividad de las cosechas, sino para contender con las plagas de insectos, lo cual se ha logrado. Sin embargo, el hecho de que los agricultores están dejando de comprar insecticidas químicos se traduce en una mayor productividad, tal y como lo señalan los reportes técnicos presentados.

Se insiste, también, en que los beneficios son muy importantes para el medio ambiente y la biodiversidad, dada la importante disminución en la utilización de compuestos químicos (insecticidas), muchos de ellos contaminantes, recalcitrantes y algunos dañinos para la salud de humanos, animales y también dañinos para insectos benéficos, como los polinizadores, entre los que se cuentan las abejas. Además, existe una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero. El uso cada vez más frecuente y más extendido de cultivos transgénicos, sin reportes de daños a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad, indica que el planeta se mueve hacia una bioeconomía sustentada en la biotecnología. Sin embargo, es importante insistir en que todas estas plantas transgénicas están diseñadas para contender con diferentes problemas, y deben utilizarse de manera responsable y sustentable en beneficio de la biodiversidad y el medio ambiente, así como para contender con demandas específicas y con la contaminación ocasionada por otras tecnologías, como los insecticidas químicos.

Indudablemente el propósito de la creación de plantas transgénicas de reducir el uso de insecticidas, se ha cumplido con creces y los



Figura V.8. El beneficio más importante de la reducción —y en algunos lugares, la casi desaparición— de insecticidas químicos que se usan para matar plagas de insectos, es para la salud de los campesinos y el medio ambiente. Aunque también existen beneficios económicos al dejar de comprar estos productos y de fumigar con ellos.

beneficios son múltiples. Al lector le preguntamos ¿qué alternativa prefiere?, ¿el uso de insecticidas químicos que dañan de manera irreversible la diversidad de insectos benéficos de los campos agrícolas y cuyos residuos tienen claros efectos dañinos sobre la salud humana y animal y contaminan el medio ambiente?, ¿o el uso de plantas transgénicas que producen su propio bioinsecticida mucho más específico, que no daña a los insectos no blanco y que es inocuo para la salud humana y animal? Además, como se ha señalado en capítulos previos, el maíz y la soya transgénicos se consumen por humanos y animales en muchos países, incluido México, desde hace 20 años, sin reportes sobre daños a la salud. Cada quien lo deberá decidir con base en todos estos señalamientos, pero una de las dos opciones se debe escoger, ya que sería imposible sostener la producción agrícola sin un control efectivo de las plagas de insectos que devastan los cultivos y la biodiversidad en todas y cada una de las regiones productoras de alimentos del mundo. Como se señaló en el capítulo II, y se analizará de nuevo en el VIII, la demanda de alimentos por el crecimiento de la población a nivel mundial será muy importante y un gran reto. Por ello, es necesario avanzar en la utilización responsable de la tecnología transgénica que no contamina y que tiene grandes beneficios, para paliar las demandas y los problemas que el planeta enfrenta.

Finalmente, resulta injusto e inhumano que los campesinos en México no tengan la alternativa de decidir qué tipo de semilla y, por ende, qué tipo de insecticida pueden utilizar, habiendo estas alternativas y sabiendo, además, que el uso de insecticidas químicos causa daño a la salud y que incluso muchos son carcinogénicos. Por ello, y como se señala en los capítulos VI y VIII, es importante que los campesinos en México y los agricultores en general, puedan contar con alternativas que incluyan los cultivos transgénicos como parte de las herramientas para producir alimentos de manera sustentable, ya que las patentes que protegen las plantas transgénicas de primera y de segunda generación están venciendo, y en nuestro país se han desarrollado, como se ha comentado ya, plantas transgénicas de tercera generación para contener con el uso de herbicidas químicos y con el cambio climático.

Todas estas consideraciones y beneficios de las plantas transgénicas y sus productos se señalan contundentemente en el reporte sobre las plantas transgénicas elaborado por las tres academias NASEM de Estados Unidos, 2016, en el libro de Solleiro y Castañón, 2013, *Introducción al ambiente del maíz transgénico: análisis de ocho casos en Iberoamérica*, y en el reporte técnico de la Fundación Antama, 2016, sobre los trabajos del Instituto Flamenco de Biotecnología de Bélgica.

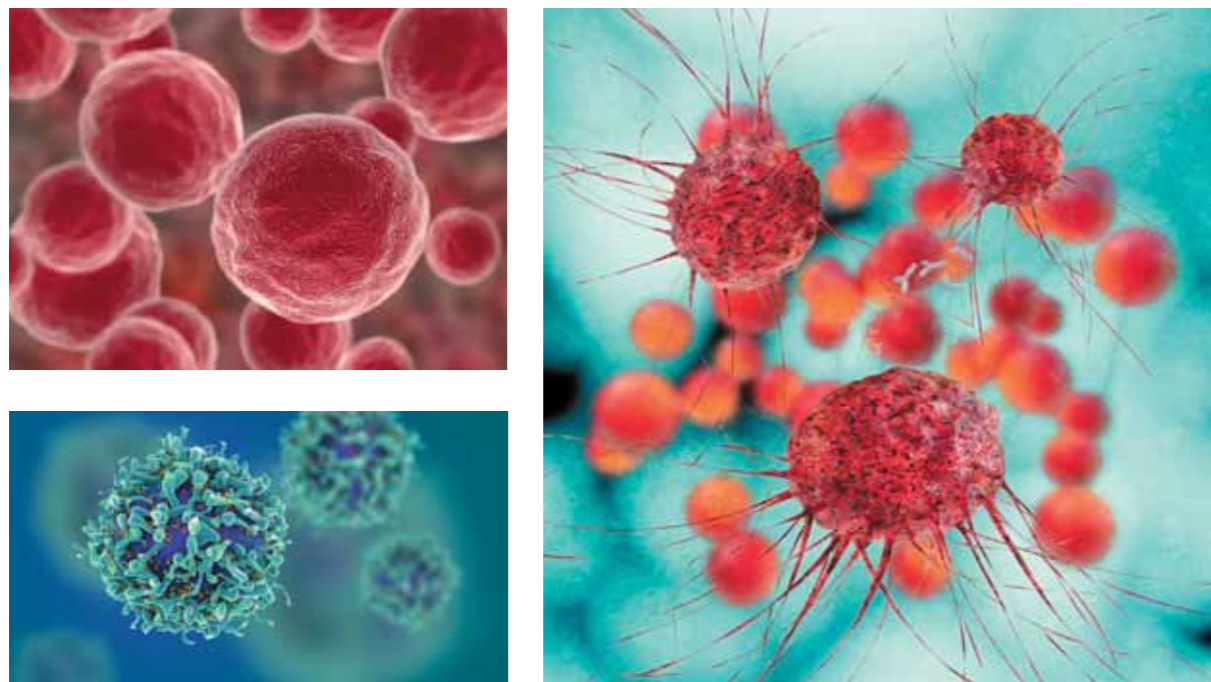


Figura V.9. Muchos de los insecticidas químicos son carcinogénicos. Otro de los beneficios indirectos de la reducción en el uso de insecticidas químicos es que el riesgo de generar esta enfermedad, disminuye.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abbas H.K. *et al.* 2013. Implications of Bt traits on mycotoxin contamination in maize. Overview and recent experimental results in southern United States. *J. Agric. Food. Chem.* 61(48): 11759–11770.
2. Alavanja M.C.R. *et al.* 2014. Non-Hodgkin lymphoma risk and insecticide, fungicide and fumigant use in the agricultural health study. *Plos One* 9(10): e109332.
3. Band P.R. *et al.* 2011. Prostate cancer risk and exposure to pesticides in British Columbia farmers. *Prostate* 71(2): 168–183.
4. Brookes G., Barfoot P. 2012. Global impact of biotech crops: environmental effects, 1996-2010. *GM Crops and Food. Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 3(2): 129–137.
5. Brookes G., Barfoot P. 2014. Economic Impact of GM Crops. The Global income and production effects 1996-2012. *GM Crops and Food. Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 5(3): 65–75.
6. Cabello G. *et al.* 2001. A rat mammary tumor model induced by the organophosphorous pesticides parathion and malathion, possibly through acetylcholinesterase inhibition. *Environ. Health Perspect.* 109(5): 471–479.
7. De Roos A.J. *et al.* 2005. Cancer incidence among glyphosate-exposed pesticide applicators in the Agricultural Health Study. *Environ. Health Perspect.* 113: 49–54.
8. Dev S.M., Rao N.C. 2007. Socio economic impact of Bt Cotton. Monograph No 3. Hyderabad. Centre for Economic and Social Studies (CESS).
9. Duan J.J. *et al.* 2008. A meta-analysis of effects of Bt crops on honey bees (*Hymenoptera apidae*). *PlosOne* 3(1): e1415.
10. EFSA (European Food Safety Authority). 2016. Modification of existing maximum levels of residue levels of glyphosate in borage and corn gromwell seeds. *EFSA J.* 14(4): 4468, 20 pp. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2016.4468/epdf>.
11. Hammond B.G. 2004. Lower fumonisin levels in the grain of Bt corn grown in the United States in 2000-2002. *J. Agric. Food Chem.* 52(5): 1390–1397.
12. Jones R. R. *et al.* 2014. Incidence of solid tumors among pesticide applicators exposed to the organophosphate insecticide diazinon in the agricultural health study: an updated analysis. *Occup. Environ. Med.* 72: 496–503.
13. Klümper W., Qaim M. 2014. A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops *PlosOne* 9(11): e111629. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>
14. Koutros S. *et al.* 2013. Risk of total and aggressive prostate cancer and pesticide use in the agricultural health study. *Am. J. Epidemiol.* 177(1): 59–74.
15. Laureates Letter Supporting Precision Agriculture (Declaración de premios Nobel a favor de la agricultura de precisión). 2016. http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html
16. Marvier M. *et al.* 2007. A meta-analysis of effects of Bt cotton and maize on nontarget invertebrates. *Science* 316(5830): 1475–1477.
17. McDuffie H.H. *et al.* 2001. Non-Hodgkins lymphoma and specific pesticide exposures in men: cross-Canada study of pesticides and health. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 10(11): 1155–1163.
18. Mink P.J. *et al.* 2011. Epidemiologic studies of glyphosate and non-cancer health outcomes: A review. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 61(2): 172–184.
19. Mink P.J. *et al.* 2012. Epidemiologic studies of glyphosate and cancer: A review. *Regulatory-Toxicology and Pharmacology* 63(3): 440–452.
20. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2010. The Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States (El impacto de cosechas desarrolladas por ingeniería genética en la sustentabilidad de las granjas en Estados Unidos de América). Committee on the Impact of Biotechnology on Farm-Level, Economics and Sustainability, Board on Agriculture and Natural Resources, Division on Earth and Life Studies. The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/12804>
21. NASEM (National Academies of Science, Engineering, and Medicine). 2016. Genetically engineered crops: experiences and prospects (Cultivares desarrollados por ingeniería genética: experiencias y prospectivas). The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/23395>
22. Qaim M., Kouser S. 2013. Genetically modified crops and food security. *Plos One* 8(6): e64879. DOI: 10.1371/journal.pone.0064879.
23. Reporte técnico Fundación Antama. 2016. Sobre la publicación del Instituto Flamenco de Biotecnología en Bélgica, acerca de los beneficios de los cultivares transgénicos. <http://www.vib.be/en/about-vib/plant-biotech-news/Pages/default.aspx>
24. Solleiro J.L., Castañón R. 2013. Introducción al ambiente del maíz transgénico. Análisis de ocho casos en Iberoamérica. México: Agrobio México y CambioTec.
25. Trigo E.J., Capp E.J. 2006. The performance of agricultural sector during the period 1996-2006. En: Ten years of genetically modified crops in Argentine agriculture. Argenbio, Argentina.



CAPÍTULO VI

PUBLICACIONES Y CONSIDERACIONES EN CONTRA DE LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS POR SUPUESTOS DAÑOS

- RESPUESTAS Y CONSIDERACIONES QUE SUSTENTAN SU UTILIZACIÓN

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se incluyen y comentan publicaciones, cuestionamientos, señalamientos y acciones en contra del uso de los organismos transgénicos, los cuales están basados en argumentos por supuestos daños. Las publicaciones adversas a los transgénicos cuestionan la necesidad y pertinencia del uso de plantas transgénicas en México, entre otras razones porque nuestro país es centro de origen y diversificación del maíz y de otros cultivos de gran valor comercial a nivel regional y mundial. Numerosas veces se ha argumentado que las compañías transnacionales son dueñas de las semillas transgénicas, que controlan el mercado y que esto atenta contra la soberanía alimentaria de México. Como parte del rechazo y satanización de los organismos genéticamente modificados (OGM) en Mé-

xico, en particular las plantas transgénicas, se han orquestado acciones legales contra la siembra de estos cultivos argumentando daños. Sin embargo, como veremos en este capítulo, esto no tiene sustento científico sólido ni evidencias significativas. Ejemplos de estas acciones se dan a través de amparos ante el poder judicial para impedir la siembra de soya transgénica y a través de una demanda de acción colectiva por el derecho difuso relativa a la siembra comercial de maíz genéticamente modificado. Dicha demanda colectiva ha impedido la siembra experimental (en programa piloto y comercial) de maíz transgénico en México desde 2013. Por su parte, los amparos buscan impedir que se continúe la siembra comercial de soya transgénica, en particular en los estados que conforman la península de Yucatán. A continuación se presentan y analizan publicaciones de algunos

grupos y organizaciones de diferentes países adversas a los transgénicos.

PUBLICACIONES, SEÑALAMIENTOS
Y CUESTIONAMIENTOS EN CONTRA DEL USO
Y CONSUMO DE PLANTAS TRANSGÉNICAS

Entre las publicaciones relativamente recientes en contra del uso de plantas transgénicas y sus productos está el libro *El maíz en peligro ante los transgénicos: un análisis integral en el caso de México*, editado por Álvarez Buylla y colaboradores en 2013.

Este libro señala que “no se tiene problema con la biotecnología... sino con la privatización de las semillas”, con lo cual estamos de acuerdo. Sin embargo, a lo largo de varios capítulos, hace referencia a publicaciones principalmente de la década de 1990 que especulan sobre los posibles efectos adversos por el uso de cultivos transgénicos e ignora referencias recientes sobre su inocuidad. Como se ha mostrado a lo largo del capítulo V, existe una amplia y contundente evidencia científica y técnica de los beneficios del uso de estos cultivos para la salud, el medio ambiente y la biodiversidad, así como beneficios económicos que se han documentado extensamente en más de 28 países, incluyendo varios de Iberoamérica (ISAAA, 2015, 2016).

También coincidimos con el señalamiento de que la primera generación de plantas transgénicas no está diseñada, *per se*, para incrementar la productividad: la mayoría de los cultivos transgénicos se han diseñado con características para reducir la competencia con malezas, para prevenir el daño por el ataque de insectos

plaga o con ambos propósitos. Sin embargo, como se comenta más adelante y en el capítulo V, estas aplicaciones disminuyen las pérdidas causadas por plagas de insectos y malezas, lo cual se refleja en un mayor rendimiento por hectárea, un menor costo de insumos y, por lo tanto, un mayor ingreso económico para los agricultores. Aún más importante que el beneficio económico para los agricultores es que se obtiene un menor daño al medio ambiente y a la biodiversidad, gracias a la reducción en el uso de insecticidas químicos sintéticos, y también gracias a la disminución en el uso de algunos herbicidas que son altamente dañinos a la salud humana y animal.

El libro de Álvarez Buylla y colaboradores, 2013, presenta una visión limitada, parcial y obsoleta respecto a los efectos adversos de los cultivos transgénicos, ya que sus argumentos —basados en especulaciones y bibliografía de finales del siglo pasado y principios de éste— contrastan con numerosas evidencias recientes que documentan los amplios beneficios de los cultivos transgénicos. Adicionalmente, el incremento en la adopción de estos desarrollos biotecnológicos, tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo, es un indicador que apunta a una percepción favorable por parte de los agricultores a los que se les ha dado la posibilidad de elegir entre diversas opciones tecnológicas, dentro de los respectivos marcos regulatorios.

El libro señala también que el consumo de maíz transgénico causa cáncer: afirmación que se sustenta en un conjunto muy reducido de artículos cuyos resultados carecen de rigor científico. Aun en los casos en los que existe

evidencia de que la ingesta de cualquier producto puede ocasionar daño a la salud (como el caso del consumo de carne), siempre se hace en términos estadísticos para advertir acerca del riesgo. Así, es usual indicar el número de veces que el riesgo de contraer una enfermedad aumenta por el consumo de determinada cantidad de producto al día. Éste no es el caso del libro de Álvarez Buylla y otras publicaciones. Resalta entre las publicaciones en este libro la de Séralini y colaboradores, 2012, comentada con amplitud en el capítulo IV. Se insiste en que los trabajos de Séralini y colaboradores han sido muy cuestionados por expertos y que fueron retractados por la revista en que se publicaron inicialmente; además de que sus resultados no han podido ser replicados incluso por el mismo investigador. Muchos cuestionamientos que hace respecto a la biotecnología están rebasados, son parciales, obsoletos y falsos en ciertos casos, como el que asegura que el maíz transgénico causa daño a la salud. Esto último ha sido atendido ya mediante información más reciente a favor de la ingesta de alimentos derivados de cultivos transgénicos aprobados, como se comenta en el capítulo IV. Las deficiencias del trabajo de Séralini y colaboradores, 2012, se analizan también en el multicitado reporte sobre cultivos de ingeniería genética (plantas transgénicas) publicado en 2016 por las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos (NASEM, por sus siglas en inglés).

Estos grupos que no aceptan los cultivos transgénicos como una opción productiva también cuestionan el uso del herbicida glifosato

—el cual se emplea para el control de malezas, aunque no en la mayoría de los casos de las plantas que se siembran en Estados Unidos— junto con plantas transgénicas tolerantes a este compuesto. Señalan que el glifosato genera daños a la salud humana; este tema ya ha sido comentado y se retoma más adelante.

En 2016 fue publicado un nuevo artículo del grupo de Séralini que argumenta que cierta planta transgénica es diferente metabólicamente a las convencionales; que existen diferencias importantes entre ellas y que por ello no hay equivalencia sustancial y metabólica entre el maíz transgénico y el convencional. Nuevamente, las conclusiones de Séralini y colaboradores carecen de sustento ya que, como se explica en el capítulo IV y más adelante en éste, del análisis detallado de los datos publicados en ese artículo se concluye que las diferencias detectadas por ciencias ómicas, como en otras decenas de casos ya estudiados, son muy pequeñas y carentes de relevancia biológica. Por ello, la equivalencia sustancial y metabólica de esta planta transgénica realmente se demuestra con los resultados de comparaciones con ómicas, pues éstos muestran que los cambios son mayores entre respuestas de cultivos convencionales que crecen en diferentes ambientes y que muestran mayores diferencias que las que se observan entre cultivos convencionales y transgénicos. Esto evidencia que Séralini y colaboradores nuevamente tratan de manipular a la opinión pública con medias verdades y argumentos falsos como lo intentaron en 2012 y 2014, señalando en sus artículos que consumir maíz transgénico causa daño a la salud. Este grupo es ampliamente cuestionado por la

comunidad científica del mundo, en particular la europea, y es parte del esfuerzo de grupos radicales como Greenpeace y otros por desacreditar los cultivos transgénicos, como se expone más adelante.

Recientemente se publicó en Estados Unidos un libro de Druker, también en contra de los cultivos transgénicos. Este libro se titula *Altered genes, twisted truth: how the venture to genetically engineer our food has subverted science, corrupted government and systematically deceived the public* (2015).

Este libro, al igual que el citado anteriormente, presenta mentiras, falacias e ignorancia; señalamientos parciales, fuera de contexto y obsoletos. Fue escrito por una persona que se considera, como se lee en el propio libro, un activista como los de Greenpeace cuya posición fanática contra los transgénicos los han llevado a quemar cultivos de arroz dorado transgénico. El autor es un abogado que no tiene ninguna formación científica en el área de ciencias biológicas y por ello su perspectiva y consideraciones son limitadas; no reconoce las aportaciones de estas ciencias para la humanidad. Su libro es a título personal, no cuenta con el aval de ninguna institución académica importante y menos de las academias de ciencias y medicina de Estados Unidos. No hay evidencia científica verificable detrás de sus señalamientos más allá de la mención de algunos artículos científicos de la década de 1990 y no considera trabajos más recientes. Se insiste en que muchos de los señalamientos de este libro son falsos, parciales, fuera de contexto o ya francamente rebasados. Por ejemplo, el libro de Druker cita en varias

ocasiones el trabajo de Séralini del año 2012 como una publicación seminal, habida cuenta del descrédito y la desafortunada decisión de este grupo de volver a publicar en otra revista la información original retractada sin haber tomado en cuenta ninguna recomendación. Menciona también —y es el asunto en que sustenta primariamente su escrito— que el gobierno estadounidense ha sido comprado por las empresas transnacionales y que la sociedad ha sido sistemáticamente engañada acerca de los transgénicos. Aquí cabría mencionar que, en el caso de México, las mismas empresas que venden semillas convencionales controlan cerca del 90% del mercado de semillas de variedades mejoradas e híbridos de muchos cultivos estratégicos para el país (incluyendo maíz, sorgo, chile y tomate), y que tanto los autores de *El maíz en peligro ante los transgénicos* como Druker hacen caso omiso de este hecho, que ya implica que estas empresas controlan la producción de alimentos en nuestro país, así como en muchos otros, antes de usar los transgénicos.

Otros documentos adversos a los transgénicos y en especial a los cultivares son aquellos publicados por Greenpeace. Un documento del año 2015 se intitula “Veinte años de fracasos. Por qué los cultivares transgénicos han fallado en cumplir con sus promesas” (Twenty years of failure. Why GM crops have failed to deliver promises). Este documento, si bien es más reciente que los dos libros comentados anteriormente, sigue proporcionando una versión parcial, obsoleta, distorsionada y en muchos aspectos falsa. Ciertamente señala que las plantas transgénicas se cultivan en una pro-

porción pequeña de terrenos, lo cual es cierto. Sin embargo, la siembra se ha incrementado de manera importante y, en países como Estados Unidos, Argentina y Brasil los cultivares transgénicos representan la porción mayoritaria del total del área cultivada, además de que en otros países de Iberoamérica se están cultivando cada vez más. No existe un reconocimiento por parte de Greenpeace, supuesta defensora del medio ambiente y la biodiversidad, de los importantes beneficios que conlleva para éstos la reducción del uso de insecticidas químicos ni los beneficios económicos y de salud para los agricultores que están usando y adoptando tecnologías transgénicas. Tras 20 años de uso de cultivares transgénicos los beneficios son contundentes, aunque Greenpeace y otros grupos ambientalistas no quieran reconocerlo. En todo caso, lo que habría que destacar son los 20 años de una campaña lucrativa en contra de la tecnología.

Entre los documentos de Greenpeace accesibles en su página electrónica se encuentran, además del reporte mencionado, “Genetically engineered maize: the reality behind the myths” (2007), “Europe’s pesticide addiction. How industrial agriculture damages our environment” (2015). Y la respuesta de Greenpeace a la carta de los premios Nobel sobre plantas transgénicas (2016):

www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/#tab=0&gvs=false&page=3
www.greenpeace.org/espana/es/news/2016/Julio/Respuesta-de-Greenpeace-ante-la-carta-de-los-premios-Nobel-sobre-los-transgenicos/

Existen otros artículos, folletos, documentos y panfletos en contra de los transgénicos, en especial del maíz transgénico, escritos por miembros de la autonómada “Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad” (UCCS). Entre ellos destacamos “El maíz transgénico en México en 15 píldoras”, por Turrent y colaboradores, 2013; “Tortillas transgénicas y cancerígenas”, por Álvarez Buylla, 2015; “Cuando los premios Nobel se equivocan”, por Muñoz, 2016; “Confirmado: la salud en peligro por el maíz transgénico”, por Álvarez Buylla (2017) y “El maíz transgénico MON810 no produce mayores rendimientos ni reduce el daño por ataques a plagas”. Se pueden encontrar en la página electrónica de este grupo:

Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad, www.uccs.mx

Para contrastar los señalamientos adversos a los transgénicos contenidos en las referencias mencionadas y en otras, se remite al lector a los reportes de la OMS, de las academias de ciencias y medicina de varios países incluyendo Estados Unidos y Europa y a los metaanálisis publicados por expertos donde se documenta con evidencia científica, clara y contundente, los beneficios de los cultivos genéticamente modificados. Asimismo, la declaración firmada por 123 premios Nobel en favor de un uso responsable de la biotecnología y los OGM en la agricultura contiene ligas a referencias confiables. Por último, las decisiones de las agencias y autoridades encargadas de la inocuidad y seguridad alimentaria en los países que regulan y han aprobado el uso de estos cultivos en di-

ferentes regiones del planeta (FDA, Cofepris y EFSA) son también una fuente que avala el uso de alimentos producto de cultivos transgénicos y fundamenta la ausencia de daño por consumir estos alimentos.

A continuación se presentan las referencias que incluyen aquellas publicaciones adversas a los transgénicos, toda vez que se enlistan en forma separada al final del capítulo:

*Kling, 1996; Bakshi, 2003; Pryme y Lembcke, 2003; Greenpeace, 2007: Genetically engineered maize: The reality behind the myths; Séralini et al., 2007; Séralini et al., 2009; EFSA, 2012: www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf; Séralini et al., 2012; Álvarez Buylla y Piñeyro, 2013; Jacobsen, 2013; Turrent et al., 2013: www.uccs.mx; Burgeff et al., 2014; Clive, 2014; Séralini et al., 2014a; Séralini et al., 2014b; Séralini et al., 2014c; Álvarez Buylla, 2015; Druker, 2015; Greenpeace, 2015a: *Europe's pesticide addiction. How industrial agriculture damages our environment*, www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/#tab=0&gvs=false&page=3; Greenpeace, 2015b: *Twenty years of failure. Why GM crops have failed to deliver on their promises; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture*, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html; Mesnage et al., 2016; Muñoz, 2016: www.uccs.mx) NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; Greenpeace, 2016: *Respuesta de Greenpeace a la carta de los premios Nobel sobre cultivos transgénicos*, www.greenpeace.org/espana/es/news/2016/Julio/Respuesta-de-Greenpeace-ante-la-carta-de-los-premios-Nobel-sobre-los-cultivos-transgenicos; UCCS, 2016: *El maíz transgénico MON810 no pro-**

duce mayores rendimientos ni reduce el daño por ataques a plagas, www.uccs.mx

CUESTIONAMIENTOS EN CONTRA DE LA SIEMBRA Y EL CONSUMO DE CULTIVOS TRANSGÉNICOS, EN PARTICULAR MAÍZ

A continuación se enlistan, entre comillas, preguntas, señalamientos y cuestionamientos en contra de la siembra y el consumo de cultivos transgénicos y productos derivados —aparecidos en libros, artículos científicos, publicaciones, reportes y otros documentos—, así como las respuestas a los mismos. Muchos de estos cuestionamientos son solamente conjeturas y mentiras ya que no hay evidencia científica de daños, sino todo lo contrario, como se ha señalado a lo largo de los capítulos previos.

Cada uno de los cuestionamientos por supuestos daños se presentan y refutan en los incisos siguientes; al final se incluye un apartado con las principales acciones en contra de los transgénicos realizadas en México dentro de un contexto internacional.

a) “El consumo de maíz transgénico y el herbicida glifosato que se utiliza conjuntamente con cultivos para eliminar malezas que compiten por nutrientes con plantas transgénicas generan daños a la salud.”

Respuesta:

Se ha comentado previamente en este capítulo, y con mayor extensión en el capítulo IV, que consumir alimentos transgénicos, en particular maíz —producido en algunos casos utilizando glifosato— no causan daño a la salud humana

ni animal. En principio es importante señalar, como se analiza más adelante, que sólo el 26% del maíz (y el 46% de la soya) que se producen en Estados Unidos utilizan glifosato para eliminar malezas, y que éste es el herbicida de menor toxicidad. Así que la mayoría de los granos transgénicos (maíz amarillo y soya) que se importan para ser consumidos en nuestro país no fueron producidos usando glifosato, sino otros herbicidas. De cualquier manera se recalca que el glifosato es el herbicida de menor toxicidad y que por ello es preferible utilizarlo sobre cualquier otro para eliminar malezas que necesariamente hay que erradicar.

Existen varios metaanálisis publicados en decenas de artículos científicos arbitrados que evidencian la ausencia de daño en diversos grupos de animales alimentados con cultivos transgénicos durante periodos largos. Entre éstos destaca de manera importante el más reciente artículo de la Dra. Ricroch y colaboradores, ampliamente comentado en el capítulo IV, que incluye un metaanálisis publicado en 2014. En él se presenta una nueva revisión, extensa y actual, de un total de 44 artículos arbitrados por pares en distintas revistas, provenientes de laboratorios independientes, que utilizaron diferentes cultivos transgénicos como alimento para roedores por periodos de 90 días, conforme lo establecen las autoridades de seguridad e inocuidad, en particular la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA). También se toman en cuenta en este análisis 60 opiniones de la propia EFSA, muchas de ellas publicadas en el *EFSA Journal*, sobre estos 44 artículos. Lo anterior implica un total de 104 documentos que incluyen resultados experimentales

y opiniones de EFSA sobre la inocuidad por alimentación con transgénicos durante periodos largos. El metaanálisis aborda 27 casos que evalúan la alimentación de ratas con maíz transgénico en diferentes países, incluyendo el de Healy y colaboradores, 2008, que trata sobre el evento MON88017 (la lista de estos 44 artículos científicos se incluye en el anexo 7 de este libro).

Todos estos trabajos demuestran la ausencia de efectos negativos o dañinos, de significancia biológica o toxicológica en los animales que consumieron alimentos provenientes de cultivos transgénicos durante 90 días. No se conoce en cuáles y cuántos de estos experimentos se utilizó glifosato para eliminar las malezas; sin embargo, por los resultados que no reportan daño a los animales empleados en estos 44 experimentos, se concluye que los herbicidas, incluyendo glifosato, fueron utilizados en las condiciones adecuadas y recomendadas.

Se recalca que las autoridades y agencias responsables de la inocuidad alimentaria de varios países, incluyendo la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA), la EFSA y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios de México (Cofepris), no han retirado del mercado ningún producto transgénico de los que actualmente se comercializan debido a que no existe evidencia científica que sustente ningún tipo de daño. Algunos cuestionamientos respecto a la inocuidad de alimentos derivados de diferentes cultivos transgénicos (algunos producidos utilizando glifosato) han motivado su reevaluación por algunas de estas agencias, lo que las ha llevado a revalidar su decisión respecto a la seguridad de estos alimentos. En México,

como se analiza más adelante, el maíz amarillo transgénico se importa desde Estados Unidos para uso principal como alimento para animales, aunque también es consumido por humanos, y Cofepris ha autorizado su importación. En Estados Unidos el maíz y la soya transgénicas utilizan glifosato y otros herbicidas para eliminar malezas y se consumen por cientos de millones de personas y animales, sin daños reportados desde hace más de 20 años. Sin embargo, persisten cuestionamientos sobre el consumo de maíz transgénico y, en México, una demanda colectiva contra el maíz transgénico advierte sobre daños a la salud. No obstante, estos cuestionamientos carecen de validez científica ya que se sustentan en el artículo de Séralini y colaboradores de 2012, el cual ha sido retractado y rechazado.

Los artículos del grupo de Séralini de 2012 y 2014 han sido ampliamente descalificados; revisten especial relevancia los argumentos vertidos por grupos de investigación y asociaciones académicas europeas, como se ha señalado en el capítulo IV. Igualmente, el pronunciamiento de EFSA sobre el artículo de Séralini y colaboradores de 2012 es de particular importancia, pues en él se descalifica este artículo y sus consideraciones sobre el glifosato, como consta en el *EFSA Journal* de 2012. La última sección del resumen de este pronunciamiento dice lo siguiente:

“Debido a que el estudio de Séralini *et al.* 2012 contiene un diseño, análisis y reporte inadecuados, EFSA concluye que es de una calidad científica insuficiente para una evaluación sobre la inocuidad. Por consiguiente, EFSA concluye que este estudio

no impacta la continua evaluación de glifosato, y que no ve la necesidad de reabrir la evaluación existente sobre la seguridad de maíz NK603 y sus eventos apilados.”

[Considering that the study of Séralini *et al.* 2012, is of inadequate design, analysis and reporting, EFSA find that it is of insufficient scientific quality, for safety assessment. Therefore, EFSA concludes that this study does not impact the ongoing reevaluation of glyphosate and does not see a need to reopen the existing safety evaluation of maize NK603 and its related stacks].

El reciente reporte de las NASEM de 2016 sobre cultivos transgénicos, ya comentado, señala de manera contundente que el consumo de cultivos transgénicos de primera y segunda generación y sus productos alimenticios no causa daño a la salud humana ni animal. Se reitera que este reporte, otro de EFSA y uno reciente sobre el pronunciamiento citado indican que el glifosato usado en las condiciones y concentraciones aprobadas tampoco causa daño a la salud. Cabe recordar que la EFSA es la autoridad europea encargada de determinar las condiciones y concentraciones del uso de insecticidas y pesticidas, entre ellos el glifosato que se emplea para eliminar malezas en cultivos de diferentes plantas. EFSA sigue monitoreando el uso de glifosato y no ha modificado su decisión en relación a su uso en las concentraciones aprobadas; en algún caso, de hecho, ha permitido que éstas se incrementen.

Los siguientes párrafos abordan algunas consideraciones adicionales respecto a la situa-

ción del glifosato, no sin dejar de considerar que hay que prestar atención al uso de cualquier agroquímico, pues su abuso o uso irresponsable eventualmente puede causar daños a la salud y al medio ambiente. Como se indica en los capítulos II y VIII, el propósito último es destacar la importancia de contar con plantas transgénicas de tercera generación que permitan la eliminación de herbicidas químicos como el glifosato y otros como el paraquat, el cual es mucho más tóxico. Este escenario será factible mediante el uso de plantas (como las que desarrolla en México el Dr. Luis Herrera Estrella) capaces de crecer en fosfito en lugar de fosfato como fertilizante, ya que las malezas que el glifosato elimina no crecen en fosfito como fertilizante y fuente de fósforo. Este caso se comenta a detalle en el capítulo VIII.

En todo el mundo, en particular Europa, Estados Unidos y México, existe una preocupación legítima por los efectos a la salud humana y animal de los plaguicidas químicos. En particular, existe una amplia discusión sobre el uso del glifosato que comercializan tanto transnacionales como empresas nacionales de agroquímicos. Si bien el glifosato se desarrolló en la década de 1970 para lidiar con el control de malezas, actualmente se emplea conjuntamente para tal fin e incorporando en cultivos transgénicos genes que tienen resistencia a él, como parte de estrategias para control de malezas (ver capítulos II, IV y V). Es por ello que en el cultivo de plantas transgénicas se utiliza glifosato para inhibir el crecimiento de malezas que compiten con ellas por nutrientes. Es importante señalar que el glifosato no es un organismo transgénico sino un compuesto químico que fue descubierto al estudiar la inhibición del crecimiento entre bacterias; su patente como herbicida expiró en el año 2000.

Como ingrediente activo en diversas composiciones de herbicidas, el glifosato es un compuesto de muy baja toxicidad que puede tener efectos sobre la salud y el medio ambiente si se usa de manera irresponsable o se incrementan concentraciones y frecuencias de uso, al igual que otras sustancias naturales venenosas u otros compuestos sintéticos. El abuso de cualquier tecnología puede tener efectos secundarios graves. Sin embargo, se reitera que no hay evidencia de daño a la salud por exposición o consumo accidental de glifosato en las concentraciones adecuadas y aprobadas por las agencias y autoridades en inocuidad y sanidad regulatorias, ni con apego a las medidas preventivas para disminuir la exposición a él.

En Europa los cultivos transgénicos y el uso de glifosato han sido reevaluados por la EFSA sin cambio en la decisión de riesgo aceptable, ya que las plantas transgénicas que se siembran con él son sustancialmente equivalentes a los cultivos convencionales. En Estados Unidos el Departamento de Agricultura es el encargado de regular la utilización del glifosato; conforme a la reciente publicación de Kniss, 2017, en los últimos dos años el glifosato se utilizó para eliminar malezas en los cultivos del 26% de maíz, 43% de soya y 46% de algodón de ese país. En virtud de que más del 90% de maíz, soya y algodón son transgénicos, se puede decir que prácticamente la totalidad de estos granos son de origen transgénico. Por su baja toxicidad, el glifosato contribuyó únicamente con 0.1%, 0.3% y 3.5% de la muy reducida toxicidad crónica

encontrada en esos cultivos, respectivamente, destacando que una parte o la totalidad de esta toxicidad puede ser resultado de un uso irresponsable o fuera de condiciones aprobadas, ya sea por falta de información o descuido, o bien debida a individuos particularmente sensibles, como ocurre con otros compuestos. Finalmente, sigue siendo indispensable y necesario el uso de herbicidas para eliminar malezas que compiten por nutrientes con cultivos comestibles; por su baja toxicidad comparado con la mayoría de herbicidas el glifosato sigue siendo utilizado por la mayoría de los agricultores en Estados Unidos, y debe aplicarse en las condiciones aprobadas por las agencias.

Como se observa en los datos reportados por Kniss, si bien el glifosato es un producto de baja toxicidad, ciertamente no es el herbicida de mayor uso en Estados Unidos, incluso considerando que las plantas transgénicas de segunda generación, propiedad de empresas transnacionales, proporcionan resistencia a este herbicida. Por todo lo anterior es preferible el uso responsable del glifosato para eliminar malezas que utilizar otros herbicidas más tóxicos. Como se verá más adelante, en México también se cultivan algodón y soya transgénicas (y la última se consume en el país), ambas propiedad de empresas transnacionales, y se producen con el apoyo del glifosato. Como se ha indicado, la siembra de cultivos transgénicos y el uso de glifosato han sido rechazados argumentando daños a la salud por el consumo de plantas y por el herbicida, cuando en realidad el glifosato es un pesticida de muy baja toxicidad. Por ello, el rechazo al glifosato usado en condiciones adecuadas no tiene sustento sólido.

Como se mencionó previamente, existe una publicación reciente de Séralini y colaboradores, 2016, en la que se argumenta que existen diferencias metabólicas y composicionales importantes entre cultivos transgénicos y maíces convencionales. Estos señalamientos que nuevamente cuestionan las propiedades como alimento de las plantas transgénicas no tienen sustento y la refutación detallada se presenta en el siguiente inciso.

*Séralini et al., 2009; EFSA, 2012: www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf; Séralini et al., 2012; FDA, 2013: http://cera-gmc.org/files/cera/GmCropDatabase/decdocs/DAS444066/DAS444066_soybean_US_food_feed.pdf; Clive, 2014; Séralini et al., 2014a; Séralini et al., 2014b; Séralini et al., 2014c; Van Eenennaam y Young, 2014; FDA, 2015: www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/geplants/submissions/ucm436173.htm; *Panorama Agroalimentario Maíz 2015: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf; EFSA, 2016; Mesnage, 2016; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; Kniss, 2017**

b) “Las plantas transgénicas pueden generar problemas peligrosos, no previsible ni comprensibles, como resultado del rearrreglo del transgén en sitios sensibles de su genoma. La planta que lleva el transgén se modifica, generando cambios relevantes. Los transgénicos no son organismos ‘naturales’ por la forma en que fueron construidos. No se han realizado estudios detallados ni profundos sobre plantas transgénicas usando metodologías como las ciencias ómicas que permitan su evaluación

y caracterización. No son organismos similares composicional ni metabólicamente pues presentan diferencias importantes, por ello no habrá equivalencia sustancial entre las plantas transgénicas y las convencionales.”

Adicionalmente se señala que “los seres vivos son organismos complejos en los que participan e interactúan varios componentes, de manera coordinada y regulada, relacionándose unos con otros. La sociedad y los científicos no están capacitados para entender y estudiar adecuadamente los múltiples efectos y cambios, incluyendo epigénéticos, que conllevan la integración, expresión y rearrreglo del transgén proveniente de la bacteria *B. thuringensis* en el maíz transgénico, pues esta planta es extremadamente compleja.”

Respuesta:

En principio resulta inaceptable la premisa de que como humanos no tengamos derecho a modificar organismos vivos debido a los supuestos daños y riesgos que ciertos grupos señalan, pues ello equivaldría a renunciar a desarrollar mejores sistemas biológicos como los transgénicos, los cuales son muy similares a los cultivares convencionales y están diseñados para atender diferentes problemáticas y demandas. Los cultivares transgénicos se construyen usando métodos de ingeniería genética que utilizan y copian los mecanismos y procesos de la transgénesis (transferencia horizontal de ADN) que ocurren en la biota, como se detalla en el capítulo IX, y por ello son completamente naturales y de bajo riesgo.

Si los cuestionamientos presentados en este inciso fueran reales y lógicos, la falta de

conocimiento sobre los sistemas vegetales sería tan peligrosa que el uso de cualquier variedad convencional debería prohibirse, ya que todas han sido creadas mediante la manipulación del hombre, lo que llevaría a un colapso en la producción de alimentos a nivel mundial. Por otra parte, las plantas transgénicas han sido caracterizadas extensa, detallada y profundamente como alimentos y organismos vivos, incluyendo la reciente utilización de tecnologías de ciencias ómicas. Como se indica en el reporte de las NASEM de 2016, la caracterización de cultivos transgénicos usando ciencias ómicas (genómica, proteómica, transcriptómica y metabolómica) ha sido realizada por varios grupos independientes y publicada en decenas de artículos arbitrados. Los resultados de los artículos donde se presentan los metaanálisis correspondientes fueron integrados por Ricroch y colaboradores en 2013 y 2014 y se presentan en el capítulo IV. Por su relevancia y pertinencia, se retoma la información de uno de ellos, Ricroch, 2013, para responder a este señalamiento:

“Nuevos métodos para medir la composición de alimentos a través de las ciencias ómicas proporcionan valoraciones amplias, no específicas, de miles de moléculas de ARN, de proteínas y compuestos de plantas. Cuando se utilizan estos métodos, las diferencias entre plantas transgénicas y convencionales son pequeñas en relación con las variaciones naturales en variedades generadas de manera tradicional. Las diferencias, por sí solas, no indican un problema de seguridad. Algunos datos indican

que ciertos cultivos transgénicos resistentes a los insectos son benéficos para la salud humana al reducir la intoxicación con insecticida.”

[New methods to measure food composition using “omic” sciences, provide a broad, non targeted assessment of thousands of plant RNA, proteins and compounds. When these methods have been used, the differences found in comparisons of GE and non-GE plants, have been small relative to the naturally occurring variations found in conventionally bred crops varieties. Differences in their own, do not indicate a safety problem. There is some evidence that GE insect resistant crops have benefits to human health by reducing insecticide poisonings].

Estos resultados de análisis y caracterización de cultivares a nivel molecular muestran que la presencia, expresión y rearrreglo del transgén no han generado cambios relevantes en moléculas como ARN y proteínas, ni en los metabolitos celulares en las plantas transgénicas que lo llevan, en comparación con las plantas progenitoras que fueron obtenidas por entrecruzamientos convencionales. Además, los resultados indican que los dos tipos de plantas son parecidas tanto metabólicamente como composicionalmente, y por lo tanto pueden considerarse sustancialmente equivalentes. Tampoco se detectaron cambios inesperados en los cultivos transgénicos comparados con los cultivos parentales a raíz del análisis por ciencias ómicas. Estos resultados contrastan totalmente con lo

argumentado por los detractores: si se hubiera presentado cualquier cambio o diferencia importante, incluyendo aquellas generadas por cambios epigenéticos de la expresión del transgén o de otros genes importantes, éstas habrían sido detectadas en este tipo de experimentos. Lo anterior sustenta y demuestra que los organismos transgénicos son perfectamente naturales y muy parecidos a los organismos de los que provienen.

Durante la etapa final de la preparación de este libro apareció un artículo de Mesnage y colaboradores, 2016, en el cual Séralini figura como coautor. En este trabajo se utiliza el mismo evento de maíz transgénico NK603, al que algunos autores de este artículo, publicado en 2012, achacan daño a los animales que lo consumen. El rechazo a estos datos acerca del supuesto daño sigue presente en la mayoría de la comunidad y en publicaciones sobre el tema. En el reporte más reciente de 2016 se señala que la transformación genética en esta planta causa alteraciones que hacen dudar que la variedad transgénica sea sustancialmente equivalente a la línea parental que le dio origen. Para este estudio se utilizaron los métodos más modernos de ciencias ómicas, como el análisis proteómico y metabolómico. Los autores reportan que los niveles de 117 proteínas y 91 metabolitos están alterados en la variedad transgénica respecto a la parental. Aunque los resultados de estos experimentos se usan para alertar de manera alarmante al lector, advirtiendo que el maíz transgénico no es equivalente al convencional, lo verdaderamente sorprendente es que las diferencias son muy pequeñas. Considerando que el maíz tie-

ne un potencial para producir más de 75,000 proteínas diferentes (incluyendo un pequeño porcentaje de eventos de procesamiento diferencial de intrones) y tomando en cuenta las decenas de miles de metabolitos que produce, es realmente sorprendente que sólo 117 proteínas (0.1%) y 91 metabolitos (0.2%) tengan un nivel ligeramente distinto respecto a su progenitor convencional. Aún más sorprendente es el hecho de que, para generar una variedad transgénica, se requirió un largo proceso de cultivo *in vitro* (proceso que se sabe que puede causar mutaciones y cambios epigenéticos) y de al menos seis ciclos de mejoramiento para introgresar e incorporar el transgén en el genoma de la variedad comercial. Como es de esperarse, durante este proceso ocurren cambios genéticos y epigenéticos naturales, que son probablemente los responsables de los pocos cambios observados. Además, la variedad transgénica no es 100% idéntica a la variedad de maíz de la cual proviene pues se le incorporó el transgén; aun después de seis u ocho ciclos de retrocruzas queda entre 1% y 2% del genoma del parental donador del transgén, por lo que es de esperarse encontrar algunas diferencias entre uno y otro.

Lo que lamentablemente no incluyen los autores de este trabajo es un estudio comparativo entre las diferencias observadas entre la variedad transgénica y su parental con las diferencias que se observan entre dos variedades tradicionales de maíz, o entre una variedad convencional generada por variación somática *in vitro* (que no requiere de ninguna regulación para ser aprobada y utilizada para su comercialización) y su parental de origen.

Como ha señalado la Dra. Ricroch, los análisis entre variedades de maíz, o entre nuevas variedades generadas por mutágenos permitidos en las técnicas de mejoramiento tradicional, muestran que las diferencias de plantas transgénicas son menores a las encontradas entre diferentes variedades de maíz o a las obtenidas por mutagénesis, muchas de las cuales se utilizan comercialmente y se consumen desde hace años sin efectos a la salud.

El trabajo reciente de Mesnage, Séralini y colaboradores, más que alertar sobre cambios alarmantes en un producto transgénico, como ellos pretenden, debe considerarse como evidencia adicional a las decenas de artículos científicos publicados en revistas arbitradas que fueron analizados por Ricroch en 2013 y comentados en el reporte 2016 sobre plantas generadas por ingeniería genética (transgénicas) de las NASEM. En estas plantas, como se ha reiterado, se utilizan ciencias ómicas como métodos sofisticados de análisis para evaluar si las variedades transgénicas son metabólicamente y sustancialmente equivalentes a las tradicionales y a las parentales, lo cual quedó demostrado en los resultados presentados por Ricroch. Tampoco se detectaron cambios inesperados ni sorpresivos derivados del análisis por ciencias ómicas de este cultivo transgénico en relación a sus parentales. Finalmente, los trabajos de Herman y Price, 2013, y uno más reciente, de Herman y colaboradores, 2017, acerca de la equivalencia composicional de cultivos de maíz transgénicos y parentales, indican también que los transgénicos son muy parecidos a los padres y presentan menos alteraciones que los maíces híbridos tradicionales. Lo anterior es congruente con los

trabajos de Ricoch, 2013, y de Ricoch y colaboradores, 2014, y con lo ya señalado en este libro sobre la inocuidad de los cultivos transgénicos y sus productos.

En relación a la segunda parte del cuestionamiento, respecto a la complejidad y conocimiento del maíz, es importante mencionar que la planta de maíz no es un sistema extremadamente complejo. Asimismo, no existe un modelo vegetal mejor caracterizado en términos genéticos, epigenéticos y de biología del desarrollo que el maíz. Darwin publicó en 1876 experimentos con plantas de maíz para evaluar los efectos de la polinización cruzada y la autofecundación. Además de chícharos, Mendel utilizó plantas de maíz para tratar de entender las reglas de la herencia. En 1931, Harriet Creighton y Barbara McClintock mostraron que los genes se localizaban físicamente en los cromosomas al describir el fenómeno de entrecruzamiento y recombinación genética. El descubrimiento de la impronta genómica por Kermicle en 1970, uno de los mecanismos clásicos de regulación epigenética, se realizó estudiando el *locus R* en el maíz. Como se señala en el capítulo II, el genoma del maíz está repleto de transposones (83% de su genoma). La planta de maíz (al igual que prácticamente todas las plantas terrestres) posee mecanismos de regulación transcripcional y postranscripcional que le permiten contender con la presencia de transposones y de ácidos nucleicos foráneos (como los de los virus). En cultivos comerciales de maíz (como la variedad B73) que poseen transposones activos, las plantas conservan su apariencia y sus granos poseen las mismas propiedades físicas y químicas.

Adicionalmente, es importante señalar que el maíz como planta ha sufrido cambios y rearrreglos en su genoma. Los reportes de las secuencias nucleotídicas de los genomas de la variedad B73 indican que tiene poco más de 32,000 genes y que la variedad mexicana, palomero, resulta con un genoma 22% menor y 20% menos repetido que el B73, pero ambas siguen siendo plantas de maíz. La secuencia y caracterización del maíz palomero fue realizada en México por el Dr. Vielle-Calzada y colaboradores en el Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad (Langebio) del Cinvestav, Irapuato, en 2009. Lo anterior es una prueba adicional de que en México contamos con grupos del más alto nivel académico que han hecho y siguen haciendo contribuciones importantes sobre el maíz y otros vegetales de importancia alimentaria para el país. Los argumentos en contra del poco conocimiento y la gran complejidad del maíz son muy débiles y denotan ignorancia respecto a los avances en la comprensión de las dinámicas de regulación genética y epigenética en plantas. Es relevante señalar que la comunidad científica ha generado mapas epigenómicos de los patrones de metilación del ADN y de las modificaciones de cromatina de todo el genoma del maíz. Existen mapas de la expresión del genoma del maíz en una gran variedad de tejidos, tanto vegetativos como reproductivos. Contamos con la capacidad y conocimientos para caracterizar a detalle no sólo el sitio de integración de un transgén en el genoma del maíz, sino el contexto epigenético en el que se integró y con ello determinar su potencial para ser regulado epigenéticamente. Que los detractores se sientan incapaces de

imaginar, entender y estudiar adecuadamente los múltiples efectos y cambios que puede generar un transgén, incluyendo los epigenéticos, no es una condición que aplique al resto de la comunidad científica de especialistas.

Como se menciona en el capítulo II, respecto a los cambios epigenéticos que ocurren en las plantas de maíz usadas en cultivos convencionales, hay evidencia que indica que al hacerse cruces entre plantas creadas por métodos tradicionales (o por mejoramiento convencional) se generan muchos cambios epigenéticos debido a la mezcla de las cromatinas de las dos plantas parentales, lo que puede estar relacionado o no al movimiento de transposones. Estos cambios ocurren de manera normal durante la producción de variedades de plantas por dichos métodos convencionales de mejoramiento genético, y no han representado problemas para los agricultores o la alimentación humana o animal. Más aún, para evitar posibles efectos no asociados con la función de un transgén específico (por ejemplo, el gen Bt, proveniente de *Bacillus thuringensis* y que confiere resistencia a plagas de insectos), se producen por cada experimento al menos 50 o 100 líneas para generar una planta transgénica comercial. Una vez hecho esto se selecciona a aquella planta caracterizada por diversas metodologías, incluidas ciencias ómicas, como la más parecida a las parentales convencionales, es decir aquella que sólo difiere por el transgén que le confiere resistencia a plagas específicas.

En este contexto es importante señalar que, en las plantas de maíz, la composición del contenido de transposones es muy diferente entre plantas de la misma variedad y es toda-

vía mayor entre plantas de diferentes variedades. Inclusive, Eitchten y colaboradores, 2001, demostraron que existe variabilidad epigenética en variedades comerciales no transgénicas como B73 o Mo17. Es decir, las poblaciones de maíz contienen con cargas epigenéticas diferentes de manera natural, y la presencia de un transgén representa sólo un gen adicional que al integrarse al genoma se suma a la carga genética y epigenética de la planta.

De la misma manera en que los genes de un organismo silvestre son regulados epigenéticamente, los transgenes, como parte del genoma, también pueden ser sujetos de regulación epigenética. De hecho, el empleo de transgenes como herramientas moleculares ha sido esencial para entender la función y las bases moleculares de diversos mecanismos de regulación epigenética, incluyendo el descubrimiento del fenómeno de silenciamiento de genes en plantas (cosupresión) y posteriormente en el descubrimiento de las bases moleculares del ARN interferente.

Como se ha señalado y se analiza a detalle en el capítulo IX, el genoma del maíz es muy plástico y los genomas de diferentes variedades tienen tamaños distintos. Los transposones, que integran más del 80% de su genoma, son responsables de generar nuevas variedades intraespecie de manera frecuente. En otras palabras: la reorganización del genoma del maíz es un fenómeno que implica la creación de nuevas variedades mediante rearrreglo del genoma de manera mucho más profunda que la incorporación e integración de un transgén que se adquiere por transferencia horizontal de ADN, toda vez que esto también ocurre de

manera natural (ver capítulo IX). Es importante reiterar que los transposones causan mutaciones y cambios epigenéticos de forma natural y frecuente en las plantas, especialmente el maíz, y que son responsables de cambios inesperados o impredecibles, si bien éstos han ocurrido a lo largo de miles de años desde que inició la domesticación del maíz. Estas mutaciones y cambios no representan riesgo para la supervivencia de la especie ni para la preservación de las razas ancestrales de maíz, ni tampoco en los programas de mejoramiento genético, convencionales o mediante el uso de transgenes que se usan para generar nuevas variedades.

Los cambios epigenéticos de un gen específico pueden modificar la expresión de éste y de otros genes asociados. Si un cambio epigenético suprime la expresión del transgén en un grano o planta individual de maíz, esto podría causar la pérdida de la característica deseada en ese individuo, por ejemplo, la resistencia a los insectos plaga que el transgén proporciona. También puede ocurrir que un cambio por otros mecanismos, incluyendo los transposones, implique la reorganización del genoma y que se elimine o silencie el transgén. Las plantas resultantes y la progenie en ambos casos (inactivación por metilación o eliminación por reorganización del genoma), serían sensibles a los insectos plagas contra los que antes protegía el transgén. También es posible que por alguna modificación genética o epigenética se incremente la transcripción del transgén, lo que podría implicar una carga metabólica elevada en la planta que la hiciera responsable de la muerte del individuo que llevara la modificación. Sin embargo, todo lo que se diga sobre

transgenes habría que pensarlo también para todos los genes propios de la planta cuya sobreexpresión debida a la translocación de cientos de miles de transposones pudiera implicarle una carga metabólica y la posible eliminación de los organismos portadores. Prevalecerán los individuos que tengan las mejores capacidades genéticas y por ende metabólicas, que son precisamente los seleccionados por los productores que guardan semilla para el siguiente ciclo de producción. La muerte de algunos individuos ocurre de manera natural y cotidiana y se debe a mecanismos ambientales y bióticos que no implican daños, ni erosión genética, ni extinción de una variedad, ni mucho menos la desaparición de una especie.

A fin de cuentas todos estos posibles escenarios pueden ocurrir, y las diferentes metodologías (como la comúnmente utilizada caracterización agronómica y las de las recientemente desarrolladas ciencias ómicas) permiten la caracterización, con gran detalle y a diferentes niveles, de los sistemas complejos de plantas transgénicas y maíces convencionales. Los resultados indican que las plantas transgénicas han sido caracterizadas detallada y profundamente, que no han ocurrido cambios epigenéticos ni genéticos importantes en las plantas evaluadas comparadas con las parentales, y que son equivalentes metabólica, composicional y sustancialmente, conforme a los resultados reportados por Ricroch en 2013, los cuales se sustentan en las mediciones llevadas a cabo por decenas de grupos independientes de los metabolomas, transcriptomas y proteomas de cultivares transgénicos que se consumen como alimento por cientos de millones de animales y

humanos. Además de esta evidencia, contamos con los resultados de cientos de evaluaciones de inocuidad realizadas en países donde se ha autorizado el uso de cultivares transgénicos como alimento y para procesamiento. Como se ve, el maíz y sus variedades, incluyendo las transgénicas, están entre los seres vivos mejor estudiados y caracterizados, tanto como organismos vivos como en su calidad de alimento. Las nuevas variedades se seguirán caracterizando a profundidad con base en el gran conocimiento acumulado; la adopción de nuevas variedades por parte de los usuarios no habría ocurrido si realmente existiera daño por su consumo.

Sin embargo, si diferentes grupos —y de manera independiente— detectaran y demostraran cualquier efecto realmente adverso por el uso —y en particular por el consumo— de plantas transgénicas o sus derivados, en ese momento debería retirarse ese evento transgénico del mercado, tal como ciertos medicamentos se han retirado debido a sus efectos secundarios.

El capítulo II explica las nuevas técnicas de edición fina de ADN tipo CRISPR-Cas9, las cuales permitirán hacer frente a parte del rechazo a las plantas transgénicas, ya que a través de estas técnicas será posible incorporar el transgén y las regiones de ADN de la propia planta que permitan su expresión, si fuera necesario, en el sitio seleccionado y no al azar como ocurre actualmente con los cultivos transgénicos en uso. Esto permitirá diseñar y caracterizar más eficientemente los transgénicos de siguientes generaciones, ya que el diseño se hará previo a su desarrollo y la caracterización inmediatamente después de su construcción, todo ello gracias

a la determinación de la secuencia nucleotídica completa del genoma del nuevo organismo transgénico y su posterior caracterización por ciencias ómicas. Lo anterior permitirá determinar si la inserción del transgén ocurrió en el sitio previsto y confirmar que no haya habido cambios adicionales en el genoma del organismo receptor más allá del causado por el transgén en el sitio deseado.

Darwin, 1859; Darwin, 1868; Darwin, 1876; Heitz, 1928; Waddington, 1942; McClintock, 1950; Waddington, 1956; Waddington, 1957; Murray, 1964; Kermicle, 1970; Gustafsson, 1979; Coen, 1999; Cubas et al., 1999; Strahl y Allis, 2000; Zhang, 2001; Martienssen, 2001; Jenuwein, 2001; Hannon, 2003; Stillman y Stewart, 2004; Haig, 2004; Morgante et al., 2005; Saha et al., 2006; Allis et al., 2007; Suzuki y Bird, 2008; Schnable et al., 2009; Vielle-Calzada et al., 2009; Law y Jacobsen, 2010; NASEM, 2010: <https://doi.org/10.17226/12804>; Eichten et al., 2011; EFSA, 2011: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2011.2438/epdf>; Jinek et al., 2012; Sanders y Bowman, 2012; Cong et al., 2013; De Souza, 2013; Jinek et al., 2013; Mali et al., 2013; Qi et al., 2013; Herman y Price, 2013; Ricroch, 2013; Eitchen et al., 2014; Gilbert et al., 2014; Ricroch et al., 2014; Kleinstiver et al., 2015; Maxmen, 2015; Nihongaki et al., 2015; Allis y Jenuwein, 2016; EFSA, 2016; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; Mesnage et al., 2016; Quadrana y Colot, 2016; Herman et al., 2017

c) “¿México realmente necesita sembrar maíz transgénico? ‘No se necesita sembrar este tipo de maíz en nuestro país, las variedades disponibles no resolverán los problemas de los agricul-

tores; México no tiene plagas para las que están diseñadas las plantas transgénicas actuales’.”

Respuesta:

Un estudio publicado recientemente por Blanco y colaboradores, 2014, advierte que el problema de plagas en el cultivo de maíz en México lo encabeza *Spodoptera frugiperda*, el gusano cogollero, contra el cual se utilizan anualmente 3,000 toneladas de ingrediente activo de insecticida químico sintético (ver figura VI.1). Le siguen otros lepidópteros como *Agrotis ipsilon*, el gusano trozador, y *Helicoverpa zea*, el gusano elotero. En su conjunto se les aplica insecticida de una a tres veces en cada ciclo de cultivo. Estas plagas son controladas de manera efectiva por la primera (y mucho más efectivamente

por la segunda) generación de maíces transgénicos Bt, que llevan genes de la bacteria *Bacillus thuringensis*.

En todo caso, la respuesta a esta pregunta, como se ha señalado, es que se permita que los propios productores de maíz y de otros cultivos transgénicos tengan el derecho de decidir si estas variedades genéticamente modificadas resuelven o no sus problemas. Es muy sencillo opinar desde la comodidad de una residencia confortable sobre lo que deben o no deben hacer los campesinos. Hay que proporcionar a los agricultores la posibilidad de elegir, y de esa manera contribuir, a la posibilidad de un campo más competitivo, justo y sustentable.

Ibarra et al., 2003; Blanco et al., 2014



Figura VI.1. Blanco y colaboradores, 2014: “Maize pests in Mexico and challenges for the adoption of integrated pest management programs” (Plagas de maíz en México y retos para la adopción de programas de manejo integral de control de plagas)

J. Integr. Pest Manag. 5(4): E1-E9.DOI:10.1603/IPM14006

Se agradece a Oxford University Press el permiso para reproducir esta figura. Licencia no. 4060460300285

Permission granted by Oxford University Press. License number 4060460300285

d) “El maíz transgénico contamina los maíces nativos de los que México es centro de origen. El uso de maíces transgénicos pone en riesgo a las variedades nativas y a sus parientes. El flujo génico por los granos de polen de maíz transgénico y otros mecanismos dañan los cultivos nativos.”

Respuesta:

Los grupos antitransgénicos argumentan que el maíz transgénico “contamina”, pone en riesgo y daña los maíces de los cuales México es centro de origen. Nuevamente, ésta es una aseveración sin fundamento científico que busca denostar a la tecnología. De acuerdo con la definición del diccionario, se entiende que contaminación implica daño, y la palabra tiene una connotación negativa.

En primer lugar no existe ninguna evidencia científica sólida publicada que indique que el maíz transgénico “contamine”, ponga en riesgo o dañe las 60 variedades de maíces nativos y parientes silvestres que hay en el país. Tampoco hay evidencia de daño por la coexistencia de maíces transgénicos con otras variedades de híbridos convencionales. La coexistencia significa compartir presencia; la existencia conjunta no significa daño *per se*, como se analiza a detalle en el siguiente inciso.

En relación al señalamiento de que el flujo génico mediado por granos de polen de maíz transgénico daña o contamina la planta receptora nativa, en principio hay que notar que es perfectamente factible que el transgén esté presente en el polen y que pueda fecundar al óvulo de la planta receptora a la que arribó el polen por transferencia vertical (de padres a hijos) de

ADN, de la misma manera en que las plantas adquieren genes o alelos que les proporcionan nuevas características. Si estas características representan ventajas adaptativas para la planta o les confieren otras que el agricultor juzgue convenientes, las características se pueden fijar en la población y entonces ocurre una introgresión, es decir, el gen de otro origen se incorpora en el genoma de la planta. El flujo de genes es un proceso natural y no representa por sí mismo un efecto adverso. Si las características que confiere un transgén a la progenie que lo porta favorece su adecuación, éste se puede seleccionar y mantener. Si por el contrario la característica no es adaptativa o no representa un atributo deseable para el agricultor, éste no la seleccionará y se eliminará de la población.

Otro caso se refiere a la transferencia horizontal de material genético mediada por virus y por ciertas bacterias como *Agrobacterium tumefaciens*; si bien su ocurrencia ha sido documentada, se trata de eventos poco frecuentes en plantas y más comunes en microorganismos. Ejemplos de eventos de transferencia horizontal de ADN ocurridos en plantas (como se ha señalado en el capítulo II y se comenta en el capítulo XI) son los genes responsables de la fotosíntesis y la transferencia por endosimbiosis de mitocondrias y cloroplastos en células precursoras de los eucariotes y sus consecuencias respecto a la evolución de la vida en el planeta. Un ejemplo reciente de Kyndt y colaboradores, 2015, demuestra que en el camote ha ocurrido una modificación transgénica de manera natural, la cual otorga beneficios a los agricultores que lo cultivan y consumen. Así, la posibilidad de adquirir genes por transferencia horizontal,

incluyendo transgenes que existen en bacterias y plantas transgénicas comerciales, es un proceso que puede ocurrir pues es un mecanismo natural que en muchos casos ha proporcionado ventajas al organismo receptor una vez que el ADN externo se estabiliza por recombinación genética en su genoma. Sin embargo, las células de los seres vivos cuentan con mecanismos para eliminar el ADN proveniente de otro origen, lo cual hace poco probable que el ADN foráneo se estabilice y se incorpore como parte del genoma del organismo receptor, toda vez que se recalca que éste no es un proceso que *per se* dañe o contamine. Si el material transferido por este mecanismo no se incorpora en el genoma será eliminado por la maquinaria celular. Como se ha mencionado, la transferencia horizontal de ADN ha sido responsable de la adquisición de muchas funciones en diferentes organismos, y también es parcialmente responsable de la evolución de las especies. Aunque es un evento poco probable, los transgenes que pudieran recibirse por transferencia horizontal de ADN mediado por polen u otro vector, no tendrían por qué generar daño, sino lo contrario. En algunos casos ciertas plantas podrían adquirir transgenes que les otorgaran resistencia a plagas tanto de malezas como de insectos, y serían sustancialmente equivalentes.

Como se ha señalado en el capítulo IV, varios de los cultivos transgénicos que se utilizan comercialmente han sido amplia y detalladamente caracterizados mediante ciencias ómicas y otras metodologías. Su consumo no causa efectos adversos y las plantas transgénicas son metabólicas y sustancialmente equivalentes a las convencionales.

La generación de malezas resistentes a herbicidas es otro de los señalamientos en contra del uso de plantas transgénicas. Se trata de la transferencia de genes que confiere resistencia a herbicidas a malezas emparentadas con cultivos de plantas transgénicas que portan esta característica. Si esto ocurre en el caso de los genes con resistencia a herbicidas presentes en el polen transgénico, de nuevo se menciona que esto no necesariamente implica daño a la planta donadora ni tampoco tiene un efecto directo en el pariente silvestre si éste no se encuentra sujeto a la presión de selección dada por la presencia del herbicida. Sólo en caso de que el pariente silvestre sea una maleza que ya se controla en el ambiente agrícola se podría requerir el uso de herbicidas con un compuesto activo diferente.

Un trabajo de Mallory-Smith y Sánchez Olguín, 2011, señala la evidencia de transferencia de genes que confieren resistencia a herbicidas entre cultivares no transgénicos y sus malezas emparentadas. Esto demuestra que la transferencia de este tipo de genes ocurre en la naturaleza y seguirá ocurriendo independientemente de la existencia de cultivares transgénicos. Para evitar la resistencia a herbicidas en malezas lo que se requiere son prácticas de manejo diferentes que incluyan, por ejemplo, rotación de cultivos y un uso adecuado y sin abusos de herbicidas, lo cual constituye parte del problema que se tiene con el glifosato.

Los procesos de selección que llevan a la generación de malezas resistentes a herbicidas son una ilustración clara de procesos evolutivos, y se asocian tanto a la variación que diferentes individuos pueden tener como a la

presión de selección continua asociada a la presencia de un herbicida. Cualquier individuo de una población de malezas que tenga una mutación que le permita dejar de ser susceptible al ingrediente activo del herbicida tendrá una clara ventaja adaptativa en ese sistema agrícola, lo que le facilitará llegar a la etapa reproductiva y transferir la característica a su descendencia. Así pues, la evolución de la resistencia a herbicidas está más asociada a prácticas agrícolas y a abusos de la tecnología que al uso de cultivos tolerantes a herbicidas, toda vez que es independiente de la tecnología utilizada para generar la resistencia.

Caplan, 1983; Herrera Estrella et al., 1983; Keese, 2008; Mallory-Smith y Sánchez-Olguín, 2011; Price et al., 2012; Zhenxiang et al., 2012; Ricoch, 2013; Fuentes et al., 2014; Nicolía et al., 2014; Ricoch et al., 2014; Crisp et al., 2015; Kyndt et al., 2015; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>

e) “¿Es posible la coexistencia de diferentes prácticas y variedades de maíz en nuestro país? ¿Cómo controlar el flujo génico del polen en un cultivo como el maíz que se poliniza por viento?”

Respuesta:

No existe evidencia científica sólida ni razón por la cual tengan que desaparecer ni sufrir erosión genética las 60 variedades nativas de maíz de México, ni sus parientes silvestres debido a la coexistencia con cultivos de maíz transgénico. No hay evidencia de daño reportada; al contrario, la evidencia indica que las variedades nativas, así como varios miles de

diferentes tipos de maíz adaptados localmente, han coexistido desde la década de 1960 con diversas variedades de maíz híbrido mejorado y no han perdido sus características distintivas. Esto se debe a que los campesinos que las cultivan mantienen sus procesos de selección tradicional, lo que representa una forma de conservación *in situ* que debe seguirse fomentando pues refleja un proceso adaptativo continuo. Adicionalmente (y como complemento a la conservación *in situ*), las variedades de maíz nativo mexicano se encuentran resguardadas en el banco de germoplasma del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, ubicado en Texcoco, México, así como en el de Tepatlán, Jalisco. En otros países existen copias completas o parciales de estos bancos, como ejemplo de un esfuerzo importante de conservación *ex situ*. Como se explica en el capítulo VIII, México podría apoyar la conservación de todas las razas y variedades de maíz nativas con características valiosas, pero susceptibles a los efectos del cambio climático, por ejemplo, y modificarlas genéticamente tanto para preservar su diversidad genética como para hacerlas más accesibles y productivas para el campesino mexicano. Esto contribuiría a reducir el control de las empresas transnacionales, las cuales son dueñas de la mayor parte de las semillas transgénicas y convencionales.

La coexistencia entre cultivos nativos tradicionales, variedades mejoradas por métodos de mejoramiento convencional y cultivos transgénicos es un asunto relativamente complejo que implica muchos factores e intereses, en particular económicos. La Comisión Europea define la coexistencia como “la

capacidad de los agricultores de realizar una selección práctica entre los diferentes tipos de cultivos, convencional, genéticamente modificado u orgánico a utilizar”. Esta definición, esencialmente de orientación económica, no toma en cuenta factores medio ambientales. En Europa existe una gran polémica sobre el uso de cultivares transgénicos que ha llevado recientemente a que cada país se responsabilice directamente de la decisión de qué plantas transgénicas permite sembrar en su jurisdicción. Entre las grandes diferencias resalta que en muchos países se considera que los cultivos transgénicos causan daño a la salud, afectan la comercialización de los cultivos tradicionales y orgánicos y afectan negativamente al medio ambiente. Parte de estos cuestionamientos ya han sido analizados en este capítulo, incluyendo la cuestión sobre el flujo génico y la ausencia de daño conforme a nuestras consideraciones al respecto. No pretendemos hacer un análisis exhaustivo sobre la coexistencia sino señalar ejemplos en diferentes países de Europa, Latinoamérica, Estados Unidos, India y Sudáfrica, como se muestra más adelante en la figura VI.2, que indican que la coexistencia entre cultivares convencionales, orgánicos y transgénicos es posible, y en los que se reporta que no ha habido daños por ella.

¿Qué indica la evidencia sobre la coexistencia?

Las variedades nativas han coexistido durante años con cientos de variedades de maíz, en particular con los llamados híbridos mejorados convencionales que portan amplios cambios genéticos. Actualmente se utilizan en México

y en otros países, incluyendo nueve iberoamericanos, sin daño reportado a las razas nativas.

Las variedades nativas y convencionales coexistirán también sin detrimento con diferentes plantas transgénicas, en especial con las variedades de maíz transgénico, ya que se trata de organismos vivos esencialmente con el mismo genoma que podrían intercambiar y recibir sin problemas material genético de otros orígenes, como parte de un proceso natural. En el capítulo IX se presenta evidencia científica que sustenta que los procesos de transferencia horizontal de material genético, mediante los cuales se construyen los organismos transgénicos, ocurren también en diferentes especies, sobre todo microorganismos, de manera natural. Como se ha mencionado anteriormente, las plantas transgénicas y sus precursores convencionales han sido rigurosamente caracterizadas y evaluadas mediante ciencias ómicas y se ha demostrado que son organismos muy parecidos. Por ello resulta difícil entender la preocupación de que la coexistencia entre plantas que realmente son muy parecidas implique riesgo a las variedades convencionales y nativas por la coexistencia con cultivares transgénicos. No hay ninguna razón que sustente esta preocupación ya que las plantas transgénicas no tendrían por qué causar daño, aun aceptando la posibilidad de que los transgenes pudieran transferirse a las nativas o convencionales, lo que no implica un daño *per se*, como se ha señalado en el inciso anterior, y que las plantas pudieran ganar una función por el transgén.

Otra característica que es importante resaltar, como ya se ha señalado, es que el maíz es una planta en la que más del 80% de su ge-

noma son transposones, y por ello reorganiza y cambia con frecuencia su material genético (ver capítulos II y IX). Este fenómeno es responsable de rearrreglos de genes, causante de crear variedades intraespecie como es el caso de los colores diferentes en granos de una misma mazorca, como fue reportado por Morgante y colaboradores, 2005. No existe razón o evidencia científica alguna que sustente que haya daño en maíces convencionales o nativos por la presencia de transgenes provenientes de cultivares transgénicos ya que, aun si la transferencia y el rearrreglo de material genético del transgén se dieran (lo cual es poco probable), el genoma del maíz se rearrreglaría gracias a su gran plasticidad, como de hecho lo hace cotidianamente a través de sus transposones.

Un ejemplo claro de la coexistencia de diferentes variedades de maíz es la producción de maíz blanco y amarillo en el Bajío mexicano. Por décadas se ha producido maíz blanco sin problemas en la región, aunque algunos podrían pensar que se “contaminaría” con el maíz amarillo de uso industrial y de alimento para ganado. Esto se refuerza con el hecho de que las 60 razas de maíz identificadas hasta ahora se hayan mantenido a lo largo de siglos, a pesar de que varias de ellas se siembran en coexistencia en cultivos vecinos.

Situación sobre la coexistencia del maíz y otros cultivares transgénicos en el mundo

La producción de semillas certificadas que requieren alcanzar distintos niveles de pureza en diferentes variedades y su segregación no es nueva. Por ejemplo, en el maíz se segrega el

maíz dulce del maíz para obtención de almidón industrial; lo mismo ocurre con variedades de diferentes usos, por ejemplo, entre el maíz palomero y el maíz cacahuazintle que se usa para el pozole. Esto se da tanto en grandes sistemas de producción como en prácticas tradicionales.

Se han desarrollado diferentes procedimientos para lograr que los cultivos que crecen en la misma región puedan mantener sus características. Existen trabajos para orientar proyectos de sustentabilidad del medio ambiente y la biodiversidad mediante la utilización de métodos de cultivo tradicional. Esta información y estrategias deben considerarse para preservar las variedades nativas y propiciar la coexistencia con diferentes sistemas productivos, incluyendo cultivos transgénicos.

Existe amplia y detallada información técnica y científica sobre experiencias a nivel internacional que indica la coexistencia entre cultivares convencionales, orgánicos y transgénicos en países que producen, consumen y exportan cultivares transgénicos. La figura VI.2 reproduce la tabla 6.1 del reporte 2016 de las NASEM de Estados Unidos. Muestra casos de esquemas de coexistencia en Australia, Brasil, Burkina Faso, Canadá, China, España, Estados Unidos, India, Pakistán y Sudáfrica que abarcan algodón, canola, maíz y soya de cultivos convencionales y orgánicos con transgénicos. El reporte indica que se ha logrado la coexistencia entre estos cultivos siguiendo las reglas y reglamentos de cada país.

Los trabajos del citado libro de Solleiro y Castañón, *Introducción al ambiente del maíz transgénico. Análisis de ocho casos en Iberoamérica*, 2013, comentado en el capítulo anterior,

Successful Coexistence Schemes in Selected Countries That Produce and Market Genetically Engineered (GE) and Non-GE Crops¹

Producing Country	Maize	Soybean	Cotton	Canola
Australia			GE and organic	GE and non-GE
Brazil	GE	GE and non-GE	GE and organic	
Burkina Faso			GE, fair trade, and organic	
Canada	GE, non-GE, and organic	GE, non-GE, and organic		GE, non-GE, and organic
China			GE and organic	
India			GE and organic	
Pakistan			GE and organic	
South Africa	GE and non-GE	GE	GE and organic	
Spain	GE, non-GE, and organic			
United States	GE, non-GE, and organic	GE, non-GE, and organic	GE and organic	GE, non-GE, and organic

¹ Non-GE crops include those produced with synthetic fertilizers and pesticides and those produced with practices that meet organic standards. The former is described in the table as "non-GE", the latter as "organic". Source: Carter and Gruère (2012).

Figura VI.2. Reporte NASEM, 2016: "Successful coexistence in selected countries that produce and market genetically engineered crops and non-GE crops" (Coexistencia exitosa en países que producen y comercializan cosechas genéticamente modificadas y cosechas no modificadas genéticamente.)

Se agradece el permiso para reproducir esta tabla a la National Academy of Sciences, cortesía de National Academies Press, Washington, D.C.
Reprinted with permission from NASEM Report (2016) by the National Academy of Sciences, courtesy of the National Academies Press, Washington, D.C.

presentan datos sobre la liberación al ambiente de maíz transgénico y otros cultivares, como soya y algodón, en Argentina, Brasil, Chile, Colombia, España, Honduras, México y Uruguay. Los resultados indican que no hay daño ni contaminación, sino coexistencia entre maíces y otras plantas convencionales con los transgénicos. En muchos países existe una verdadera agricultura de coexistencia. Es más, muchos agricultores en estos países están adoptando cultivos transgénicos por los beneficios que conllevan, puesto que no hay daño reportado a la salud, ni al medio ambiente ni a la biodiversidad, sino ventajas. En el caso de México,

el maíz transgénico se encuentra detenido desde 2013 por una demanda colectiva en contra de su siembra, aunque Cofepris autorizó la importación de 74 diferentes eventos de maíz amarillo transgénico, hasta 2016, para procesamiento, comercialización y consumo principalmente por animales, mas no para su siembra.

La experiencia de España, el productor más importante en Europa de cultivos transgénicos, indica que en los cerca de 18 años de cultivar maíz genéticamente modificado con variedades convencionales y con maíz orgánico, existen amplios beneficios y no se ha reportado daño, sino coexistencia (reporte técnico

de la Fundación Antama, 2016). En Portugal se siembra maíz transgénico y la evidencia, al igual que en España, es que los agricultores están adoptando la tecnología por sus ventajas.

Desde 2004 existen varios trabajos en Estados Unidos donde se analiza la coexistencia entre diferentes cultivares, concluyendo que los agricultores están adoptando cultivos transgénicos pues se siembran ya en más del 90% del territorio. Esto se debe a las ventajas mencionadas en el capítulo V y a que la coexistencia de diferentes tipos de prácticas agrícolas existe desde hace muchos años, sin evidencia de daño según Brookes y Barfoot, 2004. Estos dos autores y otros tres europeos publicaron en *PG Economics* el reporte "Genetically modified maize: pollen movement and crop coexistence", también en 2004. En él se hizo una evaluación de los cultivares transgénicos en Estados Unidos y España, midiendo el movimiento del polen en cultivares convencionales y transgénicos. El estudio recomienda el uso de barreras para reducir el movimiento del polen pero no reporta evidencia de daño por este fenómeno.

Además de los ya mencionados, varios países cultivan maíz, soya y algodón transgénicos, como se indica en la figura VI.2, el capítulo II y en los reportes de Clive de 2014 y 2015. Es importante indicar que una publicación reciente (2016) del Instituto Flamenco de Biotecnología, Bélgica, menciona los efectos benéficos de los cultivos transgénicos para el medio ambiente, lo cual es congruente con los otros reportes mencionados. Otra publicación de este instituto del año 2014 muestra un incremento significativo en la producción del algodón en India; en

ella también se analizan las declaraciones de la activista y fanática Vandana Shiva hechas en una campaña en contra de los cultivos transgénicos, señalando que la ineficiencia en su uso causó un incremento en el índice de suicidios en ese país. Esto es completamente falso. Por el contrario, el documento de las academias de Estados Unidos señala que la introducción de algodón transgénico en India aumentó el número de mujeres dedicadas a la agricultura (piscicultura) disminuyendo el de hombres (aplicación de plaguicidas). La producción del algodón transgénico ha aumentado de manera importante en India, pasando de ser un país importador a uno exportador de fibra de calidad, con beneficios para los agricultores que la siembran. Asimismo, el uso de insecticidas químicos en el país ha disminuido de manera espectacular en los últimos cinco años.

Existen testimonios reportados de productores de varios países: nueve de Iberoamérica (incluyendo España y Portugal), India y Estados Unidos, además de datos técnicos, sobre los beneficios que implica reducir significativamente el uso de insecticidas químicos (ver también capítulo V). El estudio sobre plantas transgénicas realizado por las academias de ciencias, ingeniería y medicina de Estados Unidos apunta las razones por las que los agricultores de ese y otros países están usando cultivos transgénicos y dejando de emplear insecticidas químicos. Esta información indica que los cultivos transgénicos coexisten, sin evidencia de daño, con cultivos convencionales; que existe una verdadera agricultura de coexistencia. Los beneficios se detallan de manera resumida en un siguiente inciso.

Coexistencia y contención del polen en varios países y regiones, particularmente Europa

Se han considerado varios elementos para avanzar en estos propósitos:

- i) Distancias de aislamiento y barreras biológicas; prevalencia de los vientos.
- ii) Biología floral (tiempo de floración y receptividad)
- iii) Mejor capacitación técnica para evaluar la presencia y el flujo del polen.
- iv) Tamaño de los campos, rotación de cultivos.

Existe mucha información y controversia respecto a la coexistencia entre variedades transgénicas y plantas convencionales, en especial en Europa, donde subsisten diferentes percepciones y acciones en los países que la conforman. Parte importante de la controversia es el hecho que ciertos grupos advierten que el polen de maíz transgénico contamina, y de manera adventicia causa, algún tipo de daño a las variedades convencionales, toda vez que países como España y Portugal han cultivado maíz transgénico durante años. Este es un asunto que ha sido estudiado detalladamente desde hace tiempo. El inciso anterior subraya que la evidencia científica indica que aun cuando se detecta transferencia de polen transgénico en cultivos comerciales por dispersión de polen, fertilización cruzada y posterior introgresión del transgén a las variedades convencionales no ocurren daños, pues no hay razones válidas por las que éstos tendrían que ocurrir. Consumir plantas transgénicas o sus productos derivados no genera efectos adversos a la

salud, como se ha señalado, pues son plantas parecidas con equivalencia metabólica y sustancial: la planta modificada recibe solamente uno o dos genes, mismos que han sido evaluados y aprobados por su inocuidad.

Sin embargo, conforme a lo explicado, lograr contener el polen lo mejor posible en los campos donde se siembra y limitar el entrecruzamiento con otras variedades es algo que se ha estudiado a fondo, justamente para facilitar la convivencia y coexistencia de diferentes prácticas agrícolas, así como para mantener diferentes mercados disponibles para los consumidores. En Europa se han desarrollado estrategias para limitar la dispersión de polen; existe una directiva de la Unión Europea que establece los niveles máximos de presencia de componentes de origen transgénico (0.9%), arriba de este porcentaje el producto debe etiquetarse como genéticamente modificado (siempre y cuando esté autorizado para su consumo). En algunos países existe prohibición total o parcial para la siembra de cultivos transgénicos; en otros la estrategia ha sido evaluar las distancias y barreras que permiten contener de mejor manera el maíz transgénico y su polen para reducir el contacto con el convencional.

Entre los trabajos destacan el desarrollado en Suiza por Sanvido y colaboradores, 2008, y el de Riesgo y colaboradores, 2010, los cuales sugieren que una separación de 40 metros entre sembradíos es suficiente para mantener la tasa de entrecruzamiento proveniente de maíz transgénico en el nivel establecido por la Unión Europea del 0.9%. En este contexto de reducir la polinización cruzada existe un esfuerzo para determinar si las barreras biológicas de las pro-

pias plantas sirven para contener la polinización del maíz transgénico. Varios casos argumentan que esto es posible, entre ellos el de Rühl y colaboradores, 2011, el cual demuestra que la coexistencia de maíz es posible a través de barreras formadas por una sola hilera de maíz que reduzca el flujo del polen. En este mismo sentido, un reporte similar de Langhof y colaboradores, 2010, y un trabajo alemán iniciado en 2004 por Weber y colaboradores demuestran que plantando barreras de 20 metros de maíz convencional se reduce la presencia de polinización cruzada dentro de los límites requeridos. También se ha utilizado una estrategia basada en diferentes tiempos de floración del maíz transgénico para modificar el proceso y reducir la frecuencia de polinización cruzada. Palau delmas y colaboradores, incluyendo a Messeguer en España, 2007, demostraron que un desfase de siete días entre floraciones es suficiente para reducir el flujo de polen a niveles permitidos y que esta estrategia, aunada a la separación por distancias y al uso de barreras biológicas, es adecuada para contener eficientemente el polen transgénico dentro de los límites permitidos.

En Europa asimismo existe un conjunto de esfuerzos para buscar una mejor preparación técnica en la detección de polen de maíz transgénico, como son la evaluación mediante agricultura de precisión, el modelamiento del flujo génico en cultivos convencionales, el desarrollo de métodos para cuantificar la presencia de polen transgénico llegado de manera adventicia, la medición de flujo génico en situaciones reales de coexistencia de maíz y, como ya se señaló, la optimización de barreras para pro-

piciar una mejor contención y reducir el traslado de polen. Todo esto tiene el propósito de obtener una mejor evaluación y conocimiento de los ejemplos y eventos de coexistencia entre cultivos transgénicos y convencionales en los que existe dispersión de polen, reportados en los artículos de Messeguer y colaboradores, 2006, Melé y colaboradores, 2015, Gray y colaboradores, 2011, Ricci y colaboradores, 2016, Folloni y colaboradores, 2012 y Graziano y colaboradores, 2011. Como se menciona, España y Portugal son de los pocos países europeos donde se siembra maíz transgénico en coexistencia con el convencional; en ambos países la experiencia es favorable.

McClintock, 1987; Caplan et al., 1983; Kling, 1996; European Commission, 2003; Ortiz y Ezcurra, 2003; Brookes y Barfoot, 2004; Weber et al., 2007; Morgante et al., 2005; Messeguer et al., 2006; Trigo y Capp, 2006; Dev y Rao, 2007; Palau delmas et al., 2007; Sanvido et al., 2008; Langhof et al., 2010; NASEM, 2010: <https://doi.org/10.17226/12804>; Riesgo et al., 2010; Skevas et al., 2010; Gray et al., 2011; Graziano et al., 2011; Mallory-Smith y Sánchez-Olguín, 2011; Rühl et al., 2011; Folloni et al., 2012; Price et al., 2012; Quedas y Cruz de Carvalho, 2012; Zhenxiang et al., 2012; Ricroch, 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Brookes y Barfoot, 2014; Brookes et al., 2014; Fuentes et al., 2014; Nicolía et al., 2014; Ricroch et al., 2014; Crisp et al., 2015; Kyndt et al., 2015; Melé et al., 2015; Panorama Agroalimentario Maíz 2015: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf; reporte técnico Fundación Antama España, 2016: www.fundacion-antama.org; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; Ricci et al., 2016

Situación en México acerca de la coexistencia del maíz y la siembra de cultivares transgénicos

Los maíces híbridos mejorados y las variedades nativas de maíz han coexistido por más de medio siglo. Los parientes silvestres y las variedades convencionales de maíz, que incluyen grandes cambios en sus genomas, han coexistido miles de años sin perder su identidad. Un ejemplo es el caso del maíz palomero, cuyo genoma es 22% más pequeño que la variedad comercial B73 y coexisten sin problemas.

Como se ha señalado previamente, no tendría por qué perderse o erosionarse la diversidad genética de estas variedades por la coexistencia con el maíz transgénico, ya que no hay evidencia de daño por maíz transgénico a las variedades convencionales. El flujo génico por el polen no implica daño, ni contaminación; implica coexistencia: existencia conjunta o compartida. Lamentablemente, distintas acciones, en particular la demanda colectiva que pesa desde 2013, han impedido en México la siembra de maíz transgénico. Anteriormente se habían autorizado más de 200 permisos de siembra de este cultivar transgénico conforme a la página de la Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (Cibiogem).

La Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM) de México, comentada a detalle en el capítulo X, ha establecido Centros de Origen y de Diversidad Genética como zonas restringidas para la siembra de variedades de cultivos de los que México es centro de origen y de diversificación, como es el caso del maíz. Esta previsión ciertamente

limita el derecho de los pequeños agricultores de acceder a nuevas tecnologías productivas basadas en plantas genéticamente modificadas y pretende limitar la dispersión de maíz genéticamente modificado en estas zonas.

El libro de Solleiro y Castañón, 2013, presenta datos sobre la liberación al ambiente de maíz y otros cultivos transgénicos en ocho países de Iberoamérica, como se apuntó antes. Los resultados indican que no hay evidencia de daño sino de coexistencia con los maíces convencionales en esos países. En el caso de México, el cultivo de maíz transgénico se ha detenido por la demanda colectiva en contra de su siembra desde 2013. Entre otras razones, los demandantes argumentan que al ser México centro de origen y de diversificación de maíz no se debe sembrar este cultivo. Algunos amparos presentados ante la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN) también argumentan daño a la salud por su consumo. Sin embargo, Cofepris ha registrado más de 70 autorizaciones de comercialización para eventos de maíz genéticamente modificado (para consumo animal y procesamiento, aunque una pequeña parte es consumida por humanos) y no ha retirado ningún alimento transgénico de los actualmente autorizados para consumo animal y humano. Adicionalmente al maíz se han autorizado siembras de alfalfa, algodón, soya, trigo y limón. De acuerdo con la página de la Cibiogem en 2015 existían cerca de 600 autorizaciones para la siembra de diferentes cultivos.

Previo a la aprobación de la LBOGM en 2005 se registraron 327 pruebas de campo con 23 diferentes especies de plantas cultivadas. Además, Cofepris ha dado autorizaciones para la importación y comercialización de OGM, que



Figura VI.3. La siembra de algodón transgénico ha traído importantes beneficios a los agricultores de diferentes países, incluyendo Estados Unidos, India y México.

en el periodo 1995–2016 sumaron 164. Éstas permitieron la importación de diferentes productos, principalmente soya, algodón y maíz, para uso directo como alimento de ganado, alimento humano y para procesamiento conforme a la LBOGM y a la Ley General de Salud. Se recalca que México importa maíz transgénico amarillo de Estados Unidos para completar la demanda por este cereal, ya que nuestro país produce actualmente menos del 30% de los requerimientos de este grano, y la importación se ha ido incrementando. Durante los últimos años se importó más del 70%, el cual se utiliza principalmente como alimento pecuario y para procesamiento, aunque una pequeña parte es consumida por humanos.

Escenario Base 09-18, proyecciones para el sector agropecuario en México, Sagarpa México, 2009; Schnable et al., 2009; Vielle-Calzada et al., 2009; Panorama Agroalimentario Maíz 2015: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf; Solleiro y Castañón, 2013 (capítulo correspondiente a México): www.cofepris.gob.mx; www.conacyt.mx/cibiogem

Gracias a la decisión de sembrar algodón transgénico en México utilizando glifosato para eliminar malezas se recuperó un cultivo que es de gran importancia para la producción de textiles —una planta de la cual México también es centro de origen. El cultivo de algodón transgénico ha traído beneficios a los agricultores en Estados Unidos e India, como indican el documento sobre plantas desarrolladas por ingeniería genética de las NASEM, 2016, Dev y

Rao, 2007, y el reporte 2014 del Instituto Flamenco de Biotecnología.

Es inmoral e injusto que los campesinos en México, que cuentan con tecnología transgénica en el cultivo de algodón, no puedan ampliarla mediante el uso de otras plantas transgénicas. Se ha presentado en este libro información acerca del beneficio de sembrar algodón transgénico en México, lo que ha permitido decretar algunas zonas del norte del país libres de gusano rosado. El beneficio podría extenderse si se sembraran otras plantas, como maíz y soya, de manera más extensa.

De acuerdo con Solleiro y Castañón, 2013, y con la página de Cibiogem, en varios estados de México se siembra soya transgénica —propiedad de empresas transnacionales y que utilizan glifosato para eliminar malezas— desde hace varios años. Es importante resaltar que, a diferencia del maíz, la soya no es una planta de la cual México sea centro de origen. En países hermanos, vecinos y muy parecidos como Argentina y Brasil, la soya transgénica es producida, consumida y exportada a muchos países. No existe razón que justifique los intentos de ciertos grupos de impedir la siembra de soya en nuestro país, incluyendo demandas ante el Poder Judicial de la Federación y la SCJN. Indudablemente, las acciones para retrasar y obstaculizar la siembra de soya son injustas y van en detrimento de campesinos y agricultores mexicanos y de sus derechos, pues de esta forma no tienen acceso a tecnologías avanzadas como sus pares de países de Iberoamérica.

Ciertamente, como se comenta más adelante, algunas de las acciones para impedir la siembra de soya se han basado en la detección

de polen de soya transgénica en la miel. El impacto económico para los productores de miel en Yucatán motivó la elaboración de un decreto del gobierno de Yucatán para impedir la siembra de transgénicos en octubre de 2016. Este decreto ha sido impugnado por la Oficina de la Presidencia de la República ante la SCJN, tomando en cuenta que la LBOGM es un ordenamiento federal. Los amparos presentados ante la SCJN también insisten en que los cultivos de soya transgénica y el glifosato que se usa en plantas transgénicas, dañan la salud y contaminan el medio ambiente. Como se indica en el primer inciso de este capítulo, datos recientes recopilados por Kniss en 2017 revelan que el glifosato es un herbicida de muy baja toxicidad y que ha sido utilizado para cultivar maíz, algodón y soya en Estados Unidos, país donde más del 90% de estos cultivos son transgénicos. Por ello, el rechazo a la utilización de glifosato en México, usado de manera responsable, no tiene sustento.

En México, lamentablemente, las demandas y amparos contra cultivos transgénicos han causado que el uso en el campo de estas tecnologías disminuya, al tiempo que se mantienen e incrementan las importaciones de alimentos transgénicos. Afortunadamente, como se comenta más adelante, se sigue realizando investigación nacional con cultivos transgénicos para apoyar las necesidades del campo.

Los argumentos sin sustento científico de grupos antagónicos que consideran que el maíz transgénico no debe sembrarse en México, al ser nuestro país centro de origen y de diversificación de la planta, hacen muy difícil la aceptación de los señalamientos de este li-

bro acerca de que los maíces transgénicos no harán daño ni a las variedades nativas ni a los cultivos convencionales que hoy se utilizan. El planeta y el país pierden una gran oportunidad si los argumentos en contra permanecen y no se rebaten; si se toma casi como dogma que el polen transgénico causa daño a las variedades convencionales y nativas o por la posible incorporación de transgenes en las mismas. El planeta, y México en particular, se siguen contaminando peligrosamente por el uso irresponsable de insecticidas químicos, muchos de ellos carcinogénicos; sobre esto poco hablan grupos antitransgénicos como Greenpeace, supuestos defensores del medio ambiente.

Indudablemente habrá que hacer uso de todos los conocimientos y experiencias acumulados por agricultores mexicanos, de la investigación nacional en temas como la vulnerabilidad de los maíces tradicionales al cambio climático, de las experiencias en conservación de razas locales y de la extraordinaria riqueza de la biodiversidad mexicana para avanzar hacia un acuerdo que nos involucre a todos. Este esfuerzo permitiría estar mejor preparados para hacer frente a grandes demandas y problemas donde la biotecnología moderna y los cultivos transgénicos desempeñen un papel más significativo en beneficio de los campesinos mexicanos y de la sustentabilidad del medio ambiente.

No es la posición ni la recomendación de este libro propiciar la sustitución de los cultivos de los cuales México es centro de origen por cultivos transgénicos únicamente —lo que equivaldría a una homogenización en el cam-

po— sino de hacer ver cómo se plantea en el capítulo VIII: hay que sumar experiencias y conocimientos mexicanos, incluyendo el desarrollo de cultivos transgénicos nacionales y la riqueza de nuestra biodiversidad, para contender de manera inteligente con las grandes demandas, injusticias y problemas que enfrentamos y que se agravarán, así como enarbolar la defensa y la conservación de las variedades y cultivos de los que México es centro de origen.

Lamentablemente, la decisión de algunos jueces de impedir el cultivo de maíz transgénico y los intentos por bloquear la siembra de soya reducen las capacidades para producir alimento en México, máxime cuando parte del maíz que consumimos es transgénico e importado pues no producimos lo suficiente, mientras que cientos de millones lo consumen y utilizan en el norte. Afortunadamente, como se detalla en el capítulo VIII, contamos ya con variedades transgénicas extraordinarias desarrolladas en México para ayudar a contender con demandas y problemas que enfrentan los agricultores y el medio ambiente. Esperamos que se puedan utilizar en el planeta y en nuestro país.

Son muchos los apoyos a favor de la siembra de cultivos transgénicos, incluyendo 123 premios Nobel y las academias de ciencias de varios países. Es importante que la opinión pública y la sociedad mexicana se encuentren bien informadas de lo anterior para tomar las decisiones adecuadas. Por ello, en congruencia con estos amplios señalamientos de apoyo, por más de 15 años el Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias ha trabajado y sumado esfuerzos. Los miembros del comité hemos elaborado varios reportes, documentos

y libros sobre biotecnología y organismos transgénicos. Muchos de ellos pueden consultarse en acceso abierto, a fin de informar con sustento científico a la opinión pública, en las páginas electrónicas de la AMC y de algunas instituciones de educación superior e investigación científica donde laboran los integrantes del comité.

Bolívar et al., 2003; Ibarra et al., 2003; Ortiz y Ezcurrea, 2003; LBOGM, 2005: <http://www.conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/normatividad/vigente/LBOGM.pdf>; Badstue, et al., 2007; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Dev y Rao, 2007; Escenario Base 09-18, Sagarpa, 2009; Schnable et al., 2009; Vielle-Calzada et al., 2009; Faith et al., 2010; NASEM, 2010: <https://doi.org/10.17226/12804>; Bellon et al., 2011a; Bellon et al., 2011b; Bolívar et al., 2011; Jarvis et al., 2011; Solleiro y Castañón, 2013; Bellon, 2014; Burgeff et al., 2014; Panorama Agroalimentario Maíz 2015: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; reporte técnico Fundación Antama, 2016: www.fundacion-antama.org; Kniss, 2017

f) “No existen estudios económicos ni sociales sobre los beneficios de las plantas transgénicas en países como México. Tampoco hay evidencia de que las plantas transgénicas hayan incrementado la productividad.”

Respuesta:

El capítulo V explica los amplios beneficios económicos y sociales para los usuarios de tecnologías de plantas transgénicas. Éstas están diseñadas para contender con plagas de insectos y, simultáneamente, para dejar de comprar

y utilizar insecticidas químicos, ya que algunos causan cáncer y otros son neurotóxicos, todo esto en beneficio también de la sustentabilidad del planeta. Por su importancia y para contestar este señalamiento, se vuelve a comentar el estudio de Solleiro y Castañón, 2013, el cual indica que los agricultores en ocho países de Iberoamérica, incluyendo Argentina, Brasil, México y España, han sembrado plantas transgénicas como maíz y soya. Existe evidencia acerca de que los agricultores en estos países (excluyendo México) están adoptando la tecnología por los amplios beneficios a la salud, económicos y sociales que significa dejar de usar insecticidas químicos, muchos de los cuales son carcinogénicos.

Esto es congruente con el citado reporte sobre plantas desarrolladas por ingeniería genética de las NASEM, 2016, y con reportes previos de 2010 que subrayan los grandes beneficios para los usuarios de esta tecnología, no sólo en Estados Unidos sino también en países en vías de desarrollo como India. La experiencia de esta última con algodón transgénico indica que sus agricultores siembran este cultivo con grandes beneficios. Gracias a la decisión de sembrar algodón transgénico en México se recuperó parcialmente el cultivo de esta planta de gran importancia y se generaron beneficios a los agricultores de nuestro país, incluyendo reducir el uso de insecticidas químicos. Se insiste en que los beneficios a la salud, el medio ambiente, la biodiversidad y la sustentabilidad del planeta son claros, además del impacto económico favorable y la mejor calidad de vida de los agricultores, todo lo que redundará en beneficios sociales.

En relación al reclamo de que las plantas transgénicas no aumentan la productividad de las cosechas, la respuesta a este cuestionamiento es que ese no fue el propósito de las plantas transgénicas de primera y segunda generación, cuyo objetivo primario fue contender con plagas de insectos y reducir el uso de los insecticidas químicos, lo que efectivamente se logró. Dichas plantas no estaban explícitamente diseñadas para incrementar la productividad; sin embargo, dado que los agricultores que las siembran dejan de comprar insecticidas químicos, esto resulta en ganancias y una mayor productividad ya que se reducen pérdidas, como indican los reportes técnicos de Klümper y Quaim, 2014, presentados en el capítulo V. Las plantas transgénicas de tercera y cuarta generación podrán alcanzar el objetivo de incrementar la productividad mediante el uso de ingeniería de vías metabólicas que incluya varios genes, entre ellos los sintetizados químicamente.

Cabello et al., 2001; McDuffie et al., 2001; Trigo y Capp, 2006; Dev y Rao, 2007; Kontoleon et al., 2008; NASEM, 2010: <https://doi.org/10.17226/12804>; Band et al., 2011; Koutros et al., 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Alavanja et al., 2014; Brookes y Barfoot, 2014; Jones et al., 2014, Klümper y Qaim, 2014; Guyton et al., 2015; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; reporte técnico Fundación Antama, 2016: www.fundacion-antama.org

g) “Las compañías transnacionales, dueñas de semillas transgénicas y de pesticidas, propician el uso de monocultivos y controlan el mercado. Esto atenta contra la soberanía ali-

mentaria de México ya que la concentración de riqueza en pocas empresas podría incrementar las injusticias en el reparto de oportunidades de empleo y subsistencia.”

Respuesta:

En principio es importante aceptar que la agricultura intensiva es la fuente primaria de alimentos, pero también la actividad humana responsable de la mayor degradación y contaminación del medio ambiente, en especial la biodiversidad. El uso de monocultivos, incluyendo transgénicos impulsados por compañías transnacionales, reduce la oportunidad de conservar la biodiversidad. El uso de terrenos cada vez más grandes para siembra es el factor principal en la reducción de reservas de biodiversidad en el planeta, en particular en México.

Como contexto cabe señalar que el 90% de variedades mejoradas y de híbridos convencionales son manejados por las mismas empresas que venden semillas transgénicas, así que si existe el riesgo de perder soberanía alimentaria, esto sucedió hace más de 30 años cuando las multinacionales empezaron a dominar el mercado de semillas convencionales en nuestro país. La propiedad sigue repartida en pocas empresas. No es una situación que se haya generado con la introducción y uso de semillas transgénicas ni implica solamente a las plantas transgénicas. Por esta razón, es fundamental destacar que para México es estratégico desarrollar sus propias variedades de cultivos transgénicos de tercera generación (y de otros tipos), como parte de una política de Estado para una producción de alimentos más justa, ventajosa, sustentable y en protec-

ción de la biodiversidad. Esto se presenta en el capítulo VIII.

Asimismo, existen compañías transnacionales interesadas en comercializar estas variedades que son propietarias de plantas transgénicas de primera y segunda generación que hoy se utilizan en el mercado internacional, incluyendo soya y algodón en México. Existe una competencia comercial por la producción de alimento entre dichas compañías y las compañías transnacionales productoras de pesticidas químicos que se utilizan para contender con plagas de insectos y de malezas en muchos lugares del mundo, incluyendo México.

Un escenario que ilustra una oportunidad para el uso de variedades transgénicas es que las patentes de varias semillas transgénicas de primera generación que permiten resistencia a varios insectos plaga, pertenecientes a compañías transnacionales, están por vencer, ya que las plantas transgénicas empezaron a utilizarse comercialmente en 1996. Esta situación es muy relevante y representa una verdadera oportunidad (ver capítulo VIII) en cuanto al diseño de variedades transgénicas propias de México y a alternativas de desarrollo nacional para la producción sustentable de alimentos, habida cuenta de un escenario global muy delicado que enfrenta los desafíos del cambio climático, contaminación del medio ambiente y demanda creciente por alimentos sanos. Es fundamental sumar conocimientos, capacidades y experiencias sobre variedades de plantas nativas y mejoradas, incluyendo transgénicas, que existen en México y en el mundo para contender de manera sustentable, concertada, inteligente y responsable con estos grandes problemas y con

demandas presentes y futuras. Evidentemente, esto se enmarca en el ánimo de lograr un mejor reparto de oportunidades, empleo y subsistencia en el campo mexicano, a fin de reducir las injusticias que perviven en él.

Jacobson et al., 2013; Solleiro y Castañón, 2013; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>

h) “El uso oligopólico de pocas semillas transgénicas, propiedad de empresas transnacionales, podría ocasionar una emergencia por la aparición de plagas de insectos difíciles de controlar en ausencia de variedades nativas de las que se pueda obtener resistencia a ciertas plagas.”

Respuesta:

La resistencia de plantas a plagas de insectos, mediada por insecticidas biológicos o químicos, es un fenómeno natural que ha ocurrido a lo largo de los tiempos y que seguirá ocurriendo. Las plantas (y en general todos los seres vivos, en particular las bacterias) tienen la capacidad de generar cambios en su material genético que les otorga resistencia a insecticidas y antibióticos. El capítulo II señala que los organismos sufrimos mutaciones, es decir, cambios en el ADN. Algunos de estos cambios (como expone el capítulo IX) han permitido nuevas funciones a diferentes organismos mediante la transferencia horizontal de fragmentos de ADN de diversos orígenes. Así, las bacterias tienen la capacidad de adquirir resistencia a antibióticos gracias a la incorporación de fragmentos de ADN. Las plantas también han adquirido nuevas capacidades a través de la

transferencia horizontal de ADN y la posterior reorganización del genoma vegetal, y también tienen la capacidad de adquirir resistencias a insecticidas y a herbicidas.

Las plantas transgénicas de primera generación tienen un gen proveniente de la bacteria *Bacillus thuringiensis* que les confiere resistencia a ciertos insectos plaga. Una amplia variedad de genes provenientes de esa bacteria (y de otras) les proporcionan resistencia contra un insecto plaga específico, como consta en Ibarra y colaboradores, 2003. Existe una gama bien caracterizada de genes bacterianos aislados en México (y otros lugares) que se utilizan para desarrollar nuevas variedades de plantas transgénicas y enfrentar así la resistencia a diferentes insectos plaga. Ciertamente, existen también plantas nativas en nuestro país que son resistentes a insectos, y en su momento podrían utilizarse mediante el procedimiento de aislar y transferir los genes responsables (a plantas transgénicas, a variedades convencionales y a nativas) para hacer frente a alguna posible emergencia generada por resistencia a insectos que no pudieran haber sido controlados con las proteínas insecticidas de *B. thuringiensis*.

Ibarra et al., 2003; Solleiro y Castañón, 2013; Blanco et al., 2014; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>

PRINCIPALES ACCIONES EN CONTRA DE CULTIVOS TRANSGÉNICOS EN MÉXICO EN UN CONTEXTO INTERNACIONAL

Las acciones basadas en supuestos daños atribuidos a los cultivos transgénicos, a sus productos y al glifosato que se usa para eliminar



Figura VI.4. Debe reducirse la aplicación y la exposición a insecticidas químicos, muchos de ellos carcinogénicos, en beneficio de campesinos, del medio ambiente y la biodiversidad.

malezas no tienen sustento científico, como se ha documentado ampliamente en este capítulo y en el IV. Muchos señalamientos al respecto son falsos, parciales, obsoletos y no toman en consideración las amplias evidencias de ausencia de daño al medio ambiente, a la biodiversidad, a la salud por su consumo ni los contundentes beneficios señalados reiteradamente en este libro. Entre las acciones en

contra ya mencionadas notamos los amparos individuales y colectivos ante el poder judicial para impedir y bloquear la siembra de cultivos transgénicos. Una demanda colectiva que data de 2013 hace que sea imposible sembrar maíz transgénico en nuestro país; entre otros argumentos se menciona que éste causa daño a la salud, lo cual es falso y no tiene sustento.

Ciertos amparos en contra de la siembra de

soya en varios estados del sureste del país han sido atraídos por la SCJN. Su propósito es prohibir, bloquear, retrasar y obstaculizar el uso de cultivos transgénicos, aunque a diferencia del maíz México no es centro de origen de la soya, y esto, de nuevo, va en detrimento de los campesinos. Es posible que la SCJN considere que algunas comunidades que siembran transgénicos no hayan sido consultadas sobre su uso. En tal caso debería suspenderse el permiso otorgado para la siembra de algodón o soya en esa comunidad. Estamos de acuerdo en que la consulta proceda, conforme a la LBOGM. Sin embargo, la suspensión del permiso debería aplicarse solamente a las comunidades no consultadas, toda vez que después de la consulta el permiso podría restituirse si la comunidad avala su uso. Se insiste en que las agencias y autoridades responsables de la inocuidad y la seguridad alimentaria de varios países, incluyendo México, no han retirado ningún cultivar transgénico de los que se consumen actualmente, como tampoco han modificado las concentraciones de glifosato que se usa para eliminar malezas. El glifosato, se reitera, debe usarse responsablemente en las condiciones aprobadas. Como se ha destacado, el reciente estudio de Kniss, 2017, señala contundentemente que el glifosato que se utiliza en Estados Unidos para la producción de cultivos transgénicos y convencionales es un herbicida de muy baja toxicidad. Los herbicidas deben usarse necesariamente para eliminar malezas que compiten por nutrientes con los cultivos, y el glifosato es por mucho el más benigno.

Otras acciones en contra se encuentran a nivel del poder legislativo. Ha habido va-

rias de ellas; existen algunas iniciativas en las dos cámaras del Congreso de la Unión para modificar la LBOGM y su reglamento. El propósito de estas iniciativas es hacer todavía más restrictivo, más complicado económica y administrativamente el desarrollo nacional y el uso de transgénicos. Diferentes actores cuyo objetivo es impedir el uso de transgénicos han lanzado pronunciamientos que pudieran convertirse en iniciativas de ley ante el Congreso de la Unión, buscando hacer de México “una nación libre de transgénicos”, lo cual es imposible porque los transgénicos y sus productos existen y se comercializan en todos lados.

En este sentido es alarmante, sorprendente y preocupante la decisión de octubre de 2016 del poder ejecutivo del gobierno de Yucatán para elaborar y publicar el decreto 418/2016, “por el que se declara al estado de Yucatán zona libre de cultivos agrícolas con organismos genéticamente modificados.” Se reitera que los supuestos daños a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad por los OGM, incluyendo los señalados en dicho decreto, son carentes de sustento científico y en muchos casos falsos. Entre las razones que motivan este decreto está que los apicultores de Yucatán han perdido la posibilidad de comercializar miel por la supuesta presencia de polen de soya transgénica por arriba de los límites permitidos para etiquetarlos como orgánicos o libres de transgénicos. Afortunadamente, los cambios en la interpretación de la legislación de la normativa europea indican que no será necesario etiquetar la miel, ya que el polen no es considerado ingrediente sino un componente natural de ella. Lo anterior evitará que los apicultores se

vean limitados por acopiadores y exportadores para exportar la miel. Es importante señalar que este no es un asunto de bioseguridad —puesto que la soya transgénica no contamina la miel ni daña la salud— sino una disputa comercial por el control y acopio del alimento. Además, como se señala en el capítulo anterior, las plantas transgénicas y sus productos no tienen efectos negativos, sino todo lo contrario, sobre insectos no blanco, como es el caso de las abejas y otros insectos benéficos.

También hay que considerar las acciones de algunas ONG, en especial Greenpeace. Ésta, junto a otras ONG y grupos activistas como los integrantes de la así llamada “Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad” —como si la mayor parte de los científicos no lo estuviéramos— han demandado en diferentes espacios la cancelación de los transgénicos y sus productos. Los argumentos son los mismos; carecen de sustento científico, muchos de ellos son falsos, parciales y sin contexto verdadero acerca de las ventajas y beneficios que los usuarios obtienen al adoptar transgénicos. Finalmente, la declaración firmada por 123 premios Nobel a favor de las plantas transgénicas y la biotecnología está dirigida a Greenpeace y a otras instancias como la ONU y los gobiernos de la comunidad internacional. Así, resulta innegable la miopía y la visión limitada, patética y sospechosa de Greenpeace, de los grupos activistas señalados y de algunos gobiernos ante la contundente evidencia científica. Denostar a los transgénicos constituye una posición peligrosa y delicada para el planeta y la sociedad, al igual que impedir su uso en detrimento de la sustentabilidad del planeta y de los más pobres.

Por todo lo anterior queda claro que subsisten visiones limitadas, parciales y basadas en argumentos en muchos casos falsos en contra de los transgénicos. Son utilizadas por ONG, grupos e individuos que tienen acceso a medios para seguir satanizando y denostando a los transgénicos, generando alarmas falsas y perversas. Es injusto y lamentable que, existiendo amplios y probados beneficios de los cultivos transgénicos, incluyendo ausencia de daño a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad, los campesinos de México no tengan la oportunidad de usar cultivos transgénicos debido a los amparos interpuestos, oportunidad que sí tienen los campesinos de muchos otros países como Estados Unidos y varios iberoamericanos como Argentina, Brasil y España.

Dev y Rao, 2007; NASEM, 2010: <https://doi.org/10.17226/12804>; Solleiro y Castañón, 2013; Brookes y Barfoot, 2014; Klümper y Qaim, 2014; Decreto 418/2016 del estado de Yucatán, 2016; EFSA, 2012; EFSA, 2016; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; reporte técnico Fundación Antama, 2016: www.fundacion-antama.org; Kniss, 2017

CONCLUSIONES SOBRE LOS CUESTIONAMIENTOS EN CONTRA DEL USO Y LA SIEMBRA DE PLANTAS TRANSGÉNICAS POR SUS SUPUESTOS DAÑOS

Se concluye señalando que las publicaciones con argumentos en contra del uso de cultivos transgénicos y sus productos no tienen sustento científico sólido, en particular los libros de Álvarez Bullya y de Druker, los cuestionamientos de diferentes grupos y de organizacio-

nes como Greenpeace que cotidianamente aparecen en prensa e internet. No hay evidencia importante de daño documentado a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad; a pesar de esto algunos opositores son muy activos y ciertas publicaciones muy adversas.

Resulta insostenible e inaceptable la premisa de que como humanos no tenemos derecho a modificar los organismos vivos por los supuestos daños y riesgos que algunos señalan, pues se estaría renunciando al desarrollo de mejores sistemas biológicos como las plantas transgénicas, las cuales son muy similares a los cultivos convencionales como se ha demostrado a lo largo de este capítulo, y están diseñadas para atender diferentes problemáticas y demandas.

Como se comenta en este capítulo y en el IV, no hay evidencia científica de daño a la salud humana y animal por el consumo de plantas transgénicas, cultivadas algunas, mas no la mayoría, con apoyo de glifosato para eliminar malezas. Miles de millones de animales y cientos de millones de seres humanos, incluyendo mexicanos, nos hemos alimentado desde hace más de 20 años con ellas, puesto que el 70% del maíz que se consume en México es de origen transgénico y se importa de Estados Unidos como parte de los productos genéticamente modificados que se comercializan. Estos cultivos transgénicos, se insiste, se producen utilizando glifosato y otros herbicidas para contener con malezas. En Estados Unidos sólo el 26% y el 43% del total de variedades —transgénicas y convencionales, donde las transgénicas representan más del 90%— de maíz y soya, respectivamente, se producen utilizando glifosato; ciertamente un herbicida de muy baja toxicidad

como se ha señalado en este capítulo. Por ello, el glifosato es más seguro para la salud y el medio ambiente que otros y debería seguir usándose en las condiciones aprobadas. En vista de las razones expuestas, pensamos que es mucho más seguro consumir cultivares transgénicos provenientes de Estados Unidos —y de hecho muchos lo hacemos y recomendamos.

En México también se cultivan algodón y soya transgénicos —y la última se consume en el país—, ambas propiedad de empresas transnacionales y producidas con el uso de glifosato. El cultivo de transgénicos y la utilización de glifosato han sido rechazados en nuestro país no obstante el hecho de que es un herbicida de muy baja toxicidad. Por ello el rechazo a utilizarlo en condiciones adecuadas es absurdo y carece de sustento sólido. En cuanto al problema de la calidad de los alimentos en nuestro país, se insiste en que no existe la garantía de que los granos convencionales producidos en México estén libres de insecticidas químicos —algunos de ellos carcinogénicos— empleados para contener con plagas de insectos.

Varios artículos que presentan metaanálisis (agrupados en diferentes revisiones de la literatura de varias decenas de artículos científicos arbitrados) muestran la ausencia de daño en los múltiples animales alimentados con transgénicos durante largos periodos. Entre éstos destaca el artículo de Ricroch y colaboradores, 2014, en el que se hace una revisión de 44 artículos arbitrados utilizando nueve diferentes cosechas transgénicas como alimento para diferentes animales por periodos de 90 días, conforme lo mandatan las autoridades de seguridad e inocuidad, en particular la EFSA.

Ya que este análisis también toma en cuenta 60 opiniones de la EFSA, implica entonces que 104 documentos provenientes de diversos países sustentan la inocuidad y seguridad en la alimentación con cultivos transgénicos y productos derivados durante periodos largos. No se conoce cuáles y cuántos de estos experimentos utilizaron glifosato para eliminar malezas; sin embargo, los resultados obtenidos no reportan daño a los animales de los 44 experimentos. Por ello se puede concluir que los herbicidas para eliminar malezas, incluyendo glifosato, fueron utilizados bajo condiciones adecuadas y recomendadas.

Otro metaanálisis muy relevante en cuanto a las propiedades de los OGM es la publicación de Ricoch, 2013, donde se incluye la caracterización detallada por ciencias ómicas de decenas de trabajos de alimentación de animales con cultivares transgénicos. En los resultados se señala que no existen cambios importantes en los componentes de plantas transgénicas con relación a las plantas parentales generadas por métodos convencionales y que, por ello, son organismos metabólica y sustancialmente equivalentes. No se detectaron cambios importantes ni inesperados, ni tampoco no planeados del análisis por ciencias ómicas de las plantas transgénicas comparadas con los cultivos parentales.

En relación a la ausencia de daño y la equivalencia sustancial entre cultivares, por la importancia de uno de los autores del artículo, mencionamos que en la etapa final de preparación de este libro apareció un artículo de Mesnage y colaboradores, 2016, en el cual uno de los coautores es Séralini. En ese trabajo se utiliza

el mismo evento de maíz transgénico NK603 al que algunos de los autores, en un artículo de 2012, imputaron daño a los animales que lo consumieron, lo cual fue ampliamente desacreditado. El reporte de 2016 señala que el proceso de transformación genética en esa planta causa alteraciones que hacen dudar que la variedad transgénica sea sustancialmente equivalente a la línea parental que le dio origen. Se utilizaron métodos de ciencias ómicas. Los autores advierten que los niveles de 117 proteínas y 91 metabolitos están alterados en la variedad transgénica respecto a la parental. Si bien los autores usaron los resultados de estos experimentos para alertar, sin comparaciones adecuadas y de manera alarmante, argumentando que el maíz transgénico no es equivalente al convencional, lo verdaderamente sorprendente es que las diferencias sean tan pequeñas. Considerando que el maíz tiene potencial para producir más de 75,000 proteínas diferentes y decenas de miles de metabolitos, es de notarse que un número tan reducido de moléculas biológicas, 117 proteínas (0.1%) y 91 metabolitos (0.2%), hayan revelado un nivel ligeramente distinto respecto a su progenitor convencional. Por otro lado, no se detectaron cambios importantes, ni efectos no planeados ni inesperados del análisis por ciencias ómicas de este cultivar transgénico comparado con sus plantas parentales.

Como se ha expuesto reiteradamente, el trabajo de la Dra. Ricoch en el análisis entre variedades de maíz, o entre nuevas variedades generadas por mutágenos permitidos en las técnicas de mejoramiento tradicional, ha mostrado que las diferencias de las plantas transgénicas con las convencionales son me-

nores que las encontradas entre diferentes variedades de maíz o entre las obtenidas por mutagénesis, muchas de las cuales se utilizan comercialmente y se consumen desde hace años sin efectos para la salud. De lo anterior se concluye que el nuevo artículo de Mesnage, Séralini y colaboradores, más que alertar sobre cambios alarmantes en un producto transgénico, como pretendieron los autores, debe considerarse evidencia adicional a las decenas de artículos previamente analizados y comentados por Ricoch, en los que se utilizaron ciencias ómicas como método sofisticado de análisis para evaluar, y concluir, que las variedades transgénicas son metabólica y sustancialmente equivalentes en relación a las tradicionales y a las parentales. Asimismo, los trabajos de Herman y Price, 2013, y de Herman y colaboradores, 2017, sobre equivalencia composicional de maíces transgénicos y parentales, indican también que los transgénicos son muy parecidos a los padres y que tienen menos alteraciones que los híbridos tradicionales. Lo anterior es congruente con los trabajos de Ricoch, 2013, y de Ricoch y colaboradores, 2014.

Se recalca que las autoridades y agencias responsables de la seguridad e inocuidad alimentaria de diferentes países, incluyendo FDA, USDA, EFSA y Cofepris en México no han retirado del mercado ningún producto transgénico de los que actualmente se comercializan; aunque han surgido cuestionamientos en contra de diferentes plantas transgénicas que han motivado que algunas de estas agencias los reevaluaran, la decisión respecto a supuestos daños o a la inocuidad de estos alimentos se ha mantenido sin cambio. En México, como se señaló,

se importan maíz y soya transgénicos desde su comercialización; el maíz amarillo, por su parte, se utiliza principalmente como alimento de animales y para procesamiento, aunque también se usa como alimento por humanos, y Cofepris ha dado autorización para la importación de estos granos transgénicos, conforme a la Ley General de Salud y la LBOGM.

Como se ve, todos los cuestionamientos carecen de sustento científico pues se apoyan principalmente en el artículo de 2012 de Séralini y colaboradores que ha sido ampliamente descalificado por academias de ciencia y medicina de muchos países, incluyendo Francia, país de origen del trabajo. El capítulo IV explica a detalle los elementos que sustentan la inocuidad de cultivares transgénicos, algunos de ellos producidos en presencia de glifosato para eliminar malezas. Además, las agencias y autoridades responsables de calificar la inocuidad y seguridad de los alimentos han seguido autorizando el uso de glifosato para eliminar las malezas que compiten por nutrientes con las plantas. Por ser un agroquímico de muy baja toxicidad comparado a la mayoría de los otros herbicidas, el glifosato se sigue usando y debe usarse bajo las condiciones aprobadas.

Respecto a otros señalamientos, se ha demostrado que las principales plagas de insectos que existen en México son susceptibles a los cultivares transgénicos que se utilizan y siembran en nuestro país. Los detractores de los OGM argumentan que el maíz transgénico “contamina”, pone en riesgo y daña los maíces nativos de los que México es centro de origen. No hay ninguna evidencia científica reportada que indique que el maíz transgénico “contami-

ne”, ponga en riesgo o dañe las 60 variedades de maíces nativos y sus parientes cercanos. Tampoco hay evidencia de daño por la coexistencia de maíces transgénicos con otras variedades de híbridos convencionales. Nuevamente se trata de intentos para denostar y satanizar a los transgénicos.

En relación a la aseveración de que el flujo génico mediado por granos de polen de maíz transgénico daña o contamina la planta receptora nativa, se indica que en principio es perfectamente factible que el transgén presente en el polen pueda fecundar el óvulo de la planta receptora a la que arribó por transferencia vertical (de padres a hijos) de ADN, de la misma manera en que las plantas adquieren genes o alelos que les proporcionan nuevas características mediante estos eventos. Si estas características representan ventajas para la planta o le confieren propiedades que el agricultor selecciona favorablemente, éstas se pueden fijar en la población y entonces ocurre una introgresión. El flujo de genes, fragmentos de ADN que existen en todos los organismos vivos, es un proceso natural y no representa *per se* un efecto adverso. Si la característica que le confiere la presencia de un transgén a la progenie que lo porta favorece su adecuación, aquella se puede seleccionar y mantener. Si por el contrario la característica no es adaptativa o no representa un atributo deseable para el agricultor, ésta no se seleccionará y se eliminará de la población. El proceso de transferencia horizontal de ADN al que llamamos transgénesis, como se detalla en el capítulo IX, ha permitido por un lado la construcción de organismos transgénicos que llevan transgenes específicos, así como la adquisición

de nuevas funciones en seres vivos integrantes de la biota a lo largo del tiempo. Sin embargo, se recalca que la transgénesis sucede poco hoy en día, ya que las células de todos los organismos vivos cuentan con capacidades para eliminar el material genético foráneo.

La generación de malezas resistentes a herbicidas es otro de los señalamientos en contra del uso de plantas transgénicas, ligado al flujo de genes mediado por polen. Este es el caso de transferencia de genes que confieren resistencia a herbicidas hacia malezas emparentadas a los cultivos de plantas transgénicas que portan tal característica. Como se ha indicado, en el caso de genes de resistencia a herbicidas presentes en el polen transgénico, es posible que esto ocurra mas no necesariamente acarrea daño para la planta donadora, ni efectos directos en el pariente silvestre si éste no se encuentra sujeto a la presión de selección dada por la presencia del herbicida. Sólo en caso de que el pariente silvestre sea ya una maleza que se controla en el ambiente agrícola se podría requerir el uso de herbicidas con un compuesto activo diferente. Un trabajo reciente indica la evidencia de transferencia de genes que confieren resistencia a herbicidas entre cultivares no transgénicos y sus malezas emparentadas. Esto demuestra que la transferencia de genes con resistencia a herbicidas ha ocurrido en la naturaleza y seguirá ocurriendo independientemente de la existencia o no de cultivares transgénicos.

Se insiste en que no hay daño por la coexistencia entre plantas transgénicas y variedades convencionales. En muchos países existe una verdadera agricultura de coexistencia desde hace años. Como se ha señalado de manera



Figura VI.5. Cultivares de soja transgénica en varios países del mundo, nueve de Iberoamérica, entre ellos Argentina, Brasil, México y España. Los agricultores y campesinos de estos países iberoamericanos están adoptando esta tecnología por los amplios beneficios que implica su utilización.

reiterada, muchos usuarios han adoptado la tecnología de plantas transgénicas de primera y segunda generación, las cuales fueron diseñadas para contender con plagas de insectos y simultáneamente reducir el uso de insecticidas químicos pues esto provee importantes beneficios —incluso económicos— para los usuarios y para la sustentabilidad del planeta.

Respecto a la propiedad de plantas transgénicas en manos de pocas compañías transnacionales, hay que recordar que el 90% de las varie-

dades mejoradas y los híbridos convencionales son manejados por las mismas empresas que venden semillas transgénicas, así que si existe riesgo de perder soberanía alimentaria, esto sucedió hace más de 30 años cuando las empresas multinacionales empezaron a dominar el mercado de semillas convencionales en nuestro país. La propiedad sigue repartida entre pocas empresas; esta situación no aplica solamente a los cultivares transgénicos. Se hace énfasis que existe la oportunidad de aprovechar el venci-

miento de las patentes de la primera generación de plantas resistentes a plagas de insectos, y de la importancia del uso de plantas transgénicas mexicanas con propiedades extraordinarias que permitan hacer frente a los problemas y demandas actuales y futuras, toda vez que se inscriben en una estrategia de producción sustentable de alimentos. Deben considerarse las experiencias adquiridas y la capacidad presente en el campo —incluyendo las plantas transgénicas— que permitirán disminuir las injusticias del sector agrícola mexicano.

Lamentamos las acciones para bloquear cultivos transgénicos en México por parte de ciertos grupos muy activos. Los amparos y demandas ante el poder judicial, incluyendo la SCJN, por supuestos daños a la salud y al medio ambiente de los cultivos transgénicos y del glifosato han bloqueado la siembra de maíz, además de que intentan imponer mayores obstáculos a la siembra de soya y algodón, incluyendo aquellos de carácter jurídico/administrativo. Insistimos en que no hay evidencia de daño a la salud ni al medio ambiente por las plantas transgénicas ni por el uso responsable del glifosato, herbicida de muy baja toxicidad que se utiliza para eliminar malezas, pues otros herbicidas son mucho más tóxicos. Dado que es imperativo eliminar las malezas, el glifosato es la mejor opción con la que contamos por su muy baja toxicidad. Pensamos que es desafortunado, injusto e inhumano que los agricultores y campesinos en México no tengan las alternativas tecnológicas de otros agricultores en países de Iberoamérica como Brasil, Argentina, Honduras, Paraguay y España, lo que va en detrimento de su salud y calidad de vida. Esto también viola el derecho a la tecnología del

que los campesinos de otros países se benefician, mas no es el caso en México. Es importante que los funcionarios públicos de los poderes judicial, legislativo y ejecutivo cuenten con información sustentada en el conocimiento científico que indica ausencia de daño a la salud y al medio ambiente, así como los amplios beneficios de los transgénicos y sus productos, para sustentar sus decisiones y no estar sujetos a la presión de grupos, activistas e intereses.

En este sentido también lamentamos la decisión del gobierno del estado de Yucatán de buscar convertir ese estado, por decreto, en uno libre de cultivos transgénicos con base en señalamientos parciales, y algunos ciertamente falsos, como el daño a la salud por el consumo de cultivos transgénicos y sus productos. Nuevamente los campesinos son los más afectados, en este caso los de Yucatán. Este decreto ha sido impugnado ante la SCJN por la Oficina de la Presidencia de la República. Se insiste en que las agencias y autoridades responsables de la seguridad e inocuidad alimentaria de varios países no sólo no han retirado del mercado ninguna planta transgénica, sino tampoco han modificado las concentraciones del glifosato que se utiliza para eliminar malezas. No obstante, es necesario que este herbicida se utilice en el campo en las condiciones aprobadas ya que su abuso y uso irresponsable puede generar daños, como cualquier otra tecnología.

Los transgénicos están desgraciadamente satanizados por ignorancia, falta de información y por intereses de tipo político, económico y emocional basados en argumentos obsoletos, parciales, fuera de contexto y falsos en ciertos casos. No hay evidencia científica que avale

el daño de los productos transgénicos por supuestos daños a la salud, al medio ambiente y la biodiversidad, en particular las plantas y sus productos, como ha sido mencionado por grupos detractores. Distintos grupos antagónicos consideran que el maíz transgénico no debe sembrarse en México por ser nuestro país centro de origen y de diversificación de esta planta. Esto hace muy difícil la aceptación que este libro reitera acerca de que los maíces transgénicos no hacen daño, no contaminan las variedades nativas ni los cultivos convencionales que hoy se utilizan; que, de hecho, en muchos países existe una agricultura de coexistencia entre cultivos tradicionales y transgénicos que ha creado ciertos beneficios.

El planeta y el país pierden una gran oportunidad si permanecen ideas y visiones erróneas, limitadas y retrógradas, si se aceptan casi como dogma señalamientos de que el polen transgénico causa daño a variedades convencionales o nativas por la posible incorporación de transgenes en plantas convencionales. Ciertamente habrá que echar mano de los conocimientos y las experiencias acumuladas por agricultores mexicanos, de la importante investigación sobre vulnerabilidad de maíces tradicionales ante el cambio climático que poseemos, de las experiencias en conservación de razas locales y de la

extraordinaria riqueza de la biodiversidad de este país para avanzar hacia acuerdos que nos permitan estar mejor preparados para contender con grandes demandas y problemas, nacionales y globales, como señala el capítulo VIII. Mencionamos en particular el desarrollo de plantas transgénicas que permitan reducir el uso de herbicidas en el campo como el glifosato y cultivares resistentes a heladas, donde la biotecnología moderna y los cultivares transgénicos de tercera generación —en especial los desarrollados en nuestro país— deberían desempeñar un papel más importante en beneficio de los campesinos y de la sustentabilidad del medio ambiente.

No es la posición ni la recomendación de este documento propiciar la sustitución de cultivos de los que México es centro de origen por cultivos transgénicos únicamente, lo que supondría una homogenización en el campo. La propuesta es sumar experiencias y conocimientos desarrollados en este país, incluyendo cultivos transgénicos, que aunados a la riqueza de nuestra biodiversidad nos ayuden a enfrentar de manera inteligente y con ventajas las demandas y problemas extraordinarios que hoy tenemos y que seguramente se agravarán, entre ellos los efectos del cambio climático y la defensa y conservación de las variedades y cultivos de los cuales México es centro de origen.



Figura VI.6. Miles de millones de animales en Estados Unidos y en otros países han sido alimentados con granos transgénicos durante más de 20 años sin daño a la salud. Cientos de millones de seres humanos también consumimos granos y muchos otros productos transgénicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alavanja M.C.R. *et al.* 2014. Non-Hodgkin lymphoma risk and insecticide, fungicide and fumigant use in the agricultural health study. *Plos One* 9(10): e109332.
- Allis C.D., Jenuwein T. 2016. The molecular hallmarks of epigenetic control. *Nature Reviews Genetics* 17: 487–500.
- Allis C.D., Jenuwein T., y Reinberg D. 2007. Epigenetics. Cold Spring Harbor, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York.
- Badstue L.B. *et al.* 2007. The dynamics of seed flow among small-scale maize farmers in the Central Valley of Oaxaca, Mexico. *World Development* 35: 1579–1593.
- Band P.R. *et al.* 2011. Prostate cancer risk and exposure to pesticides in British Columbia farmers. *Prostate* 71(2): 168–183.
- Bellon M.R. 2014. Conserving landraces and improving livelihoods: how to assess the success of on-farm conservation projects? *International Journal of Agricultural Sustainability* 13(2): 167–182. DOI: 10.1080/14735903.2014.986363.
- Bellon M.R., Hellin J. 2011a. Planting hybrids, keeping landraces: Agricultural modernization and tradition among small-scale maize farmers in Chiapas, Mexico. *World Development* 39: 1434–43.
- Bellon M.R., Hodson D., Hellin J. 2011b. Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *PNAS* 108: 13432–13437.
- Blanco C.A. *et al.* 2014. Maize pests in Mexico and challenges for the adoption of integrated pest management programs. *J. Integr. Pest Manag.* 5(4): E1-E9. DOI: 10.1603/IPM14006
- Bolívar F. *et al.* 2003. Recomendaciones para el desarrollo y consolidación de la Biotecnología en México. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.). Conacyt, Academia Mexicana de Ciencias, Comisión Intersecretarial de Bioseguridad y Organismos Genéticamente Modificados, Instituto de Biotecnología/UNAM.
- Bolívar F. *et al.* 2007. Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.). El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, 2ª edición, Ciudad de México.
- Bolívar F. *et al.* 2011. Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados. Comité de Biotecnología. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Academia Mexicana de Ciencias Ciudad de México.
- Brookes G. *et al.* 2004. Genetically modified maize: pollen movement and crop co-existence. *PG Economics*.
- Brookes G., Barfoot P. 2004. Co-existence in North American agriculture: can GM crops be grown with conventional and organic crops? *PG Economics Ltd*.
- Brookes G., Barfoot P. 2014. Economic impact of GM crops: The global income and production effects 1996-2012. *GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 5(1): 65–75.
- Cabello G. *et al.* 2001. A rat mammary tumor model induced by the organophosphorous pesticides parathion and malathion, possibly through acetylcholinesterase inhibition. *Environ. Health Perspect.* 109(5): 471–479.
- Caplan A. *et al.* 1983. Introduction of genetic material into plant cells. *Science* 222(4625): 815–821.
- Clive J. 2014. ISAAA. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2014. Brief No. 49 ISAAA. Ithaca, New York.
- Coen E. 1999. The Art of Genes: How Organisms Make Themselves. Oxford University Press.
- Cong L. *et al.* 2013. Multiplex genome engineering using CRISPR. *Science* 339: 819–823.
- Crisp A. *et al.* 2015. Expression of multiple horizontal acquired genes is a hallmark of both vertebrate and invertebrate. *Genome Biology* 16(50).
- Cubas P., Vincent C., Coen E. 1999. An epigenetic mutation responsible for natural variation in floral symmetry. *Nature* 401(6749): 157–161.
- Darwin C. 1859. On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life, 1st edition, John Murray, London.
- Darwin C. 1868. The variation of animals and plants under domestication, 1st edition, John Murray, London.
- Darwin C. 1876. The effects of cross and self fertilization in the vegetable Kingdom. John Murray, London.
- De Souza N. 2013. RNA-guided gene editing. *Nature Methods* 10(3): 189.
- Dev S.M., Rao N.C. 2007. Socio economic impact of Bt Cotton. Monograph No 3. Hyderabad. Centre for Economic and Social Studies (CESS).
- EFSA (European Food Safety Authority). 2011. Guidance on conducting repeated-dose 90-day oral toxicity study in rodents on whole food/feed. *EFSA J.* 9(12): 2438. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2011.2438/epdf>
- EFSA (European Food Safety Authority). 2012. Final review of the Séralini *et al.* (2012a) publication on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603 as published online on 19 September 2012 in Food and Chemical Toxicology. *EFSA J.* 10(11): 2986. www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf
- EFSA (European Food Safety Authority). 2016. Modification of existing maximum levels of residue levels of glyphosate in borage and corn gromwell seeds. *EFSA J.* 14(4): 4468, 20 pp. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2016.4468/epdf>
- Eichten S.R. 2011. Heritable epigenetic variation among maize inbreds. *PLOS Genetics*. <http://d>

- doi.org/10.1371/journal.pgen.1002372
32. Eichten S.R., Schmitz R.J., Springer N.M. 2014. Epigenetics: beyond chromatin modifications and complex genetic regulation. *Plant Physiology* 165: 933–947.
 33. Escenario Base 09–18. Proyecciones para el sector agropecuario. 2009. Sagarpa, México. www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Escenariobase09.pdf
 34. European Commission. 2003. Commission recommendation on guidelines for the development of national strategies and best practices to ensure the coexistence of genetically modified crops with conventional and organic farming. *Official Journal of the European Union* L189/36. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003H0556&rid=1>
 35. Faith D.P. et al. 2010. Evosystem services: An evolutionary perspective on the links between biodiversity and human well-being. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2: 1–9.
 36. FDA (U.S. Food and Drug Administration). 2013. Biotechnology Consultation Note to the File BNFNo.000133. http://cera-gmc.org/files/cera/GmCropDatabase/decdocs/DAS444066/DAS444066_soybean_US_food_feed.pdf
 37. FDA (U.S. Food and Drug Administration). 2015. Biotechnology Consultation Note to the File BNF No.000141. www.fda.gov/food/ingredientpackaginglabeling/geplants/submissions/ucm436173.htm
 38. Folloni S. et al. 2012. Detection of airborne genetically modified maize pollen by real-time PCR. *Molecular Ecology Resources* 12: 810–821.
 39. Fuentes I. et al. 2014. Horizontal genome transfer as an asexual path for the formation of new species. *Nature* 511: 232–235.
 40. Gilbert L.A. et al. 2014. Genome-scale CRISPR-mediated control of gene repression and activation. *Cell* 159(3): 647–661.
 41. Gray E. et al. 2011. Coexistence of GM and non-GM crops with endogenously determined separation. *Ecological Economics* 70: 2486–2493.
 42. Graziano M. et al. 2011. On the regulation of spatial externalities: coexistence between GM and conventional crops in the EU and the “newcomer principle”. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 55: 126–143.
 43. Gustafsson A. 1979. Linnaeus’ Peloria: The history of a monster. *Theoretical and Applied Genetics* 54(6): 241–248.
 44. Guyton K.Z. et al. 2015. Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon and glyphosate. *The Lancet Oncology* 16(5): 490–491.
 45. Haig D. 2004. The (dual) origin of epigenetics. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 69(0): 67–70.
 46. Hannon G.J. 2003. RNAi: A guide to gene silencing. Cold Spring Harbor, Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York.
 47. Heitz E. 1928. Das Heterochromatin der Moose. *Jahrb Wiss Bot* 69: 762–818.
 48. Herman R.A. et al. 2017. Stacking transgenic event DAS-01507-1 alters maize composition less than traditional breeding. *Plant Biotechnology Journal*. 1–9. DOI: 10.1111/pbi.12713.
 49. Herman R.A., Price W.D. 2013. Unintended compositional changes in Genetically Modified (GM) crops: 20 years of research. *J. Agric. Food Chem.* 61(48): 11695–11701.
 50. Herrera Estrella L., Martínez M. 2007. Plantas Transgénicas. En: *Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna*. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.). El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, 2ª edición, 167–194, Ciudad de México.
 51. Ibarra J., Soberón M., Bravo A. 2003. La biotecnología y el control biológico de insectos. En: *Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3. Biotecnología Agrícola*. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.). El Colegio Nacional, Ciudad de México.
 52. Jacobson S.E. et al. 2013. Feeding the world: genetically modified crops versus agricultural biodiversity. *Agron. Sustain. Dev.* 33: 651–666.
 53. Jarvis D.I. et al. 2011. An heuristic framework for identifying multiple ways of supporting the conservation and use of traditional crop varieties within the agricultural production system. *Critical Reviews in Plant Sciences* 30: 125–176.
 54. Jenuwein T. 2001. Translating the Histone Code. *Science* 293(5532): 1074–1080.
 55. Jinek M. et al. 2012. A programmable dual RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337: 816–821.
 56. Jinek M. et al. 2013. RNA programmed genome editing in human cells. *eLife* 2, e00471.
 57. Jones R.R. et al. 2014. Incidence of solid tumors among pesticide applicators exposed to the organophosphate insecticide diazinon in the agricultural health study: an updated analysis. *Occup. Environ. Med.* 72: 496–503.
 58. Keese P. 2008. Risks from GMOs due to horizontal gene transfer. *Environ. Biosafety Res.* 7: 123–149.
 59. Kermicle J.L. 1970. Dependence of the R-mottled aleurone phenotype in maize on mode of sexual transmission. *Genetics* 66(1): 69–85.
 60. Kleinstiver B.P. et al. 2015. Engineering CRISPR-Cas nucleases with altered PAM specificities. *Nature* 523 (7561): 481–485.
 61. Kling J. 1996. Could transgenic supercrops one day breed superweeds? *Science* 274: 180–181.
 62. Klümper W., Qaim M. 2014. A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops *Plos One* 9(11): e111629. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>
 63. Kniss A. 2017. Long-term trends in the intensity and relative toxicity of herbicide use. *Nature Communications*. DOI: 10.1038/ncomms14865.
 64. Kontoleon A. et al. 2008. Agrobiodiversity and economic development. A. Kontoleon, U. Pascual, M. Smale (Eds.). Routledge, 427, London.
 65. Koutros S. et al. 2013. Risk of total and aggressive prostate cancer and pesticide use in the agricultural health study. *Am. J. Epidemiol.* 177(1): 59–74.
 66. Kyndt T. et al. 2015. The genome of cultivated sweet potato contains *Agrobacterium* T-DNAs with expressed genes: An example of a naturally transgenic food crop. *PNAS* 112: 5844–5849.
 67. Langhof M. et al. 2010. Coexistence in maize: Isolation distance in dependence on conventional maize field depth and separate edge harvest. *Crop Science* 50: 1496–1508.
 68. Laureates Letter Supporting Precision Agriculture (Declaración de premios Nobel en apoyo a la agricultura de precisión). 2016 http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html
 69. Law J.A., Jacobsen S.E. 2010. Establishing, maintaining and modifying DNA methylation patterns in plants and animals. *Nature reviews* 11: 204–220.
 70. LBOGM (Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados). 2005. www.

- conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/normatividad/vigente/LBOGM.pdf
71. Mali P. *et al.* 2013. RNA-guided human genome engineering via Cas 9. *Science* 339: 823–826.
 72. Mallory-Smith C.A., Sánchez-Olguín E.S. 2011. Gene flow from herbicide-resistance crops: It is not just for transgenes. *J. Agric. Food Chem.* 59: 5813–5818.
 73. Martienssen R.A. 2001. DNA methylation and epigenetic inheritance in plants and filamentous fungi. *Science* 293(5532): 1070–1074.
 74. Maxmen A. 2015. Three technologies that changed genetics. *Nature* 528 (7580): S2–S3.
 75. McClintock B. 1950. The origin and behavior of mutable loci in maize. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1950. 36(6):344–55.
 76. McClintock B. 1987. The discovery and characterization of transposable elements: the collected papers of Barbara McClintock. Garland Publishers, USA.
 77. McDuffie H.H. *et al.* 2001. Non-Hodgkins lymphoma and specific pesticide exposures in men: cross-Canada study of pesticides and health. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 10(11): 1155–1163.
 78. Melé E. *et al.* 2015. Modelling gene flow distribution within conventional fields and development of simplified sample method to quantify adventitious GM contents in maize. *Sci. Reports* 5: 17106.
 79. Messeguer *et al.* 2006. Pollen mediated gene flow in maize in real situation of coexistence. *Plant Biotech. Journal* 4: 663.
 80. Morgante M. *et al.* 2005. Gene duplication and exon shuffling by helitron-like transposons generate intraspecies diversity in maize. *Nat. Genet.* 37(9): 997–1002.
 81. Murray K. 1964. The Occurrence of ϵ -N-Methyl Lysine in Histones. *Biochemistry* 3(1): 10–15.
 82. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2010. The Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States (El impacto de cosechas desarrolladas por ingeniería genética en la sustentabilidad de las granjas en Estados Unidos de América). Committee on the Impact of Biotechnology on Farm-Level, Economics and Sustainability, Board on Agriculture and Natural Resources, Division on Earth and Life Studies. The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/12804>
 83. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2016. Genetically engineered crops: experiences and prospects (Cultivares desarrollados por ingeniería genética: experiencias y prospectivas). The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/23395>
 84. Nicolia A. *et al.* 2014. An overview of the ten last years of genetically engineered crop safety research. *Critical Reviews in Biotechnology* 34(1): 77–123.
 85. Nihongaki Y. *et al.* 2015. Photoactivable CRISPR-Cas9 for optogenetic genome editing. *Nature Biotechnol.* 33: 755–760.
 86. Ortiz S., Ezcurra E. 2003. La liberación de cultivos transgénicos al medio ambiente: esquemas adecuados y su importancia en el manejo de riesgo. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3. Biotecnología Agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella, (Coords.). El Colegio Nacional, Ciudad de México.
 87. Palau-delmas M. *et al.* 2007. Sowing and flowering delays can be an efficient strategy to improve coexistence of genetically modified maize and conventional maize. *Crops Science* 48: 2404.
 88. Panorama Agroalimentario. 2015. Maíz 2015. FIRA, Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial, Ciudad de México. www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf
 89. Price D.C. *et al.* 2012. *Cyanophora paradoxa* genome elucidates origin of photosynthesis in algae and plants. *Science* 355: 843–847.
 90. Quadrana L., Colot V. 2016. Plant Transgenerational Epigenetics. *Annu. Rev. Genet.* 50: 467–491. DOI: 10.1146/annurev-genet-120215-035254.
 91. Quedas M.F., Cruz de Carvalho P. 2012. A quinquennium of coexistence in Portugal. *AgBioForum. The Journal of Agrobiotechnology Management and Economics* 15(1).
 92. Qi L.S. *et al.* 2013. Repurposing CRISPR as an RNA-guided platform for sequence-specific control of gene expression. *Cell* 152(5): 1173–1183.
 93. Reporte técnico Fundación Antama. 2016. www.fundación-antama.org
 94. Ricci B. *et al.* 2016. Improving the management of coexistence between GM and non-GM maize with a spatially explicit model of cross-pollination. *European Journal of Agronomy* 77: 90–100.
 95. Ricroch A.E. 2013. Assessment of GE food Safety using “-omics” techniques and long-term animal feeding studies (Evaluación de la inocuidad del alimento genéticamente modificado, utilizando ciencias ómicas y animales alimentados por periodos de tiempos largos). *New Biotechnology* 30(4): 349–354.
 96. Ricroch A.E. *et al.* 2014. Looking back at safety assessment of GM food/feed: an exhaustive review of 90-day animal feeding studies. (Revisando la valoración de la inocuidad de la alimentación y del alimento genéticamente modificado: Una revisión exhaustiva de los estudios de alimentación a animales por periodos de 90 días). *Int. J. Biotechnol.* 13(4): 230–256.
 97. Riesgo L. *et al.* 2010. Distances needed to limit cross-fertilization between GM and conventional maize in Europe. *Nature Biotechnology* 28: 780–782.
 98. Rühl G. *et al.* 2011. Coexistence in maize: effect on pollen mediated gene flow by conventional maize, border row edging genetically modified maize fields. *Crop Science* 51: 1748–1756.
 99. Saha A., Wittmeyer J., Cairns B.R. 2006. Chromatin remodelling: The industrial revolution of DNA around histones. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 7(6): 437–447.
 100. Sanders M.F., Bowman J.L. 2012. Genetic analysis: An integrated approach. Boston: Benjamin Cummings.
 101. Sanvido O. *et al.* 2008. Definition and feasibility of isolation distances for transgenic maize cultivation. *Transgenic Res.* 17: 317–335.
 102. Schnable P.S. *et al.* 2009. The B73 maize genome: complexity, diversity, and dynamics. *Science* 326(5956): 1112–1115.
 103. Skevas T. *et al.* 2010. Coexistence regulations and agriculture production: A case study of five Bt maize producers in Portugal. *Ecological Economics* 69: 2402–2408.
 104. Solleiro J.L., Castañón R. 2013. Introducción al ambiente del maíz transgénico. Análisis de ocho casos en Iberoamérica. México: Agrobio México y CambioTec.
 105. Stillman, B., Stewart, D.J. 2004. Epigenetics. Cold Spring Harbor, Cold Spring Harbor Laboratory, New York.
 106. Strahl B.D., Allis C.D. 2000. The language of co-

- valent histone modifications. *Nature* 403(6765): 41–45.
107. Suzuki M.M., Bird A. 2008. DNA methylation landscapes: Provocative insights from epigenomics. *Nature Reviews Genetics* 9(6): 465–476.
108. Trigo E.J., Capp E.J. 2006. The performance of agricultural sector during the period 1996–2006. En: *Ten years of genetically modified crops in Argentine agriculture*. Argenbio, Argentina.
109. Van Eenennaam A.L., Young A.E. 2014. Prevalence and impacts of genetically engineered feedstuffs on livestock populations. *J. Anim. Sci.* 92(10): 4255–4278.
110. Vielle-Calzada J. P. *et al.*, 2009. The Palomero genome suggests metal effects on domestication. *Science* 326: 1078–1085.
111. Waddington C.H. 1942. The epigenotype. *Endeavour* 1: 18–20.
112. Waddington C.H. 1956. The genetic assimilation of the bithorax phenotype. *Evolution* 10: 1–13.
113. Waddington C.H. 1957. The strategy of the genes; a discussion of some aspects of theoretical biology. Allen & Unwin, New York.
114. Weber W.E. *et al.* 2007. Coexistence between GM and non-GM maize crops-Tested in 2004 at the field scale level (Erprobungsanbau 2004). *Journal of Agronomy and Crop Science* 193: 79–92.
115. Zhang Y. 2001. Transcription regulation by histone methylation: Interplay between different covalent modifications of the core histone tails. *Genes & Development* 15(18): 2343–2360.
116. Zhenxiang X. *et al.* 2012. Horizontal transfer of expressed genes in parasitic flowering plant. *BMC Genomics* 13: 227.
- PUBLICACIONES, SEÑALAMIENTOS Y CUESTIONAMIENTOS EN CONTRA DEL USO Y CONSUMO DE LOS OGM
1. Álvarez Buylla E.R. 2015. Tortillas transgénicas y cancerígenas. <http://www.uccs.mx/>
 2. Álvarez Buylla E.R., Piñeyro N.A. 2013. El maíz en peligro ante los transgénicos. Un análisis integral en el caso de México, 568 pp. Centro de Investigación Interdisciplinaria UNAM-UCCS (Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad) y Universidad Veracruzana, México.
 3. Bakshi A. 2003. Potential adverse health effects of genetically modified crops. *J. Toxic. Environ. Health B. Crit. Rev.* 6(3): 211–225.
 4. Burgeff C. *et al.* 2014. How much can GMO and non GMO cultivars coexist in a megadiverse country? *Agrobioforum* 17: 90–101.
 5. Decreto 418/2016 del estado de Yucatán por el que se declara al estado de Yucatán zona libre de cultivos agrícolas con organismos genéticamente modificados. Diario Oficial, página 17, Mérida, Yucatán, 29 de octubre de 2016.
 6. Druker S.M. 2015. Altered genes, twisted truth (how the venture to genetically engineer our food has subverted science, corrupted government and systematically deceived the public. Clear River Press.
 7. Greenpeace. 2007. Genetically Engineered Maize: The Reality Behind the Myths 2007. www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/agriculture/2011/GE%20Maize%20Reality%20Behind%20the%20Myths.PDF
 8. Greenpeace. 2015a. Europe's pesticide addiction. How industrial agriculture damages our environment 2015. www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/#tab=0&gvs=false&page=3
 9. Greenpeace. 2015b. Twenty years of failure. Why GM crops have failed to deliver on their promises 2015. <http://stopogm.net/sites/stopogm.net/upload/abc/20yearfail.pdf>
 10. Greenpeace. 2016. Respuesta de Greenpeace a la carta de los premios nobel sobre los transgénicos 2016. www.greenpeace.org/espana/news/2016/Julio/Respuesta-de-Greenpeace-ante-la-carta-de-los-premios-Nobel-sobre-los-transgenicos/
 11. Jacobsen S. *et al.* 2013. Feeding the world: genetically modified crops versus agricultural biodiversity. *Agronomy for Sustainable Development* 33: 651–662.
 12. Kling J. 1996. Could transgenic supercrops one day breed superweeds? *Science* 274: 180–181.
 13. Mesnage R. *et al.* 2016. An integrated multi-omics analysis of the NK603 Roundup-tolerant GM maize reveals metabolism disturbances caused by the transformation process. *Sci. Rep.* 6: 37855. DOI: 10.1038/srep37855.
 14. Muñoz J. 2016. Cuando los premios nobel se equivocan. <http://www.uccs.mx/>
 15. Pryme I.F., Lembcke R. 2003. In vivo studies of possible health consequences of genetically modified food and feed with particular regard to ingredients consisting of genetically modified plant materials. *Nutr. Health* 17(1): 1–8.
 16. Séralini G. *et al.* 2007. New analysis of a rat feeding study with a genetically modified maize reveals signs of hepatorenal toxicity. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 52: 596–602.
 17. Séralini G. *et al.* 2009. How subchronic health effects can be neglected for GMOs pesticides. *Int. J. Biol. Sci.* 5: 438–444.
 18. Séralini G.E. *et al.* 2012. Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Food Chem. Toxicol.* 50(11): 4221–4231.
 19. Séralini G.E. *et al.* 2014a. Republished study: long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Environmental Sciences Europe* 26: 14.
 20. Séralini G.E. *et al.* 2014b. Retraction notice to “Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize [Food Chem. Toxicol. 50 (2012) 4221–4231]. *Food Chem. Toxicol.* 63: 244.
 21. Séralini G.E. 2014c. Presentation to the National Academies of Sciences. Committee on Genetically Engineered Crops. Past experiences and future prospects. September, 2016, USA.
 22. Turrent A. *et al.* 2013. El maíz transgénico en México en 15 píldoras. <http://www.uccs.mx/>
 23. UCCS (Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad). 2016. El maíz transgénico MON 810 no produce mayores rendimientos ni reduce el daño por ataques a plagas 2016. <http://www.uccs.mx/>



CAPÍTULO VII

OPINIÓN PÚBLICA SOBRE TRANSGÉNICOS Y BIOTECNOLOGÍA

- MOTIVOS DETRÁS DEL RECHAZO AL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO Y A LA TECNOLOGÍA DERIVADA
- OFENSIVA EN CONTRA DE LA CIENCIA

INTRODUCCIÓN

Gracias al conocimiento científico y a la tecnología, la humanidad ha resuelto distintas demandas y necesidades. Por ejemplo, las vacunas, los antibióticos y los antivirales han permitido alargar la vida de los seres humanos al combatir enfermedades infecciosas. Hoy día, el internet y los teléfonos celulares nos permiten conocer lo que ocurre en el planeta de manera inmediata, y comunicarnos con personas que se encuentran en puntos geográficos muy distantes. Lo anterior ha globalizado nuestro mundo y ha modificado nuestro concepto de comunicación. Ciertamente, como se retomará en el capítulo X, el conocimiento científico y la tecnología derivada de éste, deben usarse de manera responsable y respetuosa con el medio ambiente para no seguir degradando y contaminando el planeta, y conforme a los

marcos jurídicos nacionales y acuerdos internacionales. Es indudable que el abuso y el uso irresponsable de la tecnología es algo contra lo que debemos luchar como sociedad global y, en particular, la comunidad científica.

MOTIVOS DETRÁS DEL RECHAZO AL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO Y A LA TECNOLOGÍA DERIVADA:
OFENSIVA EN CONTRA DE LA CIENCIA

Toda tecnología implica, en alguna medida, la modificación y el desgaste de la naturaleza, del ser humano como parte de la biota y del medio ambiente. Algunos avances del conocimiento en ciertas áreas y algunas tecnologías generan miedo y rechazo —muchas veces por ignorancia— y, por ende, no son aceptadas de manera inmediata ni unánime por la sociedad. Ejemplos de ello son: el cambio climático, el rechazo por parte de algunos grupos —sin sustento cientí-

fico alguno— al uso de vacunas para prevenir enfermedades, y la no aceptación de la teoría de la evolución de Darwin, en la cual la acumulación de conocimiento científico contundente señala que todos los seres vivos, como se detalla en el capítulo IX, incluyendo a los seres humanos, descendemos de un precursor vivo común, y los humanos en particular, de los primates; esto en contraposición con el origen divino que señalan los creacionistas. Más adelante se presentan referencias de publicaciones científicas que sustentan la importancia y el valor estratégico para la salud humana de las vacunas, las publicaciones de Darwin sobre la evolución de las especies y los trabajos de Dawkins y Scott sobre los sustentos de la evolución señalada por Darwin. También, trabajos de Mario Molina y colaboradores sobre el cambio climático.

Es importante mencionar que existen publicaciones en las que se analizan la actitud y la opinión de la sociedad respecto al conocimiento científico y a la tecnología que se genera a partir de este conocimiento, análisis necesario para avanzar en la propuesta de que sea el conocimiento científico el que sustente la opinión pública y las decisiones de la sociedad y los gobernantes. Para ello es necesario contar con una buena estrategia de comunicación de la importancia de la ciencia y del uso responsable y sustentable de la tecnología que de ella emana, desarrollada para atender las grandes demandas y problemas que enfrenta la sociedad y el planeta.

Una de las razones del rechazo al conocimiento científico y a la tecnología es que la información muchas veces es poco accesible, incompleta o parcial. Por ejemplo, en Esta-

dos Unidos existen grupos poderosos que, por múltiples razones, rechazan la existencia del cambio climático y siguen viviendo en la época de la astrología y no de la astronomía, como lo ha señalado el Dr. Mario Molina. Ciertamente, en este tema del cambio climático no hay ni habrá unanimidad por diversas razones e intereses, en particular, los económicos. Sin embargo, se sigue acumulando evidencia científica sólida que indica de manera muy clara que el cambio climático está ocurriendo, en particular por la acumulación de CO₂ y por los gases de efecto invernadero generados por la sociedad humana. Puede que no haya unanimidad, pero habrá un consenso importante y cada vez mayor. Es importante señalar la preocupación que implica que el nuevo presidente de Estados Unidos, Donald Trump, en rechazo a la muy amplia y contundente evidencia científica y técnica, considere que realmente no hay un problema que atender en el cambio climático, lo cual implicará retrasos y menos recursos para contender con este grave problema, y será muy difícil regresar, al menos a corto plazo, a la posición inteligente y sustentada científicamente, gracias al apoyo de las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos y de otras instancias que tuvo el presidente Barack Obama.

Darwin, 1859; Darwin y Wallace, 1859; Pasteur, 1885; Molina y Rowland, 1974; Valenzuela et al., 1982; Hilleman, 2000; Joshi et al., 2000; Allum et al., 2008; Dawkins, 2009; Scott, 2009; Molina et al., 2009; Carabias et al., 2010; Steffen et al., 2011; Wang et al., 2014; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>

RECHAZO A LOS TRANSGÉNICOS POR UN AMPLIO SECTOR DE LA SOCIEDAD

En muchos sentidos, la opinión y la actitud que se manifiestan ante el cambio climático, se repiten ante el uso de los organismos genéticamente modificados (OGM). Nunca habrá unanimidad en su aceptación por múltiples intereses, razones, visiones parciales, obsoletas y algunas falsas, y puntos en contra que ya se han señalado con detalle en el capítulo VI. Sin embargo, la amplia y contundente evidencia científica acumulada y los documentos elaborados por expertos y por academias de ciencias de todo el mundo, están ayudando a aumentar el consenso en algunos países —no en México— respecto a que los transgénicos son seguros de utilizar. Como resultado de lo anterior y debido a los amplios beneficios ya comentados en capítulos anteriores, el uso de los OGM es cada vez más frecuente y aceptado globalmente y, por ello, las autoridades responsables de la seguridad alimentaria —la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios de México y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria— no han retirado ningún producto transgénico del mercado de los que hoy se comercializan; por el contrario, cada vez son más los cultivos transgénicos y sus productos los que se aprueban para su consumo en múltiples países, incluyendo México y Europa.

La figura VII.1 muestra los resultados de una encuesta que incluyó a científicos/ investigadores y público en general sobre los alimentos genéticamente modificados (GM) o transgénicos

y otros asuntos polémicos, como el cambio climático, elaborada en Estados Unidos por el PEW Research Center y tomada para su análisis por la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS, por sus siglas en inglés). En la encuesta se observa que no hay unanimidad en prácticamente ninguno de los temas que se preguntaron y analizaron. Sin embargo, en muchos asuntos sí se visualiza un consenso. El “gap” o separación ilustra las diferencias entre el público en general y los científicos. El control de las semillas por las compañías transnacionales es la principal razón de rechazo a las plantas transgénicas.

Conforme a lo señalado en los capítulos III, IV y VI, y como se verá en el capítulo X, existe un consenso de asociaciones científicas, cuerpos médicos y organismos internacionales, sobre los beneficios y la inocuidad de los transgénicos que se enlistan a continuación. También existen dos declaraciones firmadas por grupos de beneficiarios del premio Nobel (ver figuras III.1 y III.1bis) en apoyo a la biotecnología y a los OGM, la más reciente firmada por 123 de ellos.

The Royal Society (UK), Brazilian Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Indian National Science Academy, Mexican Academy of Sciences, National Academy of Sciences of the USA, The Third World Academy of Sciences, 2000: www.amc.unam.mx/Noticias/contenido_doctrans.html; Bolívar et al., 2007; PAS, 2009: www.pas.va/content/dam/accademia/pdf/newbiotechnology.pdf; European Commission/European Research Area/Food, Agriculture and Fisheries and Biotechnology, 2010: <https://bookshop.europa.eu/en/a-decade-of-eu-funded-gmo-research-2001-2010-pbKINA24473> NASEM, 2010: <https://doi.org/10.17226/12804>; Bo-

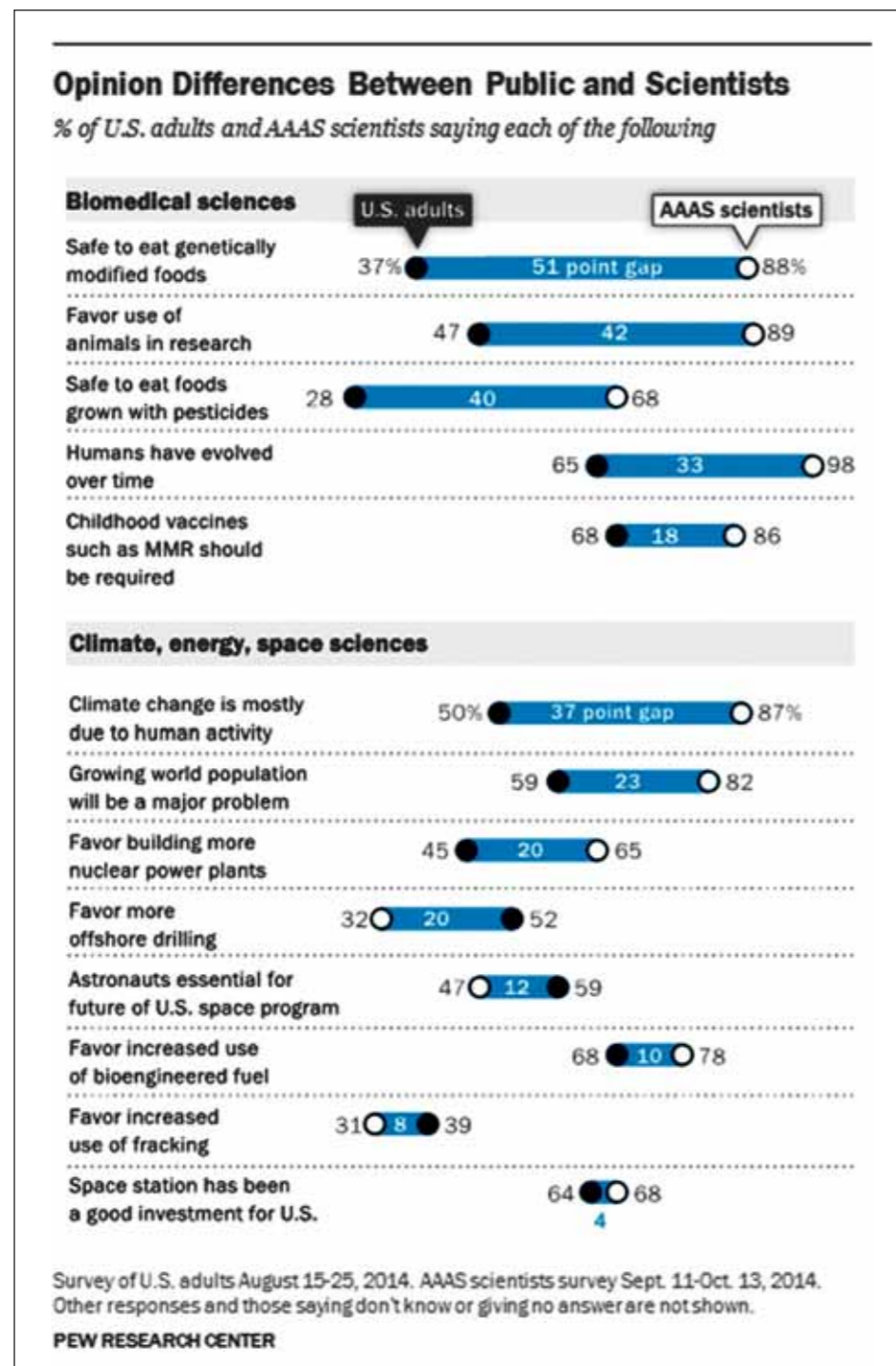


Figura VII.1. Diferencia de opiniones entre público en general y científicos. Encuesta sobre ciencia y sociedad realizada por el Pew Research Center, 2014 (Pew Research Center. Public and Scientists views on Science and Society, 2014: www.pewinternet.org/2015/01/29/public-and-scientists-views-on-science-and-society/pi_2015-01-29_science-and-society-00-02/)

Se agradece al Pew Research Center la autorización para reproducir esta imagen. Reprint permission granted by the Pew Research Center.

Positivo en lo general

- World Health Organization (WHO)
- Food and Agriculture Organization (FAO)
- European Food Safety Authority (EFSA)
- American Society for Plant Biology (ASPB)
- Federation of Animal Science Societies (FASS)
- U.S. National Research Council (NRC)
- U.S. National Academy of Sciences (NAS)
- The American Medical Association (AMA)
- U.S. Department of Agriculture (USDA)
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA)
- U.S. Food and Drug Administration (FDA)
- European Academies Science Advisory Council (EASAC)
- American association for the Advancement of Science (AAAS)
- European Commission / Directorate-General for Research and Innovation, Biotechnologies, Agriculture, Food
- Royal Society (UK)
- Brazilian Academy of Sciences
- Pontifical Academy of Sciences
- Chinese Academy of Sciences
- National Academy of Sciences of India
- Mexican Academy of Sciences. Biotechnology Committee
- Third World Academy of Sciences (TWAS)

Negativo en lo general

- Union of Concerned Scientists, USA
- Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad, México

lívar et al., 2011; AAAS, 2012: www.aaas.org/aaas_GM_statement.pdf; AgBioWorld Declaration of Support of Agricultural Biotechnology, 2012: www.agbioworld.org/declaration/; Brossard, 2012, Popp et al., 2012; EASAC Policy Report, 2013: www.easac.eu; Pew Research Center. Public and Scientists views on Science and Society, 2015: www.pewinternet.org/2015/01/29/public-and-scientists-views-on-science-and-society/pi_2015-01-29_science-and-society-00-02/; Runge et al., 2015; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html; NASEM, 2016:

<https://doi.org/10.17226/23395>; The Royal Society (UK), 2016: <https://royalsociety.org/~media/policy/projects/gm-plants/gm-plant-q-and-a.pdf>; Geneticdivide, 2017: <http://science.sciencemag.org/content/355/6325/572.1>

CONCLUSIONES EN TORNO AL RECHAZO QUE EXISTE A LOS CULTIVOS TRANSGÉNICOS Y A SUS PRODUCTOS

Dado el rechazo que existe a los cultivos transgénicos y sus productos, resulta indispensable subrayar la importancia de seguir divulgando

sus amplios beneficios para contrarrestar el repudio y la ignorancia, y así poder avanzar hacia la aceptación y el consenso. Una de las razones del rechazo al conocimiento científico y la tecnología derivada de éste, es que la información muchas veces es poco accesible, incompleta y parcial, además de la ignorancia y la indiferencia que existen en torno a la tecnología. Por otro lado, grupos poderosos rechazan la existencia del cambio climático, y otros, por múltiples razones ya comentadas, rechazan los organismos transgénicos. Ciertamente no hay ni habrá unanimidad en estas cuestiones del cambio climático y de la importancia de los transgénicos —en particular, de los cultivares transgénicos y sus productos. Sin embargo, se sigue acumulando evidencia científica contundente que indica con toda claridad que el cambio climático, propiciado por el hombre, está ocurriendo; que los amplios beneficios de las plantas transgénicas están presentes en muchos lugares para atender diversas demandas, y que el planeta está avanzando hacia una economía basada, cada vez más, en la biotecnología por tratarse de una tecnología responsable, sustentable y menos contaminante que los insecticidas químicos que se siguen usando en distintos lugares para eliminar plagas de insectos. En este sentido es importante reiterar que existen reportes de varias academias de ciencias y medicina de diferentes países, así como dos declaraciones firmadas por grupos de premios Nobel que apoyan contundentemente la biotecnología y los OGM, y en particular los cultivos transgénicos, que consideran una agricultura

de precisión por sus beneficios. No habrá unanimidad, pero habrá que seguir insistiendo en la importancia de avanzar hacia el consenso de aceptación de los OGM. Hay que insistir en la necesidad de informar a la opinión pública, a la sociedad, en particular la mexicana, con mejores capacidades y estrategias para contender con la ignorancia, la indiferencia y las visiones parciales, algunas falsas. Finalmente se subraya que, como se señaló en detalle en los capítulos V y VI, los agricultores de muchos países, incluyendo varios iberoamericanos, están utilizando y adoptando cultivares transgénicos por sus amplios beneficios y México, por los supuestos y falsos daños de las plantas transgénicas, se está quedando atrás, en detrimento de la nación y de sus campesinos. Se insiste en que todos los señalamientos de supuestos daños a la salud, al medio ambiente y la biodiversidad atribuidos a los organismos transgénicos, son falsos, sin sustento científico verdadero; a diferencia del sustento científico que sí se tiene en torno a los insecticidas químicos sintéticos y a cómo algunos causan cáncer y otros incrementan el riesgo de desarrollarlo. El control de las semillas por parte de las compañías transnacionales es la principal razón del rechazo a las plantas transgénicas. Por ello, como se señala en el siguiente capítulo, actualmente se presenta una oportunidad importante para México dado el vencimiento de algunas de las patentes que protegen comercialmente a las semillas transgénicas, lo cual permite replantear el desarrollo de cultivares transgénicos mexicanos con propiedades extraordinarias.



Figura VII.2. Cultivares de soya y maíz transgénicos que se siembran en Estados Unidos y en algunos países de América Latina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AAAS (American Association for the Advancement of Science). 2012. Statement by the Board of Directors of the AAAS on labelling of genetically modified foods, USA (Pronunciamento del Consejo Directivo de la AAAS sobre el etiquetado de alimentos genéticamente modificados). www.aaas.org/aaas_GM_statement.pdf
2. AgBioWorld. 2012. Declaration of support of agricultural biotechnology (Declaración de apoyo a la biotecnología relacionada con la agricultura). www.agbioworld.org/declaration/index.html
3. Allum N. *et al.* 2008. Science knowledge and attitudes across cultures: A meta-analysis. *Public Understanding of Science* 17: 35–54.
4. Bolívar F. *et al.* 2007. Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.) El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.
5. Bolívar F. *et al.* 2011. Uso responsable de organismos genéticamente modificados. Comité de Biotecnología, Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.
6. Brossard D. 2012. Social challenges: public opinion and agricultural biotechnology. En: The role of biotechnology in a sustainable food supply. Center of Agricultural and Rural Sustainability, University of Arkansas, USA.
7. Carabias J., Molina M.J., Sarukhán J. 2010. El cambio climático, causas, efecto y soluciones. Editorial DGE y El Equilibrista, Ciudad de México.
8. Darwin C. 1859. On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life, 1era edición. John Murray, London.
9. Darwin C., Wallace A. 1859. On the tendency of species to form varieties and on the perpetuation of varieties and species by natural means of selection. *J. of the Proceedings of the Linnean Society (Zoology)* 3, 45–62.
10. Dawkins R. 2009. The greatest show on earth. The evidence of evolution. Free Press, New York.
11. EASAC (European Academies Science Advisory Council). 2013. Policy report. Planting the future: opportunities and challenges for using crop genetic improvement technologies for sustainable agriculture (Plantando el futuro: oportunidades y retos para el uso de cosechas generadas por mejoramiento genético para una agricultura sustentable). www.easac.eu/fileadmin/Reports/Planting_the_Future/EASAC_Planting_the_Future_FULL_REPORT.pdf / www.easac.eu
12. European Commission / European Research Area / Food, Agriculture and Fisheries, and Biotechnology. 2010. A decade of EU-funded GMO research (2001–2010) [Una década de financiamiento europeo a la investigación de OGM (2001–2010)]. Luxembourg: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Bélgica. www.researchgate.net/profile/Danuta_Cichocka/publication/233770770_A_decade_of_EU-funded_GMO_research_2001-2010/links/09e4150b5ec0a1c71d000000/A-decade-of-EU-funded-GMO-research-2001-2010.pdf?origin=publication_detail / <https://bookshop.europa.eu/en/a-decade-of-eu-funded-gmo-research-2001-2010-pbKINA24473/>
13. Genetics Divide. 2017. *Science* 355(6325).
14. Hilleman M.R. 2000. Vaccines in historic evolution and perspective: a narrative of vaccine discoveries. *Vaccine* 18: 1436–1447.
15. Joshi N. *et al.* 2000. Safety and immunogenicity of indigenous recombinant hepatitis B vaccine (Shanvac-B) in comparison with commercially available vaccine. *Indian J. Gastroenterol.* 19: 71–73.
16. Laureates Letter Supporting Precision Agriculture (Declaración de premios Nobel a favor de la agricultura de precisión). 2016. http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html
17. Molina M.J. *et al.* 2009. Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions. *PNAS* 106(49): 20616–20621.
18. Molina M.J., Rowland F.S. 1974. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature* 249: 810–812.
19. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2010. The Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States (El impacto de cosechas desarrolladas por ingeniería genética en la sustentabilidad de las granjas en Estados Unidos de América). Committee on the Impact of Biotechnology on Farm-Level, Economics and Sustainability, Board on Agriculture and Natural Resources, Division on Earth and Life Studies. The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/12804>
20. NASEM (National Academies of Science, Engineering, and Medicine). 2016. Genetically engineered crops: experiences and prospects (Cultivos desarrollados por ingeniería genética: experiencias y perspectivas). The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/23395>
21. PAS (Pontifical Academy of Sciences). 2009. Transgenic plants for food security in the context of development (Plantas transgénicas para la seguridad alimentaria en el contexto del desarrollo). PAS Study Week, Cd. del Vaticano. www.pas.va/content/dam/accademia/pdf/newbiotechnology.pdf
22. Pasteur L. 1885. Méthode pour prévenir la rage après morsure. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 101: 765–772.
23. Pew Research Center, USA. Public and scientists' views on science and society 2015. www.pewinternet.org/2015/01/29/public-and-scientists-views-on-science-and-society/pi_2015-01-29-science-and-society-00-02/
24. Popp J. *et al.* 2012. The role of Biotechnology in a Sustainable Food Supply. Cambridge University Press, New York.
25. Runge K.K. *et al.* 2015. Opinion report: public opinion and biotechnology. University of Wisconsin-Madison, Department of Life Sciences Communication, USA.
26. Scott E.C. 2009. Evolution vs. Creationism. University of California Press, USA.
27. Steffen W. *et al.* 2011. The Anthropocene: From global change to planetary stewardship. *AMBIO* 40 (7): 739–761.
28. The Royal Society, UK. 2016. GM plants. Questions and answers. <https://royalsociety.org/~media/policy/projects/gm-plants/gm-plant-q-and-a.pdf>
29. The Royal Society, Brazilian Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Indian National Science Academy, Mexican Academy of Sciences, National Academy of Sciences of the USA, The Third World Academy of Sciences. 2000. Transgenic plants and world agriculture (Plantas transgénicas y agricultura global). www.amc.unam.mx/Noticias/contenido_doctrans.html / https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2000/10062.pdf
30. Valenzuela P. *et al.* 1982. Synthesis and assembly of hepatitis B virus surface antigen particles in yeast. *Nature* 298: 347–350.
31. Wang Y. *et al.* 2014. Assessing the effects of anthropogenic aerosols on Pacific storm track using a multiscale global climate model. *PNAS* 111(19): 6894–6899.



CAPÍTULO VIII

DESARROLLO NACIONAL

- LA BIOTECNOLOGÍA Y LAS PLANTAS TRANSGÉNICAS MEXICANAS COMO PARTE INDISPENSABLE DE UNA ESTRATEGIA EN MÉXICO PARA COADYUVAR EN LA SUSTENTABILIDAD ALIMENTARIA Y DEL MEDIO AMBIENTE
- LA SITUACIÓN DE LA PROPIEDAD COMERCIAL DE LAS SEMILLAS TRANSGÉNICAS

INTRODUCCIÓN

México debe estar atento, y añadiríamos, preocupado y ocupado por su capacidad para producir alimentos de manera sustentable. Por ello, se deben buscar estrategias y mecanismos para depender cada día más de nuestras propias capacidades y menos de compañías transnacionales que hoy son dueñas de semillas de maíz transgénico, de la mayor parte de las variedades mejoradas y de las semillas híbridas de maíz convencional no genéticamente modificado que más se utilizan en México y en Latinoamérica. Resulta fundamental, entonces, fortalecer las capacidades de investigación y de desarrollo tecnológico en aras de generar nuevo conocimiento científico en general y, en particular, aquel relacionado con la producción de alimentos.

APLICACIÓN DE BIOTECNOLOGÍA PARA EL FORTALECIMIENTO DEL CAMPO MEXICANO

En esta sección se aborda la necesidad que existe en México de desarrollar un programa de seguridad alimentaria que tenga como eje el fortalecimiento de las capacidades científicas y tecnológicas para el mejoramiento genético convencional, así como de aplicaciones biotecnológicas, incluyendo cultivos transgénicos.

El Plan Nacional de Desarrollo (PND), el Programa Sectorial de la Sagarpa, y el Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación (PECiTI) señalan a la biotecnología como un área estratégica y prioritaria que debe usarse para contender con necesidades y problemas de diversa índole. De hecho, el PND del Gobierno de la República, periodo 2013–2018, apunta dentro de la meta IV de México Próspero,

aprovechar el desarrollo de la biotecnología, cuidando el medio ambiente y la salud humana como línea de acción, y el objetivo PND 4.10 aspira a “construir un sector agropecuario y pesquero productivo que garantice la seguridad alimentaria del país” (p. 142). El PECiTI del Gobierno de México, periodo 2014–2018, enlista como parte de las prioridades del sector Ciencia, Tecnología e Innovación (capítulo 2, p. 50), “fomentar la aplicación de la biotecnología para atender responsablemente las amenazas a la salud humana, animal, a la biodiversidad, a la disponibilidad de alimentos y de recursos energéticos y a los provenientes del cambio climático. Se requieren incentivos y apoyos para que las aplicaciones de los organismos genéticamente modificados transiten adecuadamente por el entramado regulatorio”. Los señalamientos sobre la importancia estratégica y prioritaria de la biotecnología y los apoyos necesarios indicados en el PND y en el PECiTI coinciden con el apoyo a nivel internacional a la biotecnología y los pronunciamientos a favor de los transgénicos, en particular en países desarrollados, como se señala en el capítulo III, además de corresponder con los amplios beneficios y la ausencia de daño por el uso de transgénicos como se destaca en los capítulos IV, V y VI. En el capítulo X se detalla la situación en el mundo y, más puntualmente, en México, sobre el marco jurídico nacional e internacional, así como los esfuerzos a nivel nacional para regular y utilizar responsablemente los transgénicos. En congruencia con estos señalamientos del PND y del PECiTI, la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM), aprobada por el Congreso de la Unión en 2005,

mandata establecer —como se comenta más ampliamente en el capítulo X— instrumentos para el fomento de la investigación científica y tecnológica en bioseguridad y biotecnología. También se señala que la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), en su artículo 3, considera la biotecnología como “una tecnología que utiliza recursos biológicos, organismos vivos o sus derivados, para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos”. Por lo anterior, esta ley prevé el uso de la biotecnología y, por ende, de los organismos transgénicos para usar responsablemente la biota. Lo anterior se logrará únicamente en conjunción y articulación con la LBOGM, como se analiza en detalle en el capítulo X.

LBOGM, 2005: www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBOGM.pdf <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>; PND, 2013–2018: www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5299465; PECiTI, 2014–2018: www.conacyt.gob.mx/images/conacyt/PECiTI_2014-2018.pdf; Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), 2015

PLANTAS TRANSGÉNICAS MEXICANAS:
SEGURIDAD ALIMENTARIA, PRODUCCIÓN
SUSTENTABLE DE ALIMENTOS Y LA POSIBLE
DISMINUCIÓN DE PESTICIDAS

De acuerdo a lo anterior, la única estrategia real que existe en México para ayudar a paliar y contender con necesidades, demandas y problemas como la producción sustentable de alimentos y las injusticias en el campo —como

ocurre en otros países— es el fortalecimiento de capacidades de investigación científica y tecnológica, en particular en biotecnología. A partir de esta estrategia será posible desarrollar tecnología propia; en este caso, variedades de semillas mejoradas, específicamente las transgénicas, construidas y caracterizadas por grupos mexicanos de investigación y desarrollo. Podríamos esperar que la siguiente generación de cultivares transgénicos —con genes y características avanzadas que confieren propiedades importantes y valiosas—, no sólo tengan beneficios directos para el agricultor sino también que reduzcan el impacto de la agricultura sobre el medio ambiente y permitan hacer frente a los efectos del cambio climático. Además de los transgenes que permiten la resistencia a plagas de insectos y malezas, otras capacidades desarrolladas en México —como la de utilizar el fosfito como fertilizante o la de generar resistencia a sequías y heladas— hacen de estas plantas transgénicas de tercera generación un prometedor motor para la agricultura nacional.

Hoy en México existen centros y grupos que realizan investigación de frontera en diferentes aspectos y de valor estratégico en biotecnología. Entre los ejemplos extraordinarios, pertinentes, poderosos y de gran valor que existen se comentan dos a continuación. El primero es de la Dra. Beatriz Xoconostle, quien ha desarrollado maíces y otros vegetales transgénicos que otorgan a la planta la capacidad/ventaja de requerir menor cantidad de agua para vivir, así como de ser más resistente a heladas y sequías (ver figura VIII.1), lo cual mejoraría la productividad en culti-

vos de maíz de temporal. Esta planta (CIEA-9) estrictamente hablando no lleva un transgén que le dé una ganancia como aquellos que confieren resistencia a insectos plaga, sino un fragmento de ADN con elementos de diferentes orígenes, por lo cual es transgénica. En este cultivar de maíz, dicho segmento de ADN le permite modular la expresión del gen que codifica para la enzima trehalasa. La reducción en los niveles de esta enzima aparentemente permite la acumulación del disacárido trehalosa, el cual actúa como estabilizador de membranas celulares ante un estrés abiótico. De acuerdo con una comunicación personal con la Dra. Xonocostle, recientemente se ha sometido a publicación la información acerca de las características y propiedades de esta planta. Estos señalamientos de Xoconostle y colaboradores coinciden con lo publicado en una patente de 2012 de Agreda Laguna y colaboradores sobre los métodos para obtener plantas resistentes a sequías, en la cual se advierte que la inactivación de la trehalasa es responsable de acumular trehalosa, y esta es la razón principal de la tolerancia al estrés por frío y sequía. Se agradece a la Dra. Xoconostle la información compartida, incluyendo la siguiente figura, y la disposición para utilizarla en este libro.

Otro desarrollo extraordinario y de gran valor social, económico y medioambiental, como el anterior, es el del Dr. Luis Rafael Herrera Estrella, miembro del Comité de Biotecnología de la AMC y coautor de este libro. Luis Herrera Estrella y su grupo han desarrollado variedades transgénicas, inicialmente en una planta de tabaco, que utilizan fosfito en lugar de



Efecto de la helada

Figura VIII.1. Variedad de maíz CIEA-9, tolerante a sequía y frío, desarrollada en México por Beatriz Xoconostle y su grupo de colaboradores. Se puede observar el efecto de mayor resistencia a la helada en la variedad CIEA-9 y en cultivares CR que por cruza llevan también esta capacidad, comparativamente con la cepa de la que procede.

Se agradece a la Dra. Xoconostle la información, incluyendo la presentada en esta figura, y el permiso para utilizarla en este libro.

fosfato como fertilizante (ver figura VIII.2), lo que disminuye tanto el uso como el desperdicio del agroquímico, eliminando además la utilización de herbicidas químicos como el glifosato, ya que las malezas que compiten por nutrientes con los cultivos casi no se desarrollan cuando se fertilizan con fosfito. El fosfato y el fosfito se utilizan por las plantas, incluyendo las malezas, para producir energía biológica y ácidos nucleicos. El principio de esta tecnología es sencillo: conferir a los cultivos una ventaja competitiva que les permite requerir menos fósforo y desarrollarse mejor y más rápido que las malezas al ser fertilizados con fosfito, el cual puede ser usado como nutrimento por plantas transgénicas pero no por malezas; de ahí se deriva su pobre crecimiento. Esta tecnología también fue proba-

da por el grupo del Dr. Herrera Estrella en plantas de maíz, soya y algodón, y por un grupo del Centro Internacional de Ingeniería Genética y Biotecnología en arroz, lo que corrobora la efectividad de la tecnología para reducir la cantidad de fertilizante para alcanzar una productividad óptima, así como para disminuir o eliminar la necesidad de usar herbicidas para controlar las malezas o malas hierbas.

Ciertamente todavía hay mucho que avanzar para llevar estas tecnologías y variedades desarrolladas en México a un nivel comercial, mas se trata de variedades con capacidades extraordinarias para contender asimismo con el cambio climático y los desastres naturales. Las plantas transgénicas que crecen en fosfito representan también una alternativa y una oportunidad muy



Figura VIII.2. Portada de la revista *Plant Biotechnology Journal* en la que se publicó el artículo de López Arredondo y Herrera Estrella, 2013, donde se reporta la variedad transgénica de tabaco que utiliza fosfito como fertilizante. Ésta y otras variedades transgénicas han sido diseñadas y construidas por Luis Herrera Estrella y su grupo.

© Society for Experimental Biology, Association of Applied Biologists, 2013.

Carátula reproducida con el permiso de John Wiley & Sons, Ltd.

Contrato No. 108404.

Permission granted by John Wiley & Sons, Ltd.

Contract number 108404.

importantes contra la aparición de una delicada y apremiante problemática: el incremento en la resistencia al glifosato en malezas. Este incremento se ha constatado últimamente en países que producen plantas transgénicas, también resistentes al glifosato, propiedad de compañías transnacionales. Adicionalmente, es relevante señalar que, de llegar a implementarse comercialmente el uso de cultivos capaces de usar fosfito como fertilizante, se disminuiría el grave daño ecológico que conlleva el uso excesivo de

fertilizantes, ya que al llegar a ríos, lagos o mares causan crecimiento de algas que producen toxinas y agotan el oxígeno, matando a peces y otras formas de vida marina y lacustre. Lo anterior permitiría también hacer llegar al consumidor productos con menor grado de contaminación por fertilizantes, insecticidas y herbicidas ya que, como se ha señalado antes, algunos insecticidas químicos causan daño a la salud. En el capítulo VI se aborda también cómo la tecnología del fosfito permitiría contender con el rechazo al uso del glifosato en México y en el mundo, pues se sigue señalando sin sustento que el glifosato daña la salud y contamina mantos freáticos, suelos y otros espacios, lo cual es inexacto siempre y cuando se use responsablemente en condiciones y concentraciones aprobadas por las autoridades. Por cierto, se reitera que las agencias regulatorias responsables del uso de cultivos transgénicos y del glifosato no han modificado su postura con relación a estos.

Estas aportaciones de plantas mexicanas con características extraordinarias de gran valor a nivel mundial, y evidencian que México cuenta con la capacidad para el desarrollo de biotecnología moderna y, en particular, de cultivos transgénicos para atender, paliar, modernizar y resolver necesidades actuales del campo mexicano y del planeta, necesidades relacionadas con la producción sustentable de alimentos y con soluciones sustentables para el medio ambiente. En nuestro país, el Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias ha publicado varios reportes y libros que presentan las aportaciones y beneficios de las plantas transgénicas desarrolladas en México, principalmente por el Dr. Herrera Estrella y su grupo de trabajo del

Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad (Langebio) del Cinvestav Irapuato, y por la Dra. Beatriz Xoconostle y colaboradores del Cinvestav Ciudad de México.

Cabello et al., 2001; McDuffie et al., 2001; Bolívar et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Herrera Estrella y Martínez, 2003; Ibarra et al., 2003; Ortiz y Ezcurra, 2003; Vielle et al., 2003; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Band et al., 2011; Bolívar et al., 2011; Agreda Laguna et al., 2012; Patente WO2012085806 A1, EFSA 2012; López Arredondo y Herrera Estrella, 2013; Koutros et al., 2013; Alavanja et al., 2014; Jones et al., 2014; Manna et al., 2015; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html; EFSA, 2016; NASEM, 2016; Xoconostle, 2017

PROPIEDAD COMERCIAL DE SEMILLAS

TRANSGÉNICAS Y APARICIÓN DE SEMILLAS GENÉRICAS

En cuanto a la capacidad alimentaria, es de notar la estrategia de utilizar genéricos cuando algunas de las patentes de cultivares transgénicos que se venden y utilizan actualmente en el campo hayan vencido. Se comentan también en los capítulos VI y X las consideraciones en contra de los cultivares transgénicos, en particular las diferentes estrategias comerciales para el control y producción de alimentos entre compañías transnacionales productoras de insecticidas químicos y de semillas transgénicas de primera y segunda generación, diseñadas para contener con plagas de insectos y con malezas.

Con relación a la propiedad de compañías transnacionales del maíz transgénico y otros

cultivares, es importante señalar e insistir en lo siguiente:

- Muchas de las variedades de maíz convencional que hoy se utilizan comercialmente y que son preferidas por muchos agricultores y campesinos son propiedad de compañías transnacionales.
- Es fundamental insistir en que una parte importante de las variedades de maíz transgénico de primera generación que actualmente se utilizan en el mundo —propiedad de las transnacionales—, diseñadas para contener con plagas de insectos, han perdido o perderán sus patentes en los próximos años, ya que las primeras variedades se utilizaron en 1996.
- México tendrá la posibilidad y la capacidad para utilizar libremente algunos de estos genes —junto con los mencionados previamente de crecimiento en fosfito, entre otros— para desarrollar variedades genéricas de plantas transgénicas, incluyendo maíz, algodón y otros cultivares transgénicos, para contener con plagas y otros problemas.
- Indudablemente, en unos años aparecerá en el mercado un gran número de nuevas variedades genéricas provenientes de otros países, no sólo de Estados Unidos sino también de China, India y Brasil, que comercializarán maíz y soya transgénicos, además de las provenientes de compañías transnacionales.
- Lo anterior incrementará la oferta de maíz y soya transgénicos, reduciendo así los monopolios y la dependencia actual en dichas compañías.

• Por ello, y como parte de una estrategia adecuada para desarrollar nuestras propias variedades transgénicas, es importante analizar los cultivares genéricos y aprovecharlos inteligente y sustentablemente. Es necesario enfatizar que el uso de genéricos es algo común en la economía mundial como soporte para la utilización de variedades genéricas que ayuden a contener con problemas de diversa índole.

Como se mencionó en el capítulo II, México cuenta con proteínas de origen transgénico, medicamentos genéricos recombinantes producidos por empresas transnacionales farmacéuticas. Estos medicamentos genéricos los produce desde hace 20 años la compañía mexicana Probiomed S.A., cuyos productos de origen transgénico se venden a menor precio a millones de mexicanos. Probiomed también ha exportado a diferentes países para contener con problemas de salud, sin que se hayan reportado efectos negativos en los pacientes por el uso de sus productos. Recientemente la empresa Liomont S.A. ha incursionado en la venta de vacunas de origen transgénico contra el virus de la influenza.

Esta experiencia en el manejo de genéricos en la industria farmacéutica en México demuestra que existe la capacidad para el desarrollo nacional, lo que debería llevar consecuentemente a la evaluación y utilización de vegetales transgénicos genéricos. Lo anterior también es relevante desde el punto de vista económico, ya que los productos genéricos tienen precios más accesibles en el mercado.

A lo largo de este capítulo se subraya la importancia de desarrollar variedades de plantas

transgénicas propias y adecuadas para contener con necesidades y demandas en diferentes sectores. El reciente estudio de las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos (NASEM, 2016), citado múltiples veces en esta publicación, presenta a detalle los beneficios económicos, sociales y de otros tipos de los cultivares transgénicos en algunos entornos.

Finalmente, como se señala en los capítulos II y X, es importante insistir en que las técnicas de edición fina del ADN de tipo CRISPR-Cas9 serán responsables de la construcción de organismos transgénicos de tercera y cuarta generación, en los que los transgenes se integrarán por transferencia horizontal de ADN en sitios específicos, previamente seleccionados, del genoma del organismo receptor. Existen ya en el campo ejemplos de vegetales desarrollados por estas modernas técnicas en Estados Unidos.

LBOGM 2005: www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBOGM.pdf; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Band et al., 2011; Bolívar et al., 2011; Brookes y Barfott, 2012; EFSA, 2012; Agreda Laguna et al., 2012; Patente WO2012085806 A1; EFSA, 2012; López Arredondo y Herrera Estrella, 2013; PND, 2013–2018: www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5299465; Brookes y Barfoot, 2014; PECITI, 2014–2018: www.conacyt.gob.mx/images/conacyt/PECITI_2014-2018.pdf; Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), 2015: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>; Waltz, 2015a; Waltz, 2015b; EFSA, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html; Laureates Letter Supporting Precision

Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>; Waltz, 2016; *Xoconostle*, 2017

CONCLUSIONES

El Gobierno de México debe propiciar el uso de mejores tecnologías, seguras y avanzadas, para contender de manera sustentable y responsable con las problemáticas del agro y la producción de alimentos, mientras contribuye a la seguridad alimentaria y propicia el desarrollo nacional. Estas tecnologías coadyuvan de manera inteligente a la protección del medio ambiente y la biodiversidad y, con graves problemas de contaminación por insecticidas químicos y herbicidas (algunos de ellos dañinos a la salud) y, por lo demás, con problemáticas y retos relacionados con el cambio climático y desastres naturales. El uso de capacidades tecnológicas para desarrollar mejores plantas transgénicas implica una estrategia avanzada para contender con sequías y con el incremento global de la temperatura promedio del planeta. La biotecnología, en particular el uso de plantas transgénicas, es parte fundamental del conjunto de tecnologías avanzadas, responsables, biológicas, y por ello amigables a la salud y al medio ambiente con que contamos para hacer frente a estas graves demandas y problemáticas.

El PND y el PECITI del Gobierno de la República, periodo 2013–2018, indican que la biotecnología es un área estratégica. El PECITI señala también que la biotecnología y los organismos transgénicos deben usarse de manera responsable para ayudar a contender con las demandas y

los problemas nacionales. Estos compromisos son congruentes con lo que describe la LBOGM, la cual mandata establecer instrumentos de fomento a la investigación científica y tecnológica en bioseguridad y biotecnología. Estos señalamientos coinciden con el apoyo a cultivos transgénicos en diferentes regiones del mundo, con las academias de ciencias de varios países y con la declaración de 123 premios Nobel, la cual sustenta que las plantas transgénicas que se usan en el campo representan una tecnología perfeccionada, llamada “agricultura de precisión”, que es superior, más avanzada que las anteriores y con grandes beneficios para los agricultores y el medio ambiente.

Se reitera que prohibir el uso de organismos transgénicos hará mucho más difícil atender un gran número de problemas y demandas presentes y futuras de manera sustentable. México debe implementar un programa a largo plazo para desarrollar capacidades biotecnológicas de manera contundente, en particular plantas transgénicas que podrían construirse tomando como base semillas nativas y criollas existentes para incorporarles mejores propiedades. Estas propiedades no solamente propiciarían una mejor utilización de variedades nativas al hacerlas más productivas y resistentes, sino que además incentivarían la protección y el uso de muchos genes valiosos presentes en plantas nativas, máxime que las patentes de los cultivos transgénicos de primera generación están expirando. Se hace hincapié en que hay que aprovechar esta coyuntura para desarrollar semillas transgénicas adecuadas a los problemas y necesidades en México. Se indica que se cuenta con diferentes colecciones de la bacteria *Bacillus thuringiensis* y de otros procariones que producen

diferentes bioinsecticidas, para contender con una gama de insectos plaga, que podrían utilizarse en un futuro. Asimismo, en nuestro país, como ya se ha señalado, cuenta con variedades transgénicas de tercera generación con propiedades extraordinarias. Además de resistencia a plagas de insectos, estas características son la de utilizar fosfito como fertilizante y ser resistentes a sequías y heladas. Se insiste en que las plantas capaces de crecer en fosfito desarrolladas por el Dr. Herrera Estrella permitirán en algún momento cuando se comercialicen, eliminar el uso de herbicidas como el glifosato, ya que las malezas que éste elimina no crecen en fosfito, por lo que el uso de glifosato disminuirá, con las extraordinarias ventajas que esto implica. Sin embargo, es fundamental que los agricultores de México tengan acceso a tecnologías que reduzcan la injusticia en el campo, ayuden a enfrentar problemáticas existentes y derramen beneficios. Entre estas alternativas tecnológicas están las semillas transgénicas que se usan en varios países de Iberoamérica y Estados Unidos. Lo anterior no implica que se deba imponer ninguna tecnología, sino ofertar y señalar alternativas, exponer ventajas y beneficios, advertir sobre el riesgo de usarlas pero también sobre el de no utilizarlas. En suma, se debe permitir al agricultor elegir la tecnología que le sea más útil y que tenga mayores beneficios para el medio ambiente. Por cierto, se reitera que las agencias regulatorias responsables del uso de cultivos transgénicos y del glifosato no han modificado su posición con respecto a éstos.

Es inmoral e injusto que las plantas transgénicas se sigan satanizando por supuestos daños cuando los múltiples beneficios que se han

señalado en capítulos previos están permitiendo la adopción de esta tecnología por los agricultores de muchos países del mundo. Se ha mencionado, y se remarca de nuevo, que todos los señalamientos a los cultivos transgénicos por supuestos daños a la salud, al medio ambiente y la biodiversidad son falsos y carecen de sustento científico sólido.

Finalmente se debe alertar que, de acuerdo a las predicciones de los efectos del cambio climático en diferentes regiones del planeta, México será uno de los países más afectados por incremento de temperaturas y reducción de lluvias, por lo que resulta imperante que se establezca un gran programa de desarrollo de variedades de todos los cultivos que se requerirán para mantener la producción sustentable e inteligente de alimentos para los próximos 30 años a nivel nacional. Por ello se insiste en que se tendrá que hacer uso de toda la tecnología disponible, incluyendo esquemas de mejoramiento genético tradicionales, ingeniería genética y edición fina de genomas, ya que muchos de los nuevos organismos transgénicos se construirán a través de esta poderosa metodología, toda vez que varios organismos genéticamente mejorados no serán necesariamente transgénicos. También se requerirá todo el extraordinario, ancestral y profundo conocimiento existente sobre las muchas y diferentes plantas mexicanas y sus variedades, particularmente las que crecen en regiones desérticas y de temporal, no solo para concertar sino para potenciar capacidades y conocimientos que ayuden a mitigar y contender con problemas, desastres y siniestros actuales y futuros, incluyendo la preservación de variedades nativas.



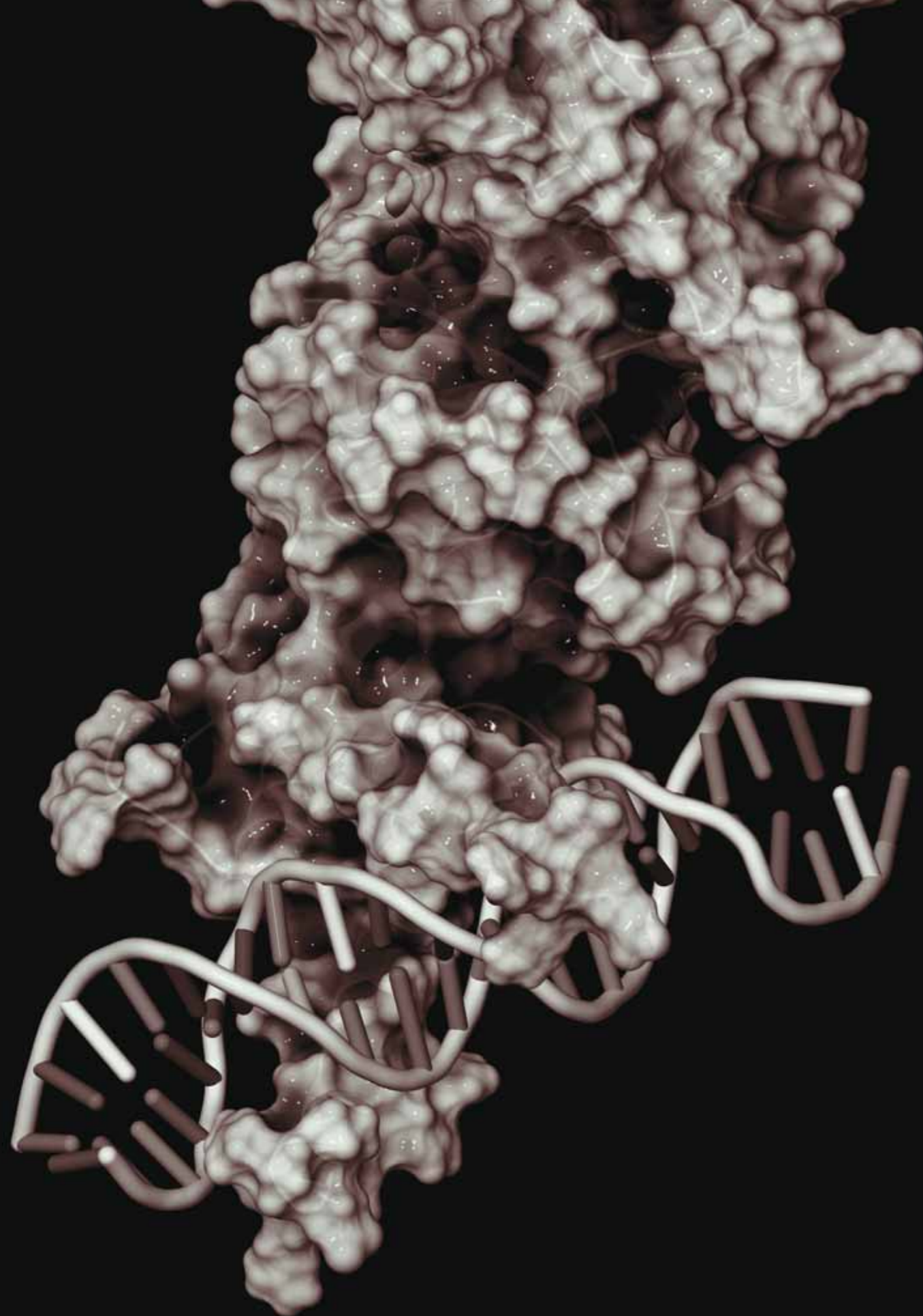
Figura VIII.3. Es importante desarrollar variedades mexicanas de maíz y de otros vegetales para contender con la demanda alimentaria actual y futura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agreda Laguna K.A. *et al.* 2012. Methods to obtain drought resistant plants. Patente WO 2012085806 A1. Desarrollada por B. Xoconostle y colaboradores.
2. Alavanja M.C.R. *et al.* 2014. Non-Hodgkin lymphoma risk and insecticide, fungicide and fumigant use in the agricultural health study. *Plos One* 9(10): e109332.
3. Band P.R. *et al.* 2011. Prostate cancer risk and exposure to pesticides in British Columbia farmers. *Prostate* 71(2): 168–183.
4. Bolívar F., Arias C., Arriaga E., Barrera H., Bosch P., Espinosa J., Galindo E., Gálvez A., Gracia A., Herrera Estrella L., Larqué A., López-Munguía A., Muñoz O., Noyola A., Ortega R., Quintero R., Ramírez O., Revah S., Serrato J., Soberón J., Soberón X. 2002. Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), Fondo de Cultura Económica y Conacyt, Ciudad de México.
5. Bolívar F. *et al.* 2003. Fronteras de la Biología en los Inicios del siglo XXI. Módulo 1: Genómica, proteómica y bioinformática, Módulo 3: Biotecnología agrícola, Módulo 7: Ingeniería celular, biodiversidad e industria. El Colegio Nacional, Ciudad de México.
6. Bolívar F. *et al.* 2007. Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), 2ª edición, El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.
7. Bolívar F. *et al.* 2011. Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados. Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.
8. Brookes G., Barfoot P. 2012. Global Impact of biotech crops. Environmental effects 1996–2010. *GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 3(2): 129–137.
9. Brookes G., Barfoot P. 2014. Economic impact of GM crops: The global income and production effects 1996–2012. *GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 5(1): 65–75.
10. Cabello G. *et al.* 2001. A rat mammary tumor model induced by the organophosphorous pesticides parathion and malathion, possibly through acetylcholinesterase inhibition. *Environ. Health Perspect.* 109(5): 471–479.
11. EFSA (European Food Safety Authority). 2012a. Final review of the Séralini *et al.* (2012a) publication on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603 as published online on 19 September 2012 in *Food and Chemical Toxicology*. *EFSA J.* 10(11): 2986. www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf
12. EFSA (European Food Safety Authority). 2016. Modification of existing maximum levels of residue levels of glyphosate in borage and corn gromwell seeds. *EFSA J.* 14(4): 4468, 20 pp. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2016.4468/epdf>
13. Herrera Estrella L., Martínez M. 2003. Aplicaciones y controversias de las plantas transgénicas. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella

- (Coords.), El Colegio Nacional, Ciudad de México.
14. Herrera Estrella L., Martínez M. 2007. Plantas transgénicas. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), 2ª edición, pp. 67–194, El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.
 15. Ibarra J., Soberón M., Bravo A. 2003. La biotecnología y el control biológico de insectos. En: Fronteras de la Biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3. Biotecnología Agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.), El Colegio Nacional, Ciudad de México.
 16. Jones R.R. *et al.* 2014. Incidence of solid tumours among pesticide applicators exposed to the organophosphate insecticide diazinon in the agricultural health study: an updated analysis. *Occup. Environ. Med.* 72: 496–503.
 17. Koutros S. *et al.* 2013. Risk of total and aggressive prostate cancer and pesticide use in the agricultural health study. *Am. J. Epidemiol.* 177(1): 59–74.
 18. Laureates Letter Supporting Precision Agriculture (Declaración de premios Nobel a favor de la agricultura de precisión). 2016. <http://supportprecisionagriculture.org/> http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html
 19. Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM). 2005. México. www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBOGM.pdf <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>
 20. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). 2015. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>.
 21. López Arredondo D.L., Herrera Estrella L. 2013. A novel dominant selectable system for the selection of transgenic plants under *in vitro* and greenhouse conditions based on phosphite metabolism. *Plant Biotechnol. J.* 11(4): 516–525.
 22. Manna M. *et al.* 2016. The development of a phosphite-mediated fertilization and weed control system for rice. *Scientific Reports* 6: 24941. DOI: 10.1038/srep24941.
 23. McDuffie H.H. *et al.* 2001. Non-Hodgkins lymphoma and specific pesticide exposures in men: cross-Canada study of pesticides and health. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 10(11): 1155–1163.
 24. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2016. Genetically engineered crops: experiences and prospects (Cultivos desarrollados por ingeniería genética: experiencias y prospectivas). The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/23395>
 25. Ortiz S., Ezcurra E. 2003. La liberación de cultivos transgénicos al medio ambiente: esquemas adecuados y su importancia en el manejo de riesgo. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.), El Colegio Nacional, Ciudad de México.
 26. Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación (PECiTI). 2014–2018. Gobierno de la República, Conacyt. Capítulo II, Alineación a las metas nacionales, II.2 Prioridades del Sector de Ciencia, Tecnología e Innovación, 50 pp. www.conacyt.gob.mx/images/conacyt/PECiTI_2014-2018.pdf.
 27. Plan Nacional de Desarrollo (PND). 2013–2018. Gobierno de la República. Meta IV: México próspero. Aprovechar el desarrollo de la biotecnología cuidando el medio ambiente y la salud humana. Línea de acción. Estrategia 4.10.4. Objetivo 4.10: Construir un sector agropecuario y pesquero que garantice la seguridad alimentaria. 142p. www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5299465
 28. Vielle Calzada J.P. *et al.* 2003. De ser flor a ser semilla y sus aplicaciones biotecnológicas. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.), pp. 9–26, El Colegio Nacional, Ciudad de México.
 29. Waltz E. 2015a. Non Browning GM apple cleared for market. *Nat. Biotech.* 33(4): 326–327.
 30. Waltz E. 2015b. USDA approves next generation GM potatoes. *Nat. Biotech.* 33(1): 12–13.
 31. Waltz E. 2016. CRISPR edited crops free to enter the market, skip regulation. *Nat. Biotech.* 34(6): 582.
 32. Xoconostle B. 2017. Comunicación personal con F. Bolívar sobre las características de la planta transgénica de maíz CIEA-9, las cuales se describen en el capítulo VIII.





CAPÍTULO IX

LA TRANSGÉNESIS: UN PROCESO NATURAL QUE OCURRE EN LA BIOTA

- CREACIÓN DE TRANSGÉNICOS MEDIANTE PROCESOS DE TRANSFERENCIA HORIZONTAL DE ADN Y POSTERIOR REORGANIZACIÓN DEL GENOMA, SIMILARES A LOS PROCESOS NATURALES QUE OCURREN POR LA TRANSGÉNESIS
- INOCUIDAD Y BAJO RIESGO DE LOS TRANSGÉNICOS

INTRODUCCIÓN

Una amplia gama de evidencia científica soporta la inocuidad de los transgénicos que son utilizados hoy en día, demuestra la ausencia de daño a la salud humana, a la biodiversidad y al medio ambiente, y sustenta las razones para considerarlos la alternativa tecnológica más cercana a la naturaleza, de menor riesgo y de menor impacto al medio ambiente. Este capítulo se ocupa de comentar esta evidencia a detalle, toda vez que ha sido comentada anteriormente en los capítulos II y IV.

La información científica y las consideraciones que se presentan a continuación aportan elementos relevantes sobre el bajo riesgo de los organismos genéticamente modificados (OGM), los cuales son creados por procesos de transferencia horizontal de ADN y su posterior

reorganización con el genoma de la célula receptora. Como se ha señalado en el capítulo II, el ADN de todos los seres vivos (y de los virus) tiene la misma estructura general, y ésta es la razón principal que permite la recombinación de materiales genéticos de diferentes orígenes en el interior de las células de manera natural. Lo anterior es congruente también con el hecho de que todos los seres vivos tenemos un precursor común y, por lo tanto, compartimos muchos genes de diferentes orígenes. Esta información, soportada científicamente, sustenta la propuesta de que los transgénicos son organismos creados por mecanismos similares a los que han ocurrido y ocurren en la naturaleza.

La transgénesis es un fenómeno natural que ha ocurrido y seguirá ocurriendo en la biodiversidad independientemente de la existencia o no de organismos transgénicos. La transgénesis

implica, en esencia, la transferencia horizontal de ADN de cualquier origen a la célula receptora y la posterior reorganización del ADN con el genoma de la célula que lo recibe. A lo largo del tiempo ha sido responsable de la adquisición de funciones nuevas, en particular en plantas. Ejemplos de esto son los genes responsables de la fotosíntesis, que originalmente se encontraban en bacterias, y la transferencia horizontal de las actuales mitocondrias y cloroplastos a vegetales. Por ello la transgénesis, mediante la transferencia horizontal de ADN, ha sido en parte responsable de la evolución de las especies. Se remarca que la razón más importante de este fenómeno es que la estructura general de la molécula de doble hélice de ADN es la misma en todos los seres vivos.

Es importante señalar que, sin embargo, los actuales organismos vivos hemos desarrollado mecanismos que nos permiten contender con y eliminar los ADN de origen foráneo o heterólogo que pudieran llegar a las células por transferencia horizontal de ADN, como el proveniente de infecciones virales. Debido a ello, la transgénesis es hoy un fenómeno poco frecuente que, no obstante, sigue ocurriendo, particularmente por la infección de ciertos virus que incorporan su material genético en los cromosomas de las células que infectan, como el virus de inmunodeficiencia humana (VIH), y también mediado por ciertas bacterias, como la *Agrobacterium tumefaciens* que transfiere horizontalmente parte de su material genético a las plantas que infecta.

También cabe destacar que los organismos transgénicos se construyen principalmente a través de técnicas de ingeniería genética que implican transferencia horizontal de ADN

y reorganización del genoma en la célula receptora a fin de generar organismos con mejores capacidades, siguiendo el ejemplo de la transgénesis, por lo cual son organismos de bajo riesgo.

Las secciones siguientes listan las principales consideraciones y evidencias que soportan el bajo riesgo en la transferencia horizontal del ADN y posterior reorganización del genoma de la célula receptora.

LA TEORÍA DE LA EVOLUCIÓN DE CHARLES DARWIN SEÑALA QUE TODOS LOS SERES VIVOS TENEMOS UN PRECURSOR BIOLÓGICO COMÚN

Esta propuesta ha sido fortalecida y consolidada por numerosas evidencias científicas a lo largo de los años. Entre ellas se encuentra la amplia evidencia generada a partir de la determinación de las secuencias nucleotídicas (secuenciación) de los genomas de diferentes organismos, incluido el humano, las cuales han permitido comparar genomas y demostrar que todos los seres vivos compartimos material genético, incluidos muchos genes (ver figura IX.1). De hecho, el genoma humano es 98% similar al del chimpancé, 90% al del ratón, 40% al de la mosca, 30% al de las plantas y 20% al de la levadura, que es un microorganismo eucariote (ver figura IX.2). También tenemos, como parte de nuestro genoma, genes de origen bacteriano, incluidos aquellos localizados en mitocondrias, que son organelos de nuestras células.

Es tan contundente la evidencia que sustenta la teoría de la evolución de las especies que para muchos investigadores, entre ellos

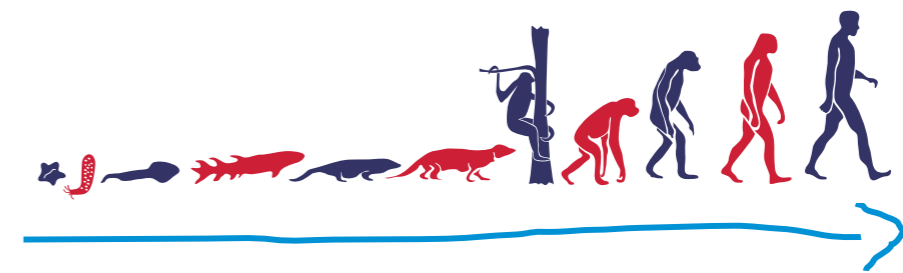


Figura IX.1. Evolución de las especies. La evidencia señala que todos los seres vivos derivan de un precursor biológico común.

Richard Dawkins, la evolución es ya un hecho con sustento científico y no una teoría, de la misma manera que los planetas giran alrededor del sol y que las plantas fijan la energía de los rayos del sol, son hechos con sustento científico probado y comprobado. Además, conforme a la teoría de la selección natural y a otras eviden-

cias de asociación entre organismos, hoy podemos entender la evolución como un proceso de evolución adaptativa que tiene como resultado generar organismos mejor capacitados.

Darwin, 1859; Darwin y Wallace 1859; Johanson y Edey, 1981; Watson et al., 1988; Watson et al.,

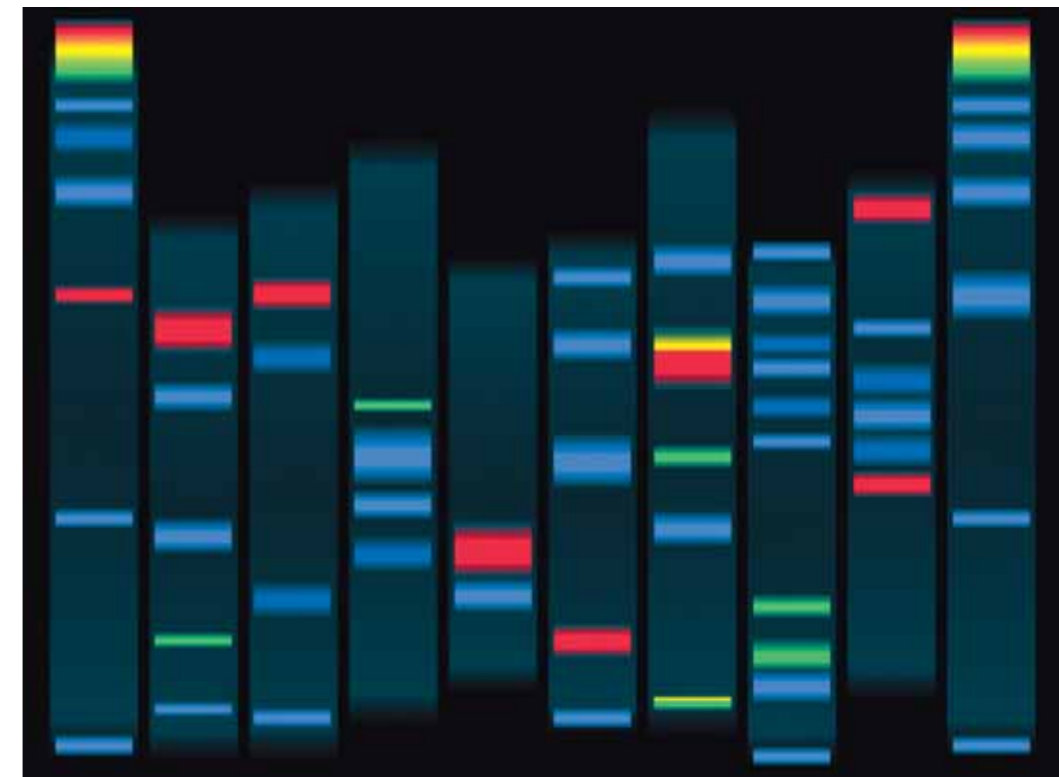


Figura IX.2. Fotografía que muestra un conjunto de bandas que se generan en los procesos de determinación de secuencias de nucleótidos que conforman el ADN en genomas de seres vivos.

1996; Brown, 1999; Andersson et al., 2001; Venter et al., 2001; Herrel et al., 2004; Young y Deis, 2004; Margulis y Sagan, 2005; Carroll, 2006; Bolívar, 2007; Bolívar et al., 2007; Coyne, 2009; Dawkins, 2009; Bolívar et al., 2011; Hayden, 2011

EL ADN TIENE LA MISMA ESTRUCTURA GENERAL DE DOBLE HÉLICE EN TODOS LOS ORGANISMOS VIVOS

Con excepción de algunos virus que tienen RNA como genoma, el material genético constituido por el ADN tiene la misma estructura general para todos los virus y seres vivos, sean bacterias (microorganismos que no tienen núcleo, llamados también procariotes) o plantas o animales (organismos eucariotes que tienen un núcleo en sus células donde reside el ADN en los cromosomas), como se detalla en las figuras II.2, IX.3 y IX.4. La diferencia entre todos es la secuencia de los cuatro tipos de nucleótidos que integran la doble hélice del ADN de cada organismo (ver figuras II.4 y II.5).

Los virus son organismos integrados por proteínas y ácidos nucleicos (ADN o ARN). No se consideran seres vivos ya que no contienen todas las capacidades y propiedades de éstos. Son parásitos moleculares que al infectar a las células de los organismos vivos pueden apro-

vechar los componentes y capacidades de ellos para reproducirse en el interior de la célula. Las alternativas que tienen los virus al infectar las células se comentan más adelante.

Como se señala en el capítulo II, la estructura universal del ADN hace posible de manera natural transferir, incorporar, estabilizar y recombinar genes de un organismo con material genético de otros. La célula viva reconoce el material genético de otro origen que puede adquirir por vías que implican transferencia horizontal —infección viral o bacteriana—, y en la mayor parte de los casos lo degrada. Pero también puede incorporarlo, duplicarlo y utilizarlo como propio —como parte de su genoma en algunos casos— después de un fenómeno de recombinación genética que implica la reorganización del ADN proveniente de infecciones con el genoma de la célula receptora. La estructura general del ADN es así la propiedad más importante sobre la que se sustenta el fenómeno natural de la transgénesis. Algunos ejemplos se presentan a continuación.

Avery et al., 1944; Watson y Crick, 1953a; Watson y Crick, 1953b; Watson et al., 1988; Watson et al., 1996; Lengeler et al., 1996; Brown, 1999; Margulis y Sagan, 2005; Bolívar et al., 2007; Bolívar et al., 2011



Figura IX.3. Estructura bidimensional del ADN. El material genético tiene la misma estructura general en todos los seres vivos y también en los virus.

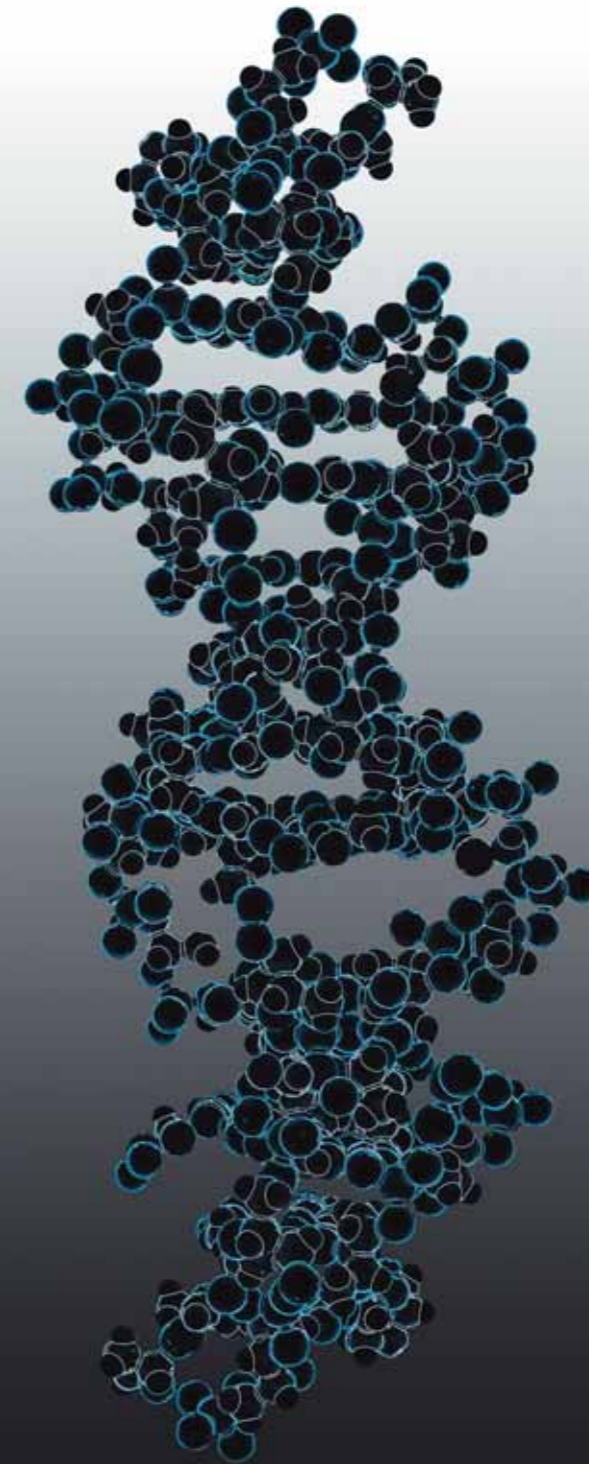


Figura IX.4. Estructura tridimensional del ADN.

LA TRANSGÉNESIS ES UN FENÓMENO DE TRANSFERENCIA HORIZONTAL DE ADN Y REORGANIZACIÓN DEL GENOMA QUE OCURRE EN TODOS LOS ORGANISMOS VIVOS

Si bien la transgénesis puede ocurrir en todos los seres vivos, los virus y las bacterias han sido y siguen siendo los principales en propiciarla. Cuando un virus infecta a una célula (ver figura IX.5) su material genético propio se incorpora al interior (citoplasma) de aquella, dando lugar al fenómeno de transferencia horizontal de ADN viral en la célula infectada (ver figura IX.6). Al llevarse a cabo la infección (inyección) de material genético viral a la célula, existen diferentes alternativas respecto a lo que ocurrirá al material genético proveniente del virus, dependiendo del tipo de virus de que se trate. La más común es que la célula infectada contenga el problema degradando el material genético proveniente del virus. Sin embargo, en algunos casos, el material genético viral se apodera de la maquinaria de la célula infectada utilizándola para copiar muchas veces el genoma del virus. A partir de este proceso se sintetizan las proteínas que luego formarán parte de las partículas virales generadas, es decir, de los nuevos virus. Posteriormente, la célula es destruida y se liberan múltiples copias de los virus recién formados (ver figura IX.7). Un ejemplo de este tipo de virus es el de la influenza A (H1N1), el cual tiene ARN como material genético y es capaz de infectar a diferentes huéspedes animales: humanos, cerdos, perros, caballos y aves (gripe aviar), entre otros.

Este fenómeno de “zoonosis” pareciera ocurrir mucho más frecuentemente de lo que

imaginamos y podemos detectar, dada la capacidad de los virus para infectar organismos de diferentes especies animales. Asimismo, animales distintos pueden infectarse simultáneamente por virus provenientes de orígenes distintos. Este tipo de fenómeno incrementa la frecuencia de rearrreglos y recombinaciones del material genético de los virus, como ocurre con el de la influenza.

Otros virus que infectan a las bacterias, llamados transductantes, son capaces de generar al mismo tiempo nuevos virus y partículas llamadas pseudovirales que contienen ADN de la bacteria infectada, además y en lugar del material genético del virus. Así, mediante estas partículas (que son funcionales ya que pueden infectar otras bacterias) se transfiere horizontalmente material genético a las bacterias.

Otro tipo de virus que existen tanto en bacterias como en células de animales y plantas son capaces de incorporar sus genomas como parte del material genético de las células infectadas. En las bacterias, a este tipo de virus se les conoce como lisogénicos y pueden incorporar su genoma de ADN viral en diferentes sitios o *locus* del cromosoma bacteriano.

En el caso de los organismos eucariotes como plantas y animales, existen virus llamados retrovirus, similares al VIH, cuyo genoma está constituido por ARN y que es capaz, después de infectar a la célula receptora, de transcribir (copiar) su genoma de ARN en ADN mediante el proceso de transcripción reversa (ver figura II.3). Posteriormente, el retrovirus integra una copia de su genoma de ADN en diferentes sitios de los cromosomas de las células infectadas mediante un proceso de recombinación

genética (ver figura IX.7). En ambos casos, tanto en bacterias (procariotes) como en células de animales y plantas (eucariotes) estos virus, lisogénicos y retrovirales, tienen la capacidad de reorganizar y modificar el genoma de las células infectadas, integrando sus genomas virales en los cromosomas de las células receptoras. Finalmente, evidencia reciente demuestra que otros tipos de virus, bornavirus y virus similares al del ébola, también son capaces de modificar el genoma animal.

De esta forma, mediante procesos naturales, los seres vivos incrementan, modifican y reorganizan sus genomas en las células infectadas. La evidencia científica indica que la transferencia horizontal por infección viral desempeña un papel importante tanto en la evolución de

las especies como en la estructuración y reorganización del genoma. La razón de lo anterior es que el ADN que llega a la célula a través de infección viral u otro mecanismo tiene la misma estructura general tanto en organismos eucariotes como en bacterias (virus lisogénicos), al igual que el ADN que se genera por transcripción reversa de material genético de retrovirus cuyo genoma está compuesto por ARN. Por ello, las células pueden recombinar y reorganizar su propio ADN con el genoma de origen viral y con el de cualquier otro origen. De hecho, los genomas de todos los organismos, en particular los eucariotes (incluyendo el humano), contienen una gran cantidad de ADN retroviral, que son secuencias provenientes de infecciones virales por retrovirus (como el VIH) que ocurrieron en

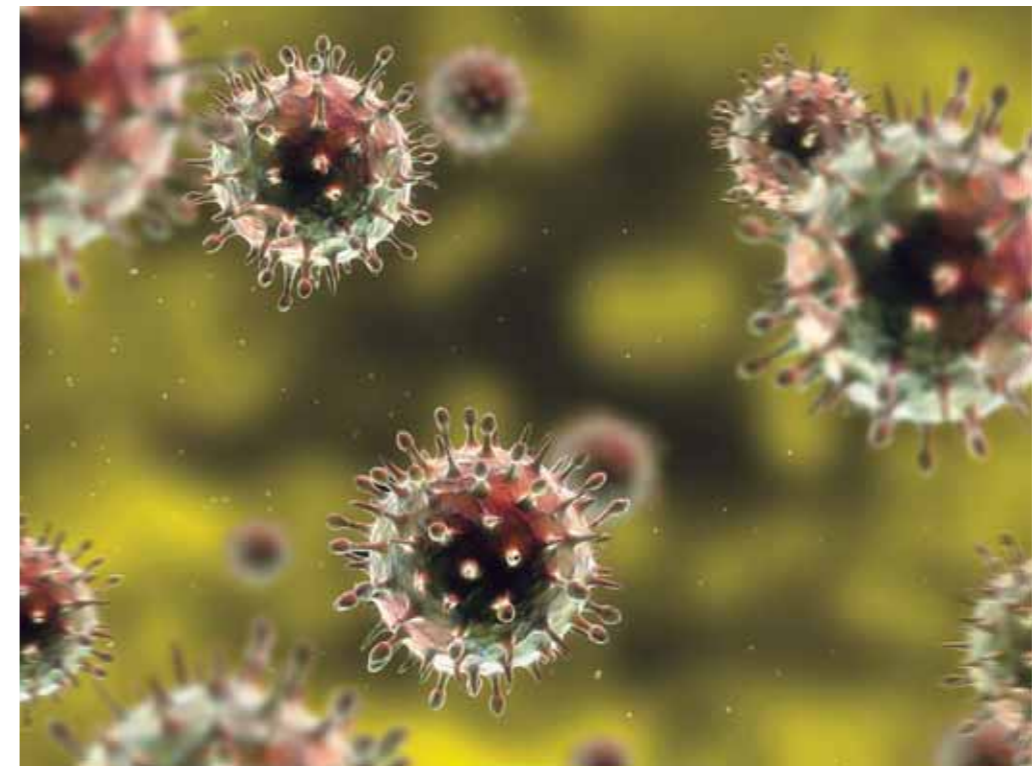


Figura IX.5. Virus de la influenza.

organismos precursores durante la evolución. Este fenómeno sigue sucediendo en eucariotes, incluyendo el hombre; el VIH como responsable del sida es un ejemplo de ello.

De cualquier manera es importante insistir que muchos de los fragmentos de ADN recibidos por transferencia horizontal en la célula pueden ser degradados y eliminados por el organismo vivo antes de que tengan un efecto biológico, en particular los de origen viral. Ciertamente, los ejemplos que se mencionan en este capítulo son casos en que la célula receptora no reconoce el ADN como foráneo y lo incorpora como parte de su genoma, en algunos casos con beneficios.

El fenómeno de transferencia horizontal de material genético ocurre frecuentemente en el reino microbiano, donde las bacterias re-

ciben e incorporan material genético de otros orígenes, incluyendo plásmidos —moléculas pequeñas y circulares de ADN— gracias al llamado también “fenómeno de transformación”. Este mecanismo permite que material genético heterólogo (de otro origen) pueda transportarse a través de las membranas de las células y estabilizarse en la célula que lo recibe. Ciertamente, las bacterias también tienen mecanismos para eliminar material genético de otro origen y normalmente lo degradan.

Para estabilizarse cuando no es degradado por la bacteria receptora, el ADN de otro origen normalmente se incorpora al genoma de la célula receptora mediante el fenómeno de recombinación genética. Esto genera un cambio —una nueva función en muchos casos—, es decir una

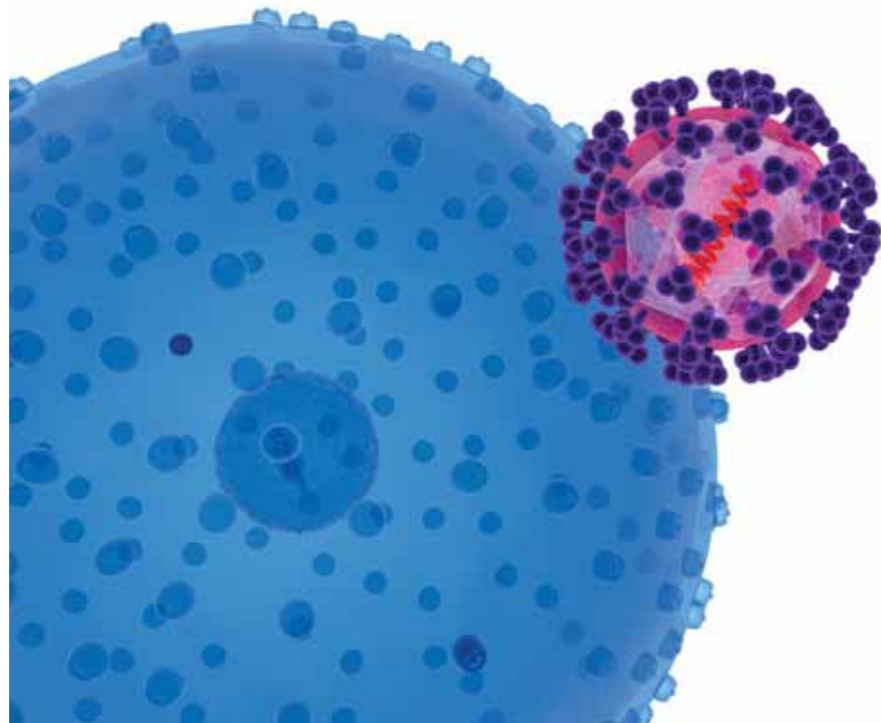


Figura IX.6. Retrovirus infectando a una célula.

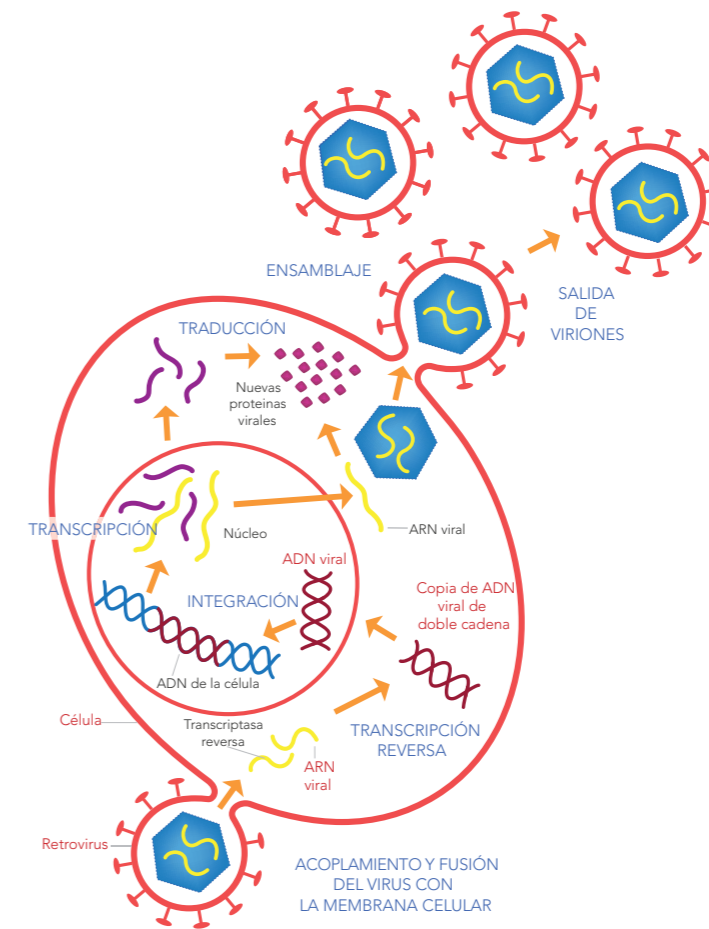


Figura IX.7. Esquema de infección viral por un retrovirus a una célula eucariote, mediante la cual el ARN viral se copia en ADN que luego se integra en el ADN de algún cromosoma de la célula infectada.

mutación, en el genoma de la célula receptora. El material genético puede provenir de cualquier organismo que habita el suelo, incluyendo el de organismos que mueren. Se sabe que la bacteria *S. pneumoniae* —causante de la neumonía— sufre estrés al ser sometida a tratamiento con antibióticos, lo que a su vez induce un incremento en su capacidad de transformación por ADN que le permite incrementar la viabilidad (ver figura IX.8). Probablemente, a través de este fenómeno, dicha bacteria incrementa su capacidad para adquirir genes de otros organismos, como aquellos relacionados con la

resistencia a antibióticos que producen otros microorganismos. Esto demuestra que existen organismos que poseen mecanismos para incrementar su capacidad de transformación por ADN, lo cual sugiere que la transformación o transferencia horizontal con ADN lineal puede ser un fenómeno no sólo pasivo, sino activo.

Otro ejemplo de una bacteria muy importante es la *Escherichia coli*. Diferentes cepas o variantes de esta bacteria son comensales naturales, parte de la flora microbiana que habita el intestino de varios mamíferos, incluyendo el humano, sin generar problemas. Sin embargo,

existen cepas patógenas de *E. coli* que pueden generar problemas importantes, incluyendo diarreas intestinales y daños a otros órganos como el riñón. Se ha demostrado de manera concluyente que la transferencia horizontal de ADN en ésta y otras bacterias es el proceso responsable de la generación de nuevas variedades patógenas. Una cepa patógena de esta bacteria para el humano —originalmente catalogada como la *E. coli* EH104:H4—, descrita en Europa, causó la infección de muchos individuos en un periodo muy corto, varios de los cuales fallecieron. Esta variedad causa simultáneamente diarrea intestinal con sangre y el síndrome urémico-hemolítico en riñones, responsable de sangrado en éstos. Es muy probable que esta variedad sea el resultado de la incorporación en una bacteria patógena, ya existente, de ADN de otra bacteria patógena, que modificó e incrementó sus capacidades para causar daño. En el caso de cepas de *Escherichia coli* que son muy cercanas filogenéticamente, la incorporación de ADN puede darse a través de transferencia horizontal de ADN con material genético liberado al medio, o bien mediante un proceso de conjugación que ocurre entre bacterias. Datos a nivel de la secuencia del genoma de la nueva variante señalan que su genoma está constituido principalmente por ADN de la cepa EAEC 55989 (enteroagregativa *Escherichia coli*), además de material genético de otro tipo de *E. coli* llamado EHEC (enterohemorrágica *Escherichia coli*), la cual produce una toxina tipo “shiga” que causa diarrea intestinal y, en algunos casos, infección de los riñones y hemorragia consecuente. También es probable que la nueva cepa haya estado presente como



Figura IX.8. Cultivos de bacteria patógena, en cajas de Petri, capaz de incrementar su capacidad de ser transformada por ADN lineal.

una variante de EAEC que adquirió al menos el gen que codifica para la toxina shiga.

Por otro lado, se ha demostrado que, de manera natural, existe actualmente transferencia horizontal de material genético de microorganismos a plantas, como es el caso de las bacterias *Agrobacterium tumefaciens* y *Agrobacterium rhizogenes*. Éstas tienen la capacidad de infectar y de manipular genéticamente a las células de la mayoría de las especies vegetales, incluyendo maíz, frijol, arroz y hongos, transfiriendo horizontalmente un fragmento de ADN (ADN-T) que se incorpora al genoma de la planta infectada

como se ha señalado previamente. Este fragmento causa que la planta genere cierto tipo de moléculas, llamadas opinas, en beneficio de la bacteria que infecta. El ADN-T de *Agrobacterium* constituye un sistema natural de transferencia de ADN entre bacterias y plantas superiores y, como se muestra en la figura IX.17, ha sido usado para la construcción de plantas transgénicas.

Es relevante señalar el reporte reciente de Kyndt y colaboradores, 2015, donde se demuestra que la mayoría de los cultivares de camote usados en la agricultura son transgénicos naturales y no creados por el hombre. En estos camotes domesticados existe ADN proveniente de *Agrobacterium tumefaciens* que aparentemente influye en el tamaño y propiedades nutricionales de este tubérculo, comparados con variedades ancestrales no transgénicas. Esto indica que, en ciertos casos, la transferencia horizontal de ADN

de *Agrobacterium* puede ser responsable de crear beneficios en ciertos cultivos de manera natural. Si este es un caso único o más generalizado en especies vegetales se determinará conforme tengamos mayor conocimiento sobre los genomas de diferentes especies. Pudiera ser que existan otros casos de transferencia horizontal de ADN bacteriano por infección a vegetales que no hayan sido detectados al no ser relevantes para los agricultores, como el *Agrobacterium*. La razón, se insiste, es que los microorganismos y las raíces de las plantas cohabitan e interactúan en el suelo, algunas veces con ventajas para las plantas. En este sentido es relevante recordar el importante papel que los microorganismos *rhizobia* desempeñan en los nódulos de las plantas fijadoras de nitrógeno.

Las bacterias (ver figuras IX.9 y IX.10) se utilizan como modelo en el laboratorio ya que

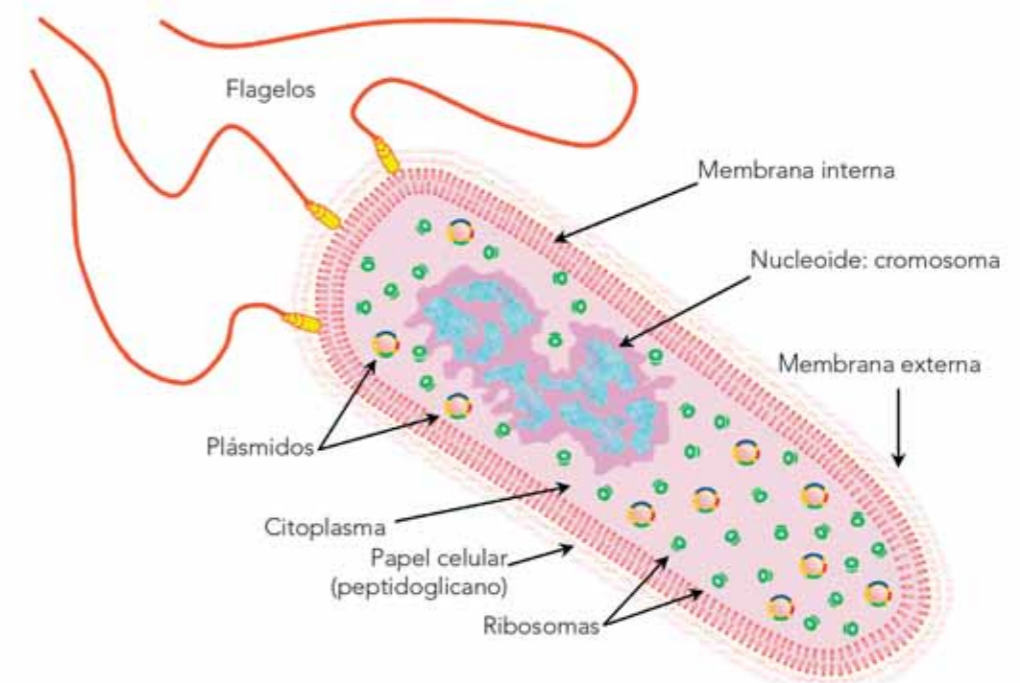


Figura IX.9. Esquema de una célula bacteriana como *Escherichia coli* y sus componentes.

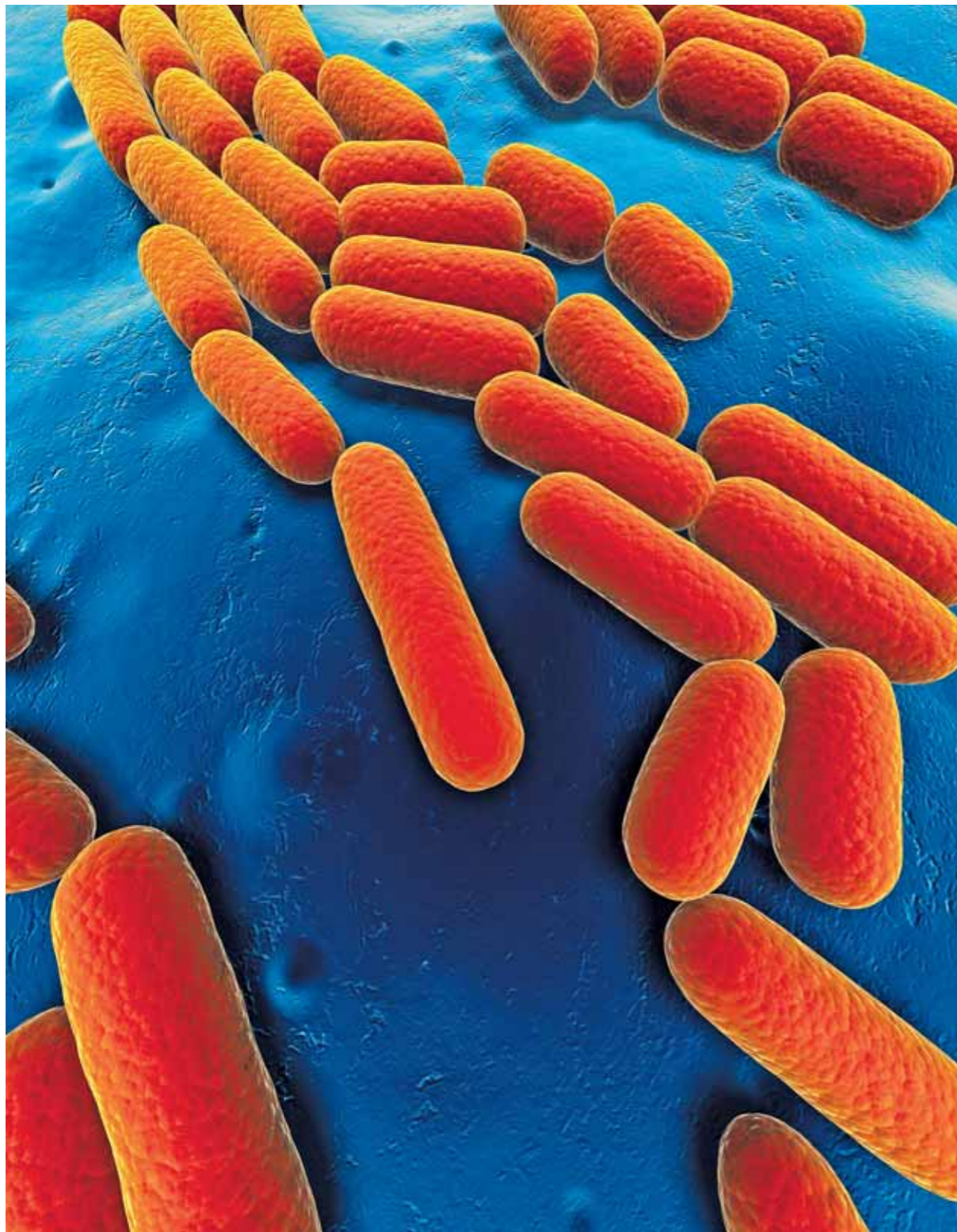


Figura IX.10. Bacterias, organismos unicelulares vistos al microscopio.

son fácilmente transformables por ADN lineal o circular, ya sea del mismo origen o de otro. También se estudian frecuentemente en contextos de laboratorio al ser responsables de algunos problemas en la salud humana, animal y vegetal.

Los procesos de transformación horizontal por ADN permiten incrementar el tamaño del genoma de la célula viva receptora, lo cual amplía las capacidades y funciones de las células vivas, incluyendo aquellas de los organismos transgénicos. Como se ha señalado, en un principio la transferencia horizontal de ADN en transgénicos generó preocupaciones debido a las consecuencias que este tipo de transferencia conlleva entre microorganismos. Sin embargo, como se comenta en los capítulos II y VI, la transferencia de transgenes no implica riesgo ya que la incorporación de un transgén en el genoma de una planta no implica daño *per se*, y el fenómeno de transferencia horizontal de ADN, en particular por infecciones, ha ocurrido y ocurre en la biota independientemente de los transgénicos.

Lwoff, 1953; Cohen et al., 1973; Jackson et al., 1972; Sánchez et al., 1975; Itakura et al., 1977; Korana, 1979; Herrera Estrella et al., 1983; Colleaux et al., 1986; Michel y Dubon, 1986; Mullis y Falona, 1987; Watson et al., 1988; Mazodier y Davis, 1991; Ptashne, 1992; Arber, 1993; Joset y Guespin, 1993; Matic et al., 1995; Tagahian y Nickoloff, 1995; Campbell, 1996; Voytas, 1996; Watson et al., 1996; Kaper et al., 1997; Aravind et al., 1998; Doolittle, 1998; Lengeler et al., 1999; Brown, 1999; Denamur et al., 2000; Hacker y Kaper, 2000; Madigan et al., 2000; Emini, 2002; Herrera Estrella et al., 2002; Schubert et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Brusow et al., 2004; Chen y Dubnau, 2004; Margulis

y Sagan, 2005; Prudhomme et al., 2006; Barrera, 2007; Bolívar, 2007; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Keese, 2008; Treangen et al., 2008; Arias et al., 2009; Dawkins, 2009; Garten et al., 2009; Schubert et al., 2009; Touchon et al., 2009; Belyi et al., 2010; Horie et al., 2010; Enserink, 2011; Kupferschmidt, 2011; Bolívar et al., 2011; Ozden, 2012; Crisp et al., 2015; Kyndt et al., 2015; Pinkert, 2016

LA ENDOSIMBIOSIS, OTRO TIPO DE TRANSFERENCIA HORIZONTAL DE ADN MUY IMPORTANTE PARA LA EVOLUCIÓN DE LOS EUCARIOTES

Existe evidencia contundente de que el genoma de los organismos superiores ha evolucionado naturalmente y ha incrementado parte de su material genético a través de infecciones virales. Probablemente, material genético de microorganismos y de otros orígenes presentes en suelos y aguas (que habría infectado o habría sido adquirido por transferencia horizontal) modificó el genoma de nuestros antepasados, reorganizando el material genético de las células receptoras.

Es amplia y clara la información que sustenta que hubo una incorporación de material genético en etapas tempranas de la evolución en células animales y vegetales, a través de la infección o de la asociación por precursores de los actuales organelos celulares, los cuales son similares a las bacterias. Esto pareciera ser el caso de la mitocondria, organelo celular responsable de la síntesis de energía biológica como ATP, y del cloroplasto, responsable de la síntesis de clorofila y de la fotosíntesis en plantas (ver figuras IX.11, IX.12, IX.13 y IX.14).

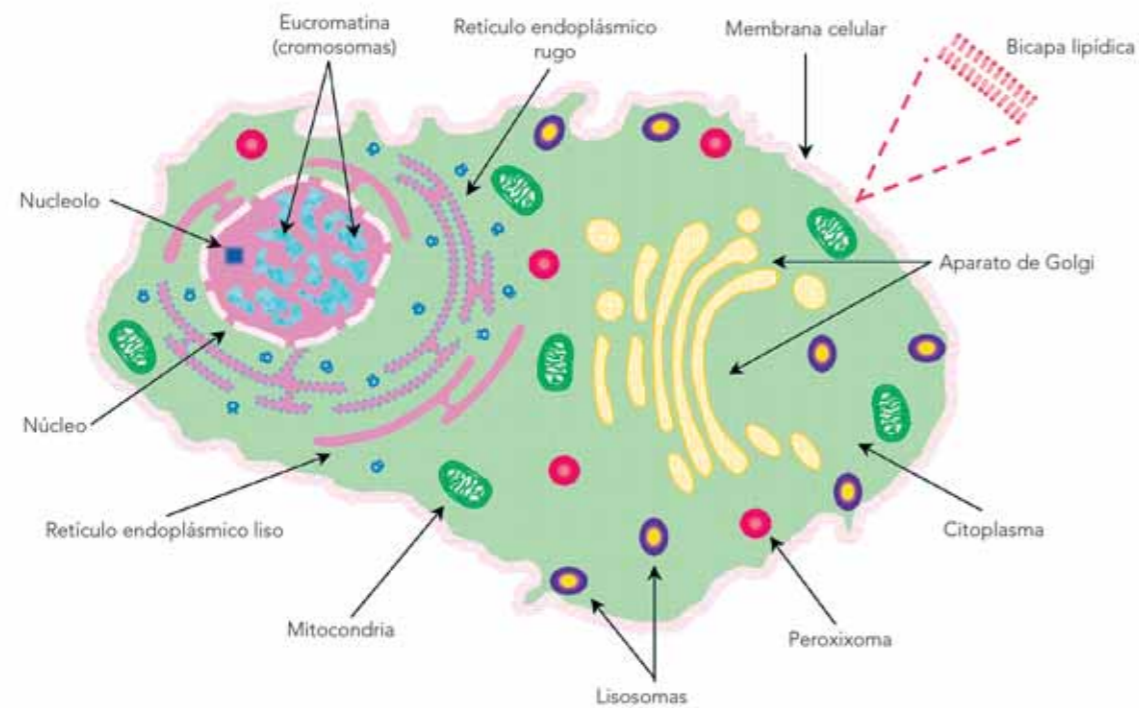


Figura IX.11. Esquema de una célula animal y sus componentes, entre los cuales se encuentran las mitocondrias

Estos organelos cuentan con material genético circular al igual que los cromosomas de las bacterias, además de contar con ribosomas propios en los que se lleva a cabo la síntesis de muchas de sus propias proteínas. Son, pues, muy parecidos a las bacterias.

Es muy probable que los precursores de estos organelos se hayan incorporado de manera natural a los precursores de células de organismos superiores, primero a través de una infección y posteriormente mediante una asociación permanente, generando una endosimbiosis que representa ventajas para ambos organismos originales (es decir, una evolución adaptativa). Ivan Wallin propuso en 1927 que la endosimbiosis donde participan bacterias podría ser uno de los procesos naturales que sus-

tentan el origen y la evolución de las especies. Estudios relevantes y libros como el de Margulis y Sagan, 2005, muestran que bacterias, mitocondrias y cloroplastos son organismos similares que comparten muchas características y que la endosimbiosis ha desempeñado un papel importante en la evolución.

Darwin, 1859; Hogg, 1861; Wallin, 1927; Nass, 1969; Smith, 1979; Yang et al., 1985; Watson et al., 1988; Gupta y Golding, 1996; Watson et al., 1996; Osusky et al., 1997; Andersson et al., 1998; Doolittle, 1998; Brown, 1999; Lengeler et al., 1999; Venter et al., 2001; Bordenstein, 2003; Herrel et al., 2004; Margulis y Sagan, 2005; Carroll, 2006; Coyne, 2009; Dawkins, 2009; Belyi et al., 2010; Horie et al., 2010; Price et al., 2012

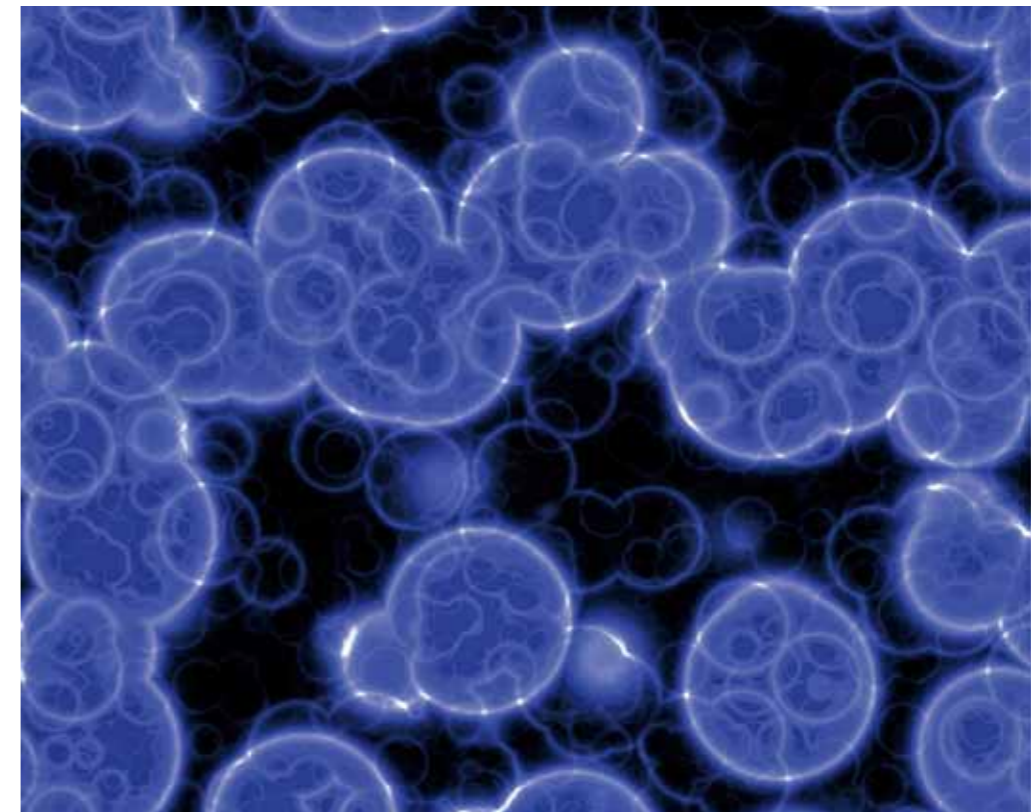


Figura IX.12. Células de origen animal al microscopio.



Figura IX.13. Cultivos de la planta *Arabidopsis thaliana*, utilizada como modelo vegetal.

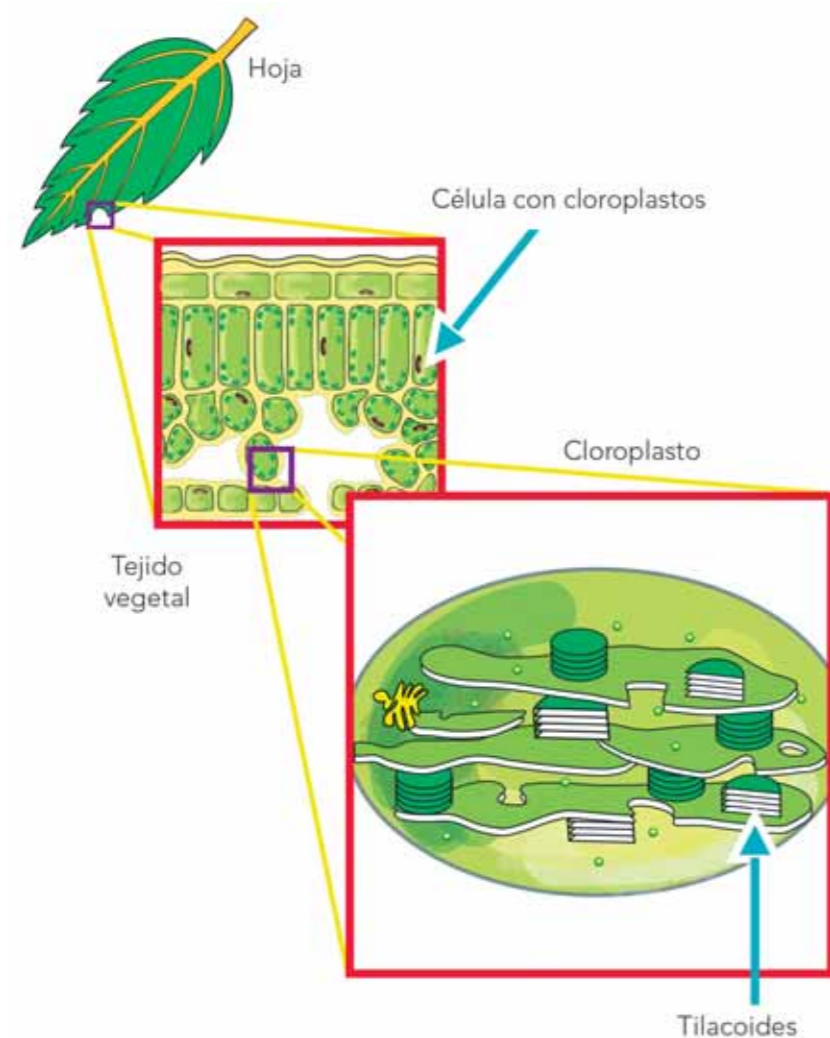


Figura IX.14. Esquema de una célula vegetal y sus componentes, incluyendo los cloroplastos.

POR MILES DE AÑOS LAS PLANTAS HAN RECIBIDO MATERIAL GENÉTICO DE BACTERIAS Y DE OTROS ORÍGENES MEDIANTE TRANSFERENCIA HORIZONTAL DE ADN

La evidencia reportada por Price y colaboradores, 2012, señala que los cromosomas de las plantas (ver figura IX.13) contienen un gran número de genes provenientes de bacterias fotosintéticas, que luego dieron origen a los cloroplastos durante la evolución (ver figura IX.14).

Estos organismos han vivido en estrecho contacto en los suelos durante mucho tiempo, y ello facilitó la transferencia horizontal de ADN. Lo anterior fue verificado de manera concluyente gracias a la determinación de la secuencia (secuenciación de los nucleótidos) de los genomas de las plantas *Arabidopsis*, arroz y maíz, entre otras.

La incorporación de material genético de diferentes orígenes, incluida la evidente incorporación de las mitocondrias en células precursoras

de animales y plantas, parece indicar que —además de los cambios en sus propios genes por mutaciones— la célula viva adquiere, de manera natural, nuevas capacidades mediante la incorporación de material genético de diferentes orígenes, adquiridos originalmente por endosimbiosis y por transferencia horizontal. De lo anterior se concluye que la transgénesis, la transferencia horizontal de ADN —incluyendo la endosimbiosis— es uno de los mecanismos o procesos responsables en alguna medida de la evolución de las especies, ya que ha permitido a la célula viva adquirir de manera natural —y en algunos casos simultáneamente, como en mitocondrias y cloroplastos— nuevas y variadas capacidades para contender con diferentes necesidades.

Evidencias adicionales y recientes de ejemplos de transferencia horizontal de ADN son los siguientes:

- Fuentes y colaboradores, 2014, demostraron la transferencia horizontal de un genoma como mecanismo asexual para generar nuevas especies de tabaco; Zhenxiang y colaboradores, 2012, expusieron la evidencia que señala la transferencia horizontal de ADN de un parásito a la planta huésped *Rafflesia*; Kyndt y colaboradores, 2015, como se ha mencionado, demostraron que la transferencia horizontal de genes ocurrió de manera natural de la bacteria *Agrobacterium* al genoma del camote. Como se ha señalado, el conjunto de genes transferidos de esta bacteria al camote de manera horizontal se encuentra en todas las variedades cultivadas pero sólo en algunas silvestres, lo cual indica que los genes de la bacteria

presentes en el camote aparentemente fueron seleccionados por pobladores ancestrales de los Andes durante la domesticación de la planta. Además, es probable que los genes de *Agrobacterium* desempeñen un papel importante para determinar el tamaño y el contenido de almidón en este tubérculo, lo que constituye un ejemplo de que algunas plantas comestibles son transgénicas de manera natural. El caso de este camote es una clara evidencia de la inocuidad de un alimento transgénico que ha sido consumido durante 8,000 años sin reporte de efectos negativos a la salud; al contrario, pues representa el sustento energético de muchos pueblos indígenas.

- Otra evidencia importante que confirma la presencia de genes bacterianos en humanos y otros eucariotes es el trabajo de Crisp y colaboradores, 2015, donde se demuestra contundentemente no sólo la presencia sino la expresión de múltiples genes adquiridos horizontalmente a lo largo del tiempo. Ésta es una característica de invertebrados y vertebrados, incluyendo el ser humano, en cuyo genoma existen 145 genes de origen bacteriano, algunos de ellos funcionales. Una observación adicional es el trabajo de Rumpho y colaboradores, 2008, que prueba la transferencia horizontal del gen nuclear *psb O* del alga al molusco *Elysia chlorotica*.

Wallin, 1927; Watson et al., 1988; Brown, 1999; Goff et al., 2000; Andersson et al., 2001; Venter et al., 2001; Bolívar et al., 2003; Margulis y Sagan, 2005; Carroll, 2006; Bolívar, 2007; Bolívar et al.,

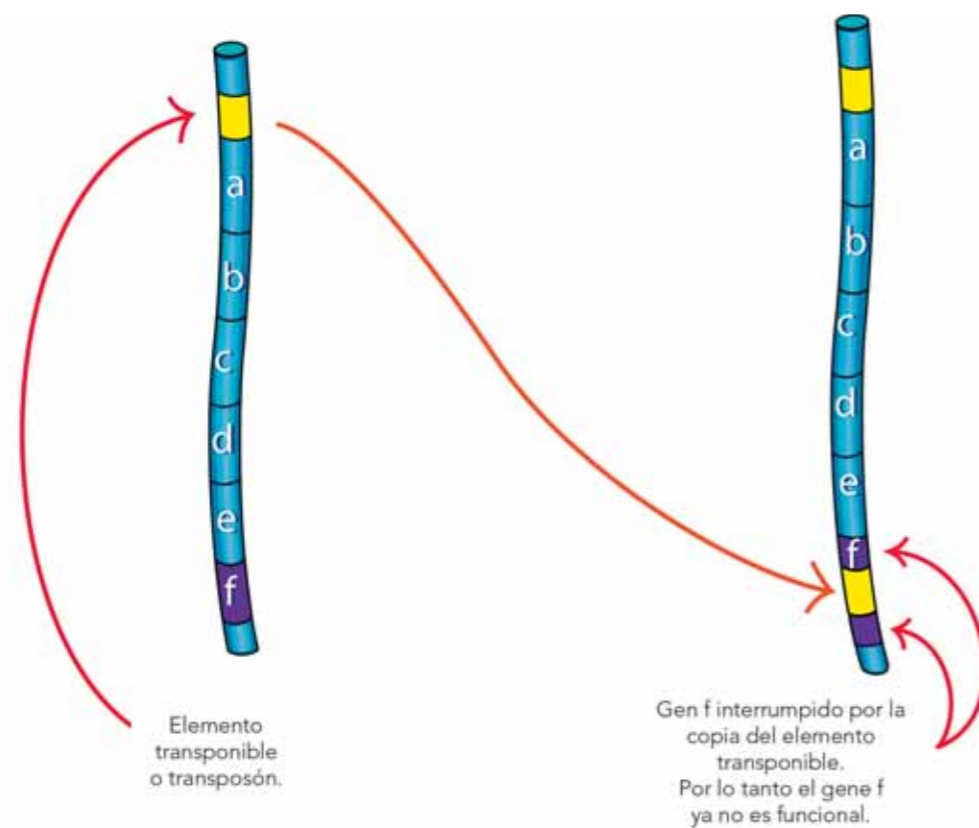


Figura IX.15. Reorganización de material genético mediante el fenómeno de la transposición, en el cual un fragmento de ADN (el transposón o elemento transponible) se reubica de lugar en el genoma, integrándose en otro *locus* genético. Al hacerlo puede interrumpir e inactivar un gen, como muestra la figura.

2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Rumpho et al., 2008; Coyne, 2009; Dawkins, 2009; Vile-Calzada et al., 2009; Schnable et al., 2009; Krom y Ramakrishna, 2010; Murat et al., 2010; Swanson-Wagner et al., 2010; Jiang et al., 2011, Price et al., 2012; Zhenxiang et al., 2012; Fuentes et al., 2014; Crisp et al., 2015; Kyndt et al., 2015

REORGANIZACIÓN Y CAMBIOS EN EL GENOMA DE LA CÉLULA VIVA. EL IMPORTANTE PAPEL DE TRANSPONES Y RETROVIRUS

En el genoma humano, al igual que en el de todo organismo vivo, existen transposones, los cuales

son un tipo de material genético repetido —parte de éste probablemente de orígenes bacteriano y viral— que representa al menos el 40% del genoma humano.

El genoma del maíz se encuentra repleto de estos elementos móviles. Como se señaló en el capítulo II, los transposones son secuencias de ADN que poseen la capacidad de moverse o “brincar” de un lugar del genoma a otro. Barbara McClintock, una genetista de maíz, descubrió este tipo de secuencias en la década de 1940. Existen diversas clases de transposones y cada uno de ellos utiliza estrategias diferentes para replicarse e incre-

mentar su número de copias en el genoma. Los transposones se dividen en dos grandes clases o grupos. La clase I comprende aquellos que utilizan un intermediario de ARN para movilizarse mediante un mecanismo de “copia y pega”, el cual implica que una copia del transposón permanece en su lugar original y una nueva copia se inserta en otro lugar del genoma. La clase II agrupa aquellos transposones que para movilizarse no utilizan un intermediario de ARN sino un mecanismo de “corte y pega” mediante el cual el transposón se mueve de su posición original en el genoma a otro (ver figuras IX.15 y IX.16).

Los transposones activos son altamente mutagénicos y peligrosos puesto que al brincar a una nueva posición genómica pueden inhabilitar o modificar la función de los genes, insertándose dentro o cerca de ellos. También pueden ocasionar rompimiento de los cromosomas, recombinación ilegítima, alteraciones en los patrones de procesamiento de los intrones, o poliadenilación y, cuando actúan como promotores y/o potenciadores ectópicos, alteraciones en los patrones de expresión. Los transposones son muy abundantes en los genomas eucariotes; cerca de la mitad de nuestro genoma (poco más del 40%) está compuesto de ellos. Es el mismo caso de las plantas, donde representan, por ejemplo, el 83% del genoma del maíz. Los transposones participan cotidianamente en la generación de variedades intraespecie (Morgante y colaboradores, 2005); un ejemplo de esto son los granos de colores diferentes en la misma mazorca. El maíz, al igual que las plantas terrestres y los animales, poseen sistemas para reconocer y mantener a

la gran mayoría de los transposones en un estado de reposo transcripcional y de no movilización. Estos sistemas de silenciamiento, como se ha señalado en el capítulo II, se basan en la formación de heterocromatina en regiones genómicas que poseen transposones y otros elementos repetidos, mediante los mecanismos de regulación epigenética ya mencionados (metilación del ADN y modificaciones de la cromatina).



Figura IX.16. Mazorcas en la que se distinguen granos de diferentes colores, resultado de la reubicación de transposones en su ADN.

Por lo anterior, el maíz y otros vegetales contienen genomas plásticos que se reorganizan cotidianamente, sin riesgo para la especie vegetal si se diera el caso de que algún individuo muriera a causa de los transposones. En cuanto a los transgénicos, sería difícil pensar que la introducción de un solo transgén en el genoma del maíz pudiera ocasionarle algo distinto a lo que ocurre cotidianamente con los transposones: simplemente el genoma del maíz (y el transgén como parte de él) se reorganiza. No tendría por qué darse un efecto negativo cuando el transgén se integra como parte del genoma más allá del rearrreglo de éste. Sin embargo, a

diferencia de los transposones, el transgén proporciona una ventaja a los cultivares transgénicos de primera generación: les otorga resistencia a plagas de insectos.

Como se ha señalado, el transgén se incorpora a la planta mediante el proceso de transferencia horizontal de ADN que, como está demostrado científicamente, ocurre naturalmente y ha sido responsable de la modificación de especies, incluyendo la humana y los vegetales.

Otro tipo de material repetido en nuestro genoma y en el de todos los organismos superiores es el llamado retroviral. En los retrovirus

el genoma está constituido de ARN (ver figura IX.7). Este tipo de material repetido, que en el genoma humano constituye el 8% del total, probablemente se estabilizó en el genoma de nuestros precursores mediante mecanismos de infección y posterior incorporación en sus cromosomas. Este tipo de transferencia horizontal ha influido e influye de manera natural y cotidiana en la dinámica y reorganización del genoma de la célula viva.

McClintock, 1957; McClintock, 1987; Maeda y Smithies, 1986; Watson et al., 1988; Berg y Howe, 1989; Federoff, 1989; Purugganahand y Wesler, 1992; Griffiths et al., 1993; McDonald, 1995; Voytas, 1996; Watson et al., 1996; Wolfe y Shield, 1977; Brown, 1999; Goff et al., 2000; Andersson et al., 2001; Venter et al., 2001; Herrera Estrella et al., 2002; Kellis et al., 2004; El-Sayed et al., 2005a; El-Sayed et al., 2005b; Morgante et al., 2005; Xing y Lee, 2006; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Schnable et al., 2009; Vielle-Calzada et al., 2009; Belyi et al., 2010; Horie et al., 2010; Krom y Ramakrishna, 2010; Murat et al., 2010; Swanson-Wagner et al., 2010; Jiang et al., 2011

OTROS EJEMPLOS DE REARRREGLO Y ENORME PLASTICIDAD DEL GENOMA SIN DETRIMENTO AL FUNCIONAMIENTO CELULAR

En el mismo contexto de reorganización del genoma, existe evidencia de que en organismos genética y fisiológicamente cercanos, como los tripanosomas (parásitos importantes de organismos superiores), ha habido una gran reorganización de genes y cromosomas. En estos organismos los cromosomas se reorganizan y

cambian número, tamaño y posición de los genes. Si bien, el número de cromosomas se modifica, la mayoría de los genes relevantes en diferentes posiciones se mantiene. En bacterias la recombinación y reorganización del genoma es el fenómeno más importante, por arriba de la mutación, en la evolución de ciertas de ellas, como la *Escherichia coli* que habita en nosotros como parte de la flora intestinal.

La determinación de secuencias de nucleótidos en genomas de levadura y de *Arabidopsis* demostró que durante su evolución aparentemente ocurrió una duplicación completa de genoma seguido por pérdida, modificación y duplicación de genes, así como la presencia de fragmentos de genoma de cloroplasto en el núcleo. Recientemente se ha reportado evidencia en plantas sobre rearrreglos de material genético por mecanismos diversos.

Esta evidencia claramente indica que los genomas de eucariotes, entre ellos las plantas, son altamente dinámicos y que se modifican frecuentemente. Estos y otros ejemplos en otros organismos indican la capacidad de reorganización del genoma de la célula viva sin detrimento de su capacidad funcional y sin riesgo para la especie.

Hozim y Tonewaga, 1976; Watson et al., 1988; Lewin, 1994; Wolfe y Shields, 1997; Brown, 1999; Lengeler et al., 1999; Herrera Estrella et al., 2002; Kellis et al., 2004; El-Sayed et al., 2005; Ivens et al., 2005; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Rumpho et al., 2008; Schnable et al., 2009; Touchon et al., 2009; Vielle-Calzada et al., 2009; Krom y Ramakrishna, 2010; Murat et al., 2010; Swanson-Wagner et al., 2010; Bolívar et al.,

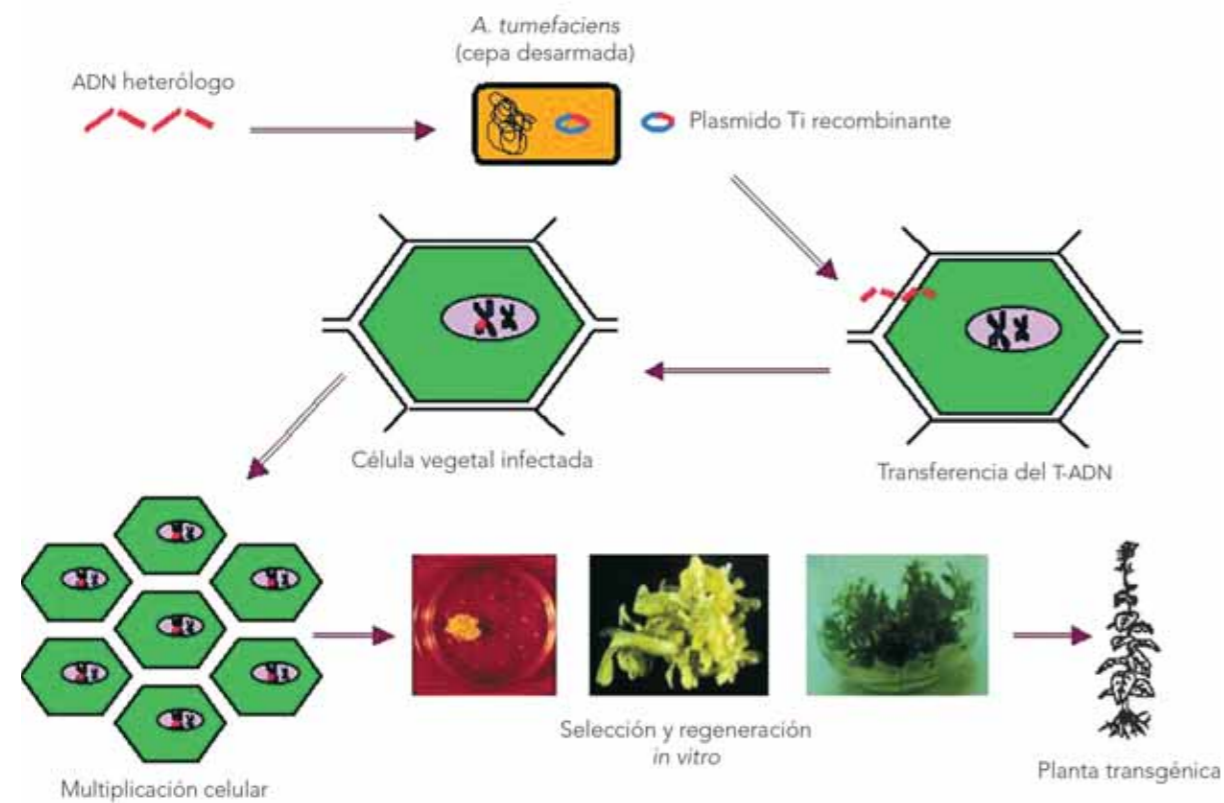


Figura IX.17. Fitomejoramiento mediante ingeniería genética. Técnicas de ADN recombinante son utilizadas para transferir ADN heterólogo (transgén) a núcleos de células de vegetales que luego se multiplican dando lugar a una planta transgénica.

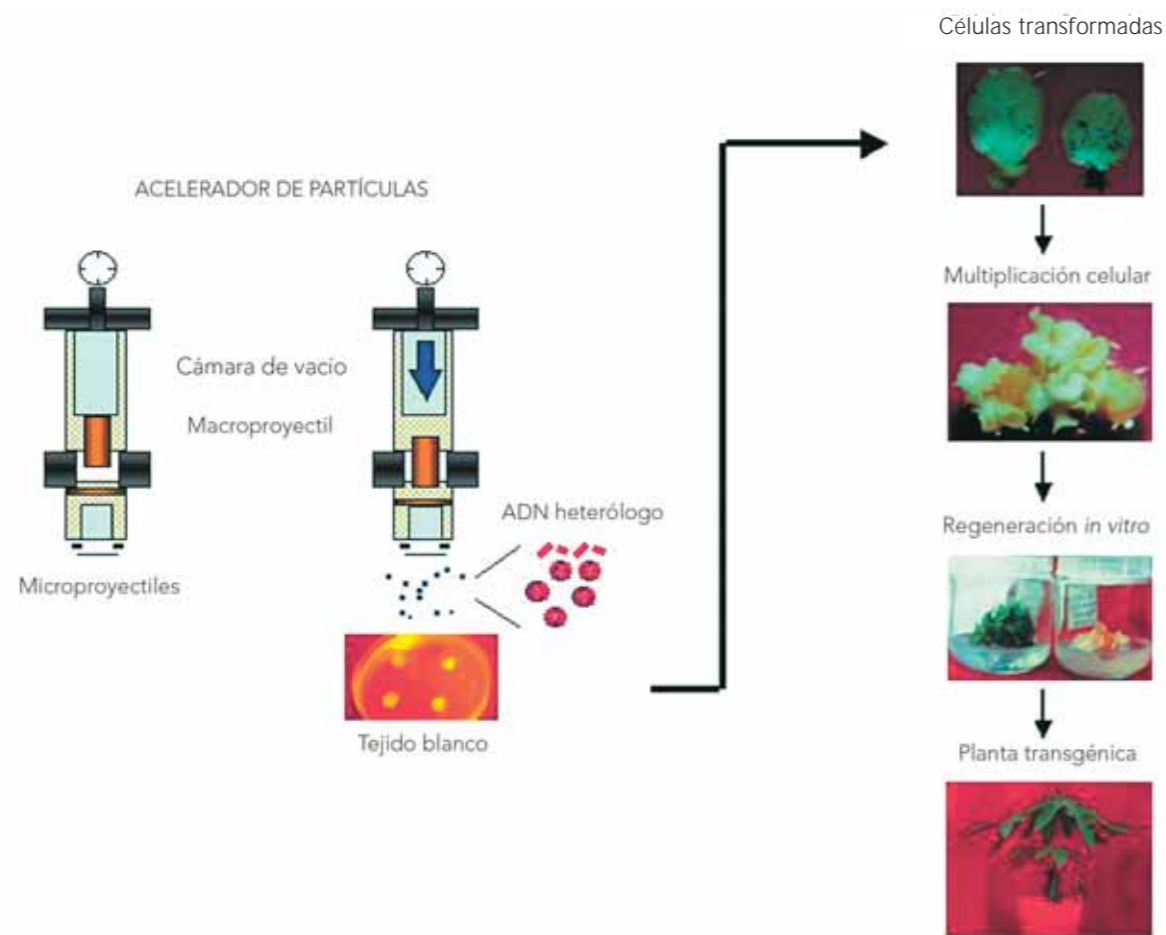


Figura IX.18. La biobalística permite incorporar genes heterólogos o transgenes en plantas. El material genético es introducido con la ayuda de pequeñas balas de metal al núcleo de la célula por transferencia horizontal. Una vez en el núcleo de la célula, mediante el proceso de recombinación genética, se incorpora en el genoma de la célula. A partir de esta célula transformada se genera la planta transgénica.

2011; Jiang et al., 2011; Price et al., 2012; Zhenxiang et al., 2012; Fuentes et al., 2014; Crisp et al., 2015; Kyndt et al., 2015

LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS SE CONSTRUYEN MEDIANTE PROCESOS DE TRANSFERENCIA HORIZONTAL DE ADN Y POSTERIOR REORGANIZACIÓN DEL GENOMA

Estos procesos son similares a los que ocurren por transgénesis, los cuales han ocurrido y

ocurren en muchos organismos que conforman la biodiversidad. Como se ha señalado en el capítulo II, cuando un organismo vivo se modifica para dar lugar a un organismo genéticamente modificado, independientemente del método utilizado (transformación por ingeniería genética, biobalística o electroporación que *per se* no afectan negativamente el genoma de la célula receptora) se introduce, a través del fenómeno de transferencia horizontal del ADN (en algún momento llamada trans-

génesis), material genético específico —un transgén— a la célula. Las figuras IX.17, IX.18 y IX.19 presentan las técnicas para la construcción de organismos transgénicos eucariotes, en particular plantas y animales, mediante transferencia horizontal de ADN. En todos los casos, una vez que el transgén llega al núcleo se incorpora mediante recombinación genética con el material genético de la célula receptora en alguno de sus cromosomas, modificando así el genoma de la célula que lo recibió (ver figuras II.11, II.12 y IX.7).

Si este evento —que es, de facto, una reorganización del genoma— afectara una función codificada en el cromosoma que fuese vital

para la célula, ese organismo transgénico en particular no sobreviviría. El mismo tipo de evento podría suceder en el caso de una reorganización natural del genoma por infección de retrovirus (ver figura IX.7), o al ser afectado por un transposón que cambia de posición (ver figuras IX.15, IX.16 y IX.17), ya que estos fenómenos podrían causar la inserción de material genético en un *locus* esencial que produjera la muerte a la célula receptora. Lo anterior, se insiste, no implica riesgo para la especie.

En resumen, este tipo de eventos pueden ocurrir no sólo por el uso de genes aislados e incorporados mediante ingeniería genética (transgenes), sino también de manera natural. Esto se

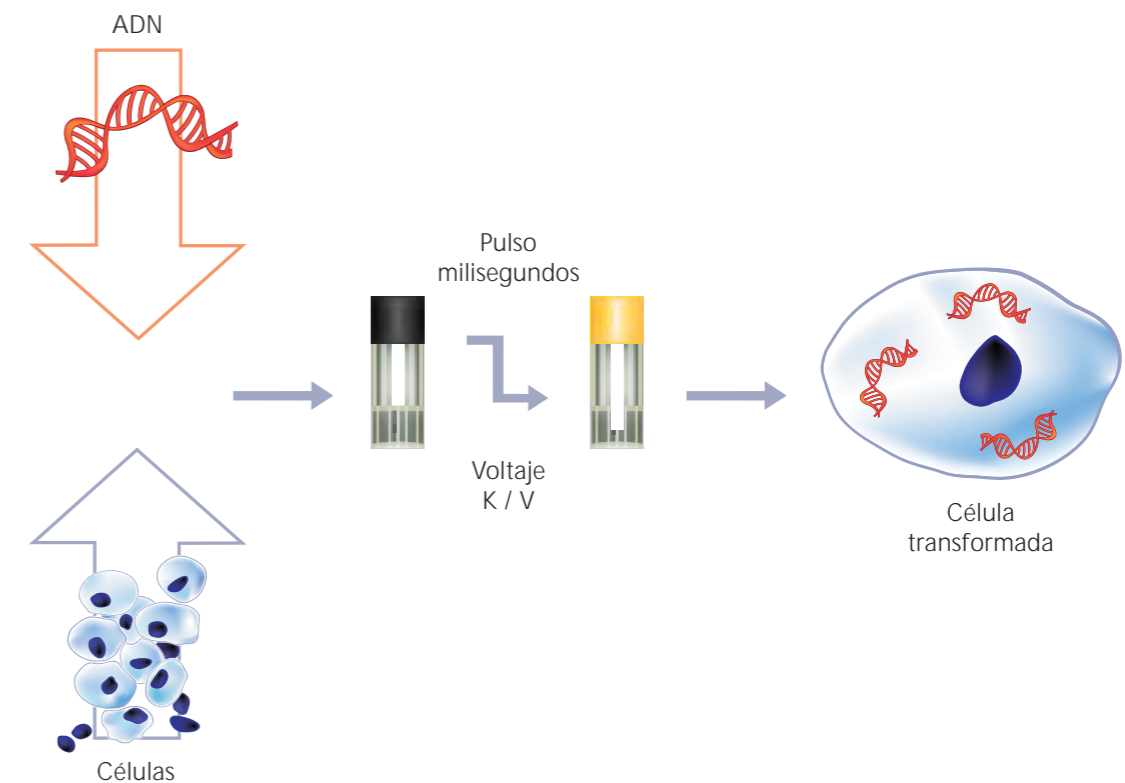


Figura IX.19. Diagrama de flujo del método de electroporación o electrotransformación utilizado para incorporar material genético a células animales. La membrana celular es permeabilizada por pulsos eléctricos, lo cual permite la incorporación del transgén a la célula y posteriormente a su núcleo, generando así una célula transformada genéticamente.

debe a que estos procesos pueden ser causados por infección viral o por transposiciones de ADN, como las que ocurren con frecuencia en el maíz (ver figura IX.16). Si bien los ejemplos anteriores pueden causar la muerte del individuo receptor en que ocurre el rearreglo, esto no implica una catástrofe ecológica. Como se ha señalado en los capítulos II y VI, la incorporación de ADN y la reorganización de material genético en el genoma es un proceso que ocurre independientemente a la existencia o no de transgénicos. Sin importar su origen, al tener la misma estructura general, el ADN se transfiere, se incorpora en el citoplasma y se recombina en el núcleo con el material genético de la célula receptora de manera natural.

De lo anterior se concluye que la modificación de organismos vivos para generar OGM y, en particular los cultivos transgénicos, es equivalente al proceso de incorporar en el genoma de una célula un fragmento de ADN proveniente de la translocación de un transposón, a la integración de un fragmento de material genético viral, o a la adquisición de ADN proveniente de bacterias —como la que dio lugar a la capacidad de fotosíntesis en plantas— y de ADN-T provenientes de *Agrobacterium tumefaciens* en plantas superiores (ver figuras II.9, II.12, II.13, IX.15 y IX.16). Todos estos procesos tienen como resultado la reorganización y modificación del genoma de la célula receptora, independientemente de que se hayan originado por un ADN viral, un transposón, un ADN incorporado por transferencia horizontal o un transgén. La célula puede incorporarlos porque son secuencias de ADN con la misma estructura general y ello

permite la recombinación genética (ver figuras II.2, IX.3 y IX.7).

Jackson et al., 1972; Cohen et al., 1973; Sánchez et al., 1975; Heyneker et al., 1976; Korana, 1979; Itakura y Riggs, 1980; Caplan et al., 1983; Herrera Estrella et al., 1983a; Herrera Estrella et al., 1983b; Mullis y Fallona, 1987; Watson et al., 1988; Purugganhanau y Wessler, 1992; McDonald, 1995; Taghagian y Nikoloff, 1995; Watson et al., 1996; Brown, 1999; Andersson et al., 2001; Yao et al., 2002; Herrera Estrella y Martínez, 2003; Margulis y Sagan, 2005; Xing y Lee, 2006; Barrera, 2007; Bolívar, 2007; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Rumpho et al., 2008; Schubert et al., 2009; Schnable et al., 2009; Touchon et al., 2009; Vielle-Calzada et al., 2009; Belyi et al., 2010; Horie et al., 2010; Krom y Ramakrishna, 2010; Murat et al., 2010; Swanson-Wagner et al., 2010; Bolívar et al., 2011; Jiang et al., 2011; Price et al., 2012; Zhenxiang et al., 2012; Fuentes et al., 2014; Crisp et al., 2015; Kyndt et al., 2015

EJEMPLOS DE CAMBIOS POR TRANSGÉNESIS QUE HAN GENERADO BENEFICIOS A LAS CÉLULAS RECEPTORAS, INCLUYENDO TRANSGÉNICOS

Los cambios que ocurren en el ADN de organismos vivos por mutaciones y por adición de fragmentos de ADN mediante infecciones o transgénesis (ver figuras II.12 y II.13) han desempeñado un papel importante en la evolución y supervivencia de los seres vivos. Muchas mutaciones en el ADN pueden ser puntuales y neutras; más los cambios propiciados a través de transgénesis implican ganancias y obtención de nuevas funciones y beneficios en las células receptoras. Entre estos mecanismos se encuentran las infecciones virales y bacte-

rianas, los transposones, la transferencia horizontal de ADN bacteriano a bacterias y plantas y la transferencia de precursores de organelos en la endosimbiosis.

Varios de estos mecanismos han propiciado beneficios y ventajas evolutivas a la célula receptora. Por ejemplo, muchas bacterias han recibido transposones o plásmidos que les otorgan resistencia a antibióticos y mayor patogenicidad. También hay ejemplos de transgénesis con ADN de bacterias en plantas que les ha permitido obtener nuevas funciones, como la capacidad de fotosíntesis, y el caso del camote naturalmente transgénico que lleva ADN de *Agrobacterium tumefaciens* con efectos positivos para la productividad. Asimismo, la transferencia horizontal del genoma completo del tabaco a otras plantas de su propia especie demostró la transferencia asexual en la creación de nuevas variedades.

Ejemplos de cambios por transposones en maíz, como los ya señalados, han permitido la aparición de variedades intraespecie de esta planta. Otro tipo extraordinario de transferencia horizontal de ADN es la endosimbiosis que ocurrió por asociación o infección por precursores de bacterias en algún organismo precursor de los eucariotes durante la evolución, lo que luego dio lugar a la aparición de mitocondrias en animales y de cloroplastos y mitocondrias en plantas. Así pues, la transferencia horizontal de ADN ha sido responsable en alguna medida de la evolución de las especies.

En estos ejemplos también deben incluirse los organismos transgénicos que llevan material genético de otro origen adquirido por transferencia horizontal de ADN. Los transgé-

nicos se construyen siguiendo los ejemplos de transferencia horizontal de ADN que ocurren en la biota —la transgénesis— y están diseñados para producir proteínas que tienen impactos benéficos. Las plantas transgénicas con resistencia a plagas de insectos han logrado reducir el uso de insecticidas químicos, como se detalla en los capítulos II, V y VIII. Otros ejemplos de gran valía, como se comenta en el capítulo VIII, son unos cultivares transgénicos creados en México que pueden utilizar fosfito en lugar de fosfato como fertilizante, además de plantas resistentes a sequía y a heladas. El desarrollo de estas capacidades a nivel comercial implicaría la posibilidad de dejar de utilizar glifosato, el herbicida químico que se usa para eliminar malezas que crecen en cultivos, pues éstas no son capaces de crecer en fosfito. Esto ayudaría a contender de mejor manera con la contaminación y el cambio climático (ver figura IX.20).

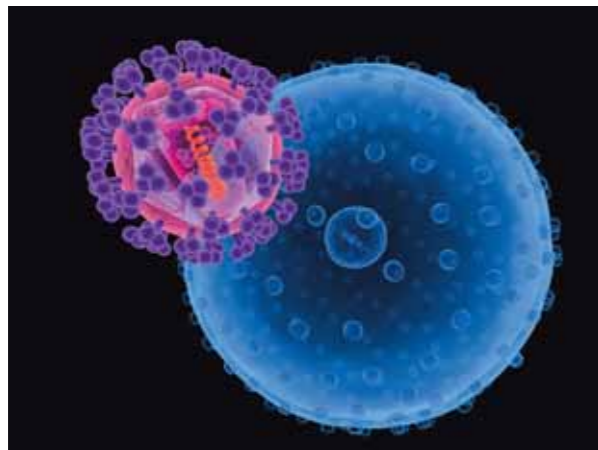
Wallin, 1927; Nass, 1969; Cohen et al., 1973; Itakura et al., 1977; Goeddel et al., 1979; Caplan et al., 1983; Herrera Estrella et al., 1983; Gupta y Golding, 1996; Bolívar et al., 2003; Morgante et al., 2005; Margulis y Sagan, 2005; Xing y Lee, 2006; Barrera, 2007; Bolívar, 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Rumpho et al., 2008; Schubert et al., 2009; Schnable et al., 2009; Touchon et al., 2009; Vielle-Calzada et al., 2009; Belyi et al., 2010; Horie et al., 2010; Krom y Ramakrishna, 2010; Murat et al., 2010; Swanson-Wagner et al., 2010; Bolívar et al., 2011; Enserink, 2011; Jiang et al., 2011; Price et al., 2012; Zhenxiang et al., 2012; Lopez-Arredondo y Herrera Estrella, 2013; Fuentes et al., 2014; Crisp et al., 2015; Kyndt et al., 2015



Mazorcas de maíz con granos en los que ha ocurrido transposición de ADN y rearreglo de genomas de manera natural.



La estructura general del ADN es la misma para todos los seres vivos y los virus.



Infección de retrovirus a una célula. En este proceso natural se incorpora de manera horizontal material genético viral en la célula.



Cultivar de maíz transgénico.

Figura IX.20. Procesos que ocurren de manera natural en los que se rearregla el genoma de las células de organismos vivos, tanto plantas como animales. Tal es el caso de mazorcas de maíz o de la infección de una célula por un retrovirus. Se muestra también el maíz transgénico, cuya construcción se logra a partir de métodos de transferencia horizontal (como la infección viral) y de rearreglo de material genético (como los transposones en el maíz). Lo anterior es posible ya que la estructura general del ADN es la misma en todos los seres vivos y en los virus.

PREOCUPACIONES, CUESTIONAMIENTOS Y DUDAS POR EL SUPUESTO DAÑO EN EL CONSUMO DE PLANTAS TRANSGÉNICAS

Como se explica a detalle en el capítulo VI, algunos grupos que cuestionan los OGM y en particular los cultivos transgénicos, han seña-

lado que la construcción y uso de ellos implica daños de diferentes tipos. Los señalamientos y cuestionamientos por el supuesto daño de los OGM fueron analizados y explicados minuciosamente en ese capítulo, en particular la utilización de plantas transgénicas en el campo. Cabe señalar que ninguno de los supuestos

daños a la salud, al medio ambiente o a la biodiversidad por el uso de plantas transgénicas tiene sustento científico sólido y que por ello se siguen cultivando cada vez más y en un mayor número de países. Estas razones explican por qué las agencias y autoridades responsables del control sanitario de alimentos en Estados Unidos, Europa y México siguen permitiendo su uso. La OMS también avala su consumo.

De cualquier manera, hay que insistir en que todos los organismos modificados genéticamente que se utilizan en la actualidad —no sólo organismos transgénicos sino también los obtenidos por metodologías tradicionales— han sufrido cambios y reorganizaciones importantes en sus genomas, sin evidencia de daño ecológico. Además, las infecciones virales y bacterianas, así como la transposición de material genético, generan rearreglos de manera natural en los genomas de las células afectadas sin daño a la especie (ver figura IX.20). De hecho, existe una gran variedad de cultivos no transgénicos que han aparecido por rearreglos y modificaciones naturales de sus genomas, así como variedades generadas por el ser humano mediante técnicas de mejoramiento tradicional. Ejemplos de esto son el brócoli y la coliflor: uno de estos vegetales bien podría considerarse como una aberración genética del otro de haber ocurrido el cambio por acción del ser humano. Con el apoyo de las ciencias ómicas hoy en día se estudian a detalle molecular muchos organismos modificados que se utilizan como alimento (no sólo transgénicos), incluso sabiendo que las variedades de estos cultivos no han generado daño a la salud humana ni a la biodiversidad, aunque en algunos

casos existen diferencias importantes en sus genomas.

En vista de la evidencia a favor de la plasticidad y capacidad de reorganización y cambio del genoma, y de que la transferencia horizontal de ADN puede considerarse un fenómeno natural (ver figuras IX.5, IX.17 y IX.20), resulta difícil entender la preocupación a que se hace referencia en el capítulo VI, de que los OGM sean responsables de dañar, transformar y degradar negativamente cultivos existentes que se utilizan en la agricultura (y cultivos adicionales, incluyendo variedades nativas y parientes cercanos que conforman la biósfera). Dicha preocupación se minimiza sustantivamente al no existir evidencia de daño al medio ambiente y a la biodiversidad por el uso de cultivos transgénicos. Hay evidencia, en cambio, de que las plantas transgénicas coexisten sin daño con variedades convencionales, pues muchos países cuentan ya con una agricultura de coexistencia.

Esta evidencia queda sustentada y confirmada por la amplia información sobre la plasticidad del genoma, y porque los fenómenos de cambio y reorganización ocurren naturalmente en la biósfera independientemente de la existencia de transgénicos. Por lo anterior se concluye y se insiste en que, como se señala en el capítulo II, los organismos transgénicos generados por transferencia horizontal de ADN no son organismos antinaturales, sino el resultado de utilizar procesos que existen de forma natural y que por lo tanto no contaminan, representan un bajo riesgo y no causan daño al medio ambiente ni a la biodiversidad. Como se ha mencionado a lo largo de este libro, la transferencia horizontal de ADN ha sido en alguna medida responsable



Figura IX.21. Nuevas variedades de maíz.

de la evolución de las especies debido a que ha permitido la adquisición de muchas funciones a plantas y a sus precursores.

Watson et al., 1988; McDonald et al., 1995; Brown, 1999; Lengeler et al., 1999; Andersson et al., 2001; Venter et al., 2001; Herrera Estrella y Martínez, 2003; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Batista et al., 2008; Rumpho et al., 2008; Schubert et al., 2008; Touchon et al., 2009; Belyi et al., 2010; Doerrer et al., 2010; Horie et al., 2010; Krom y Ramakrishna, 2010; Murat et al., 2010; Swanson-Wagner et al., 2010; Bolívar et al., 2011; Jiang et al., 2011; Brookes y Barfoot, 2012; EFSA, 2012a: www.efsa.europa.eu/en/efsa-journal/doc/2986.pdf; EFSA, 2012b: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2012.2705/epdf>; Séralini et al., 2012; Zhenxiang et al., 2012; Álvarez Buylla y Piñeyro, 2013; López-Arredondo

y Herrera Estrella, 2013; Ricroch, 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Clive, 2014; Fuentes et al., 2014; Klümper y Qaim, 2014; Nicolia et al., 2014; Ricroch et al., 2014; Séralini et al., 2014a; Crisp et al., 2015; Kyndt et al., 2015; NASEM, 2016: <https://doi.org/10.17226/23395>

**MODIFICACIÓN GENÉTICA DE ORGANISMOS VIVOS:
UN PROCESO EMPLEADO POR EL HOMBRE
PARA OBTENER MEJORES VARIEDADES,
EN PARTICULAR PLANTAS**

El hombre ha modificado genéticamente, a lo largo de cientos de años, las especies que utiliza para su alimentación. Hasta hace poco tiempo lo hizo —sin conocer la estructura del material genético— a través de mutágenos, los cuales generan múltiples cambios en el genoma (ver

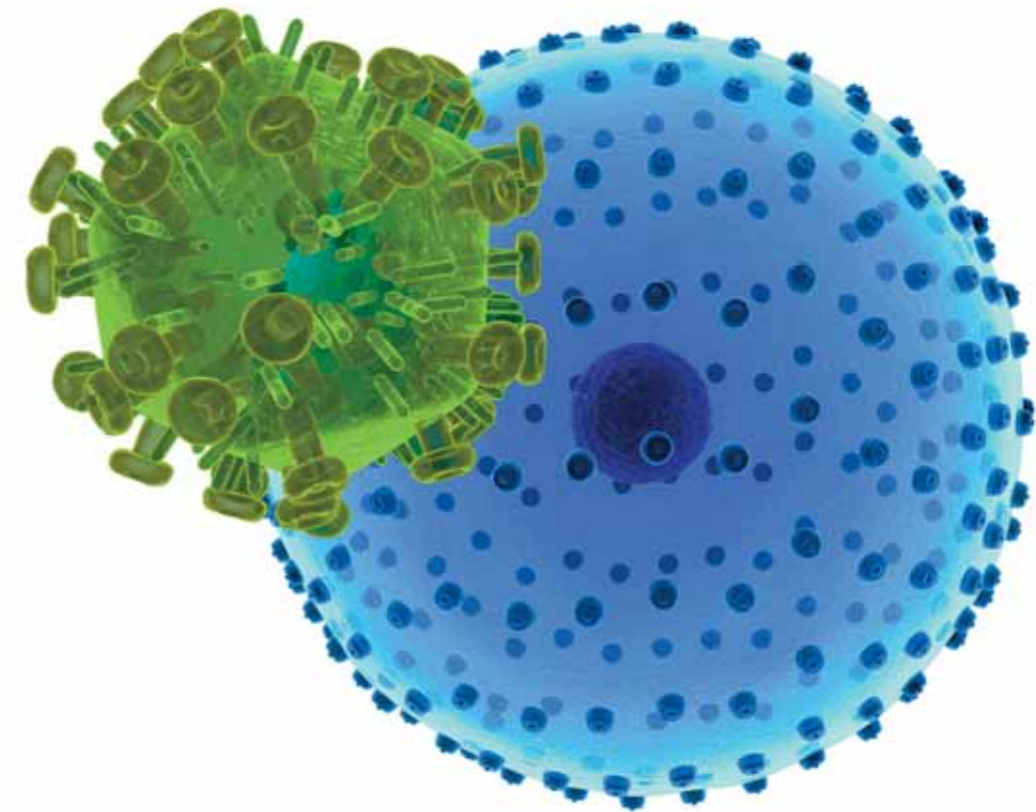


Figura IX.22. Virus infectando una célula causando transferencia horizontal de material genético.

figuras IX.21 y IX.23). Sin embargo, estas técnicas originales de mutagénesis y los organismos que crearon no han sido cuestionados como los organismos transgénicos, toda vez que hoy se reconoce que estos métodos usados previamente generan grandes cambios en el genoma, el transcriptoma, el proteoma y el metaboloma de dichos organismos. La razón de esta falta de cuestionamiento es, probablemente, la ausencia de daño por el uso de estos organismos, cuyos genomas están altamente modificados a diferencia de los cultivos transgénicos, en los que la modificación se da únicamente por la integración de un solo transgén. Como se ha resaltado, el trabajo de la Dra. Ricroch en 2013 y 2014 demuestra que las plantas transgénicas

tienen cambios similares en transcriptomas, proteomas y metabolomas a las plantas convencionales y a sus padres, y confieren un menor cambio que algunas variedades producidas por otros métodos.

Cabe insistir en que la combinación de diferentes especies no surgió mediante experimentos de ingeniería genética, sino con variedades vegetales producidas mediante diferentes mecanismos. Los primeros registros sobre manipulación genética de plantas datan de 1919, fecha en la que se reportaron las primeras plantaciones con semillas híbridas desarrolladas a partir de la selección y cruzamiento de dos plantas diferentes de maíz. Esta metodología permitió un aumento de 600% en la pro-



Figura IX.23. El maíz transgénico se utiliza como alimento en muchos países.

ducción agrícola de este cereal en un período de aproximadamente 55 años.

Asimismo, las modificaciones genéticas para el mejoramiento de cultivos agrícolas — realizadas en los últimos 70 años con técnicas de mutagénesis tradicional que incorporaron diferentes mutaciones y deleciones— han generado más de 2,200 variedades vegetales y, aunque éstas han sido poco estudiadas, hasta el momento no se han reportado efectos adversos. La manipulación de plantas comenzó de manera empírica hace cerca de 10,000 años cuando el hombre inició la domesticación de vegetales, actividad que permitió la obtención de cultivos que ahora conocemos como maíz, trigo, arroz, sorgo y papa, entre otros, los cuales antes no existían como tales en la naturaleza y que constituyeron la base para el esta-

blecimiento de las grandes civilizaciones del planeta.

Por lo antes expuesto, se debe subrayar que todos los organismos modificados genéticamente que se utilizan en la actualidad — tanto plantas transgénicas como aquellas obtenidas por metodologías tradicionales— han sufrido cambios en sus genomas, en algunos casos importantes. Gracias a los rearrreglos genéticos que ocurren naturalmente (ver figuras IX.6, IX.7, IX.16, IX.20, IX.21, IX.22 y IX.23) y a los provocados y diseñados por el hombre, hoy contamos con nuevas y mejores especies, con variedades de organismos vivos con modificaciones genéticas hechas específicamente para resolver y atender muchos de nuestros problemas y necesidades. La citada declaración que a marzo de 2017 firman 123 premios

Nobel en apoyo a la biotecnología, a los OGM y sus productos, llama a la tecnología que permite que hoy tengamos plantas transgénicas una “agricultura de precisión”. Esta agricultura conlleva grandes beneficios, pues los transgénicos se pueden diseñar y construir en tiempos muy cortos en comparación a tecnologías anteriores.

Herrera Estrella et al., 1983; Watson et al., 1998; Potrykus, 2001; Herrera Estrella et al., 2002; Bolívar et al., 2003; INIA, 2006; Bolívar et al., 2007; Batista et al., 2008; Fratamico, 2008; Dawkins, 2009; Belyi et al., 2010; Horie et al., 2010; Bio, 2011; Bolívar et al., 2011; EFSA 2012a: www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf; EFSA, 2012b: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2012.2705/epdf>; Zhenxiang et al., 2012; Álvarez Buylla y Piñeyro, 2013; López-Arredondo y Herrera Estrella, 2013; Ricoch, 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Clive, 2014; Fuentes et al., 2014; Klümper y Qaim, 2014; Nicolía et al., 2014; Ricoch et al., 2014; Crisp et al., 2015

CONCLUSIONES

Tras lo expuesto en este capítulo resulta válido enfatizar que los eventos de modificación del genoma por transferencia horizontal de ADN, ocurridos en todos los organismos y en particular en plantas transgénicas, son fenómenos naturales que han ocurrido y ocurren cotidianamente en la biósfera. Son eventos que forman parte de las características y propiedades de los sistemas vivos que, por un lado, han sido parcialmente responsables de la evolución de las especies y, por otro, han dado lugar, de manera natural o antropogénica, a nuevos organismos

vivos cuya reorganización de ADN en sus genomas los hace más aptos para hacer frente a problemas y requerimientos de la sociedad y de la propia biota. Así pues, los organismos de la biodiversidad sufren naturalmente modificaciones, incrementos y rearrreglos genéticos y, por ello, los cultivares transgénicos pueden considerarse organismos de riesgo bajo, similares a los que ya existen en la biósfera. A lo largo de este libro se ha enfatizado la ausencia de daño a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad por el uso de organismos transgénicos y sus productos derivados que actualmente existen en el mercado, en particular plantas transgénicas, y los grandes beneficios que conlleva su utilización.

Todas las actividades humanas tienen impacto en la naturaleza y en el medio ambiente. Por ello resulta indispensable crear la conciencia y los marcos necesarios para minimizar efectos negativos en el planeta, utilizando mejores cultivares y de manera más eficiente y sustentable (ver figura IX.24). Resulta insostenible la premisa de que como humanos no tengamos derecho a modificar los sistemas vivos por supuestos daños que algunos han señalado con el fin de resolver problemas apremiantes, aduciendo que esto implica graves riesgos por la modificación a los genomas. De aceptarse esta premisa se estaría renunciando a una herramienta que la humanidad ha desarrollado para replicar de manera diseñada, dirigida y con menor riesgo los amplios beneficios y el respeto a la biodiversidad, y que sucede cotidianamente en la biósfera. De aceptarse ello se renunciaría al diseño de mejores organismos, en particular plantas transgénicas, a los

que 123 premios Nobel han definido como una agricultura de precisión para la solución de requerimientos de la humanidad y para la defensa y recuperación de ecosistemas contaminados. Resulta pues inaceptable e inmoral quedarse cruzado de brazos ante la alternativa de seguir utilizando tecnologías que destruyen, contaminan y causan daños graves a la salud, a la biodiversidad y al medio ambiente, como los insecticidas y los herbicidas químicos. De igual forma, tampoco se pueden seguir incorporando terrenos de bosques y selvas a la agricultura para satisfacer la creciente demanda de alimentos.

No existe tecnología libre de riesgo. La biotecnología, incluyendo los transgénicos, es una alternativa de menor riesgo que otras, como los insecticidas químicos que causan daño a la salud y contaminan el medio ambiente. Gracias a la inquietud sobre los posibles riesgos que entraña su utilización, hoy podemos caracterizar los OGM con metodologías poderosas como las ciencias ómicas, como se discute ampliamente en el capítulo IV. También disponemos de mecanismos para evaluar y manejar posibles

riesgos biológicos; con evidencia sobre los beneficios de los cultivares transgénicos para sustentar y fortalecer una agricultura de precisión que tiene grandes ventajas, que es superior, más avanzada y más segura que las anteriores, puesto que las plantas transgénicas han sido caracterizadas exhaustivamente.

Es fundamental que se siga haciendo un uso responsable de la biotecnología y de los transgénicos mediante el análisis y evaluación caso por caso, con sustento basado en evidencia científica sobre los OGM y sus productos. No hay que olvidar que en México el Protocolo de Cartagena y la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (como se verá en el siguiente capítulo) definen los principios y el marco jurídico para la bioseguridad de éstos, además de prohibir el uso de esta tecnología para fines inadecuados e inaceptables, como es el desarrollo de armas biológicas. Toda tecnología, incluyendo la biotecnología, es susceptible de ser usada de manera irresponsable —como un cuchillo—, lo cual siempre será inmoral, ilegal e inaceptable, y su uso indebido deberá ser castigado.



Figura IX.24. La biotecnología debe utilizarse para ayudar a preservar la biodiversidad y recuperar ecosistemas contaminados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez Buylla E.R., Piñeyro N.A. 2013. El maíz en peligro ante los transgénicos Un análisis integral en el caso de México. Centro de Investigación Interdisciplinaria UNAM-UCCS (Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad) y Universidad Veracruzana, México, 568 pp.
2. Andersson J., Doolittle W., Nerbo C. 2001. Are there bugs in our genome? *Science* 292: 1848–1850.
3. Andersson S. *et al.* 1998. The genome sequence of *Rickettsia prowazaki* and the origin of mitochondria. *Nature* 396: 133–140.
4. Aravind L. *et al.* 1998. Evidence of massive gene exchange between archeal and bacterial *hyperthermophilus*. *Trends Genet.* 14: 442–444.
5. Arber W. 1993. Evolution of prokaryotic genomes. *Gene* 135: 49–56.
6. Arias C. *et al.* 2009. Molecular anatomy of 2009 influenza virus A(H1N1). *Arch. Med. Res.* 40(8): 643–654.
7. Avery O., MacLeod C., McCarty R. 1944. Stu-

- dies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types. *J. Exp. Med.* 79: 137–158.
8. Barrera H. 2007. Manipulación genética de animales. Transgénesis y clonación. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.). El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, 2ª edición, Ciudad de México, pp. 131–165.
 9. Batista R. *et al.* 2008. Microarray analyses reveal that plant mutagenesis may induce more transcriptomic changes than transgene insertion. *PNAS* 105(9): 3640–3645.
 10. Belyi V. *et al.* 2010. Unexpected inheritance: Multiple integration of ancient bornavirus and ebolavirus/marburgvirus sequences in vertebrate genomes. *PLOS Pathogens* 6(7): e1001030.
 11. Berg D., Howe M. (Eds.). 1989. Mobile DNA. American Society for Microbiology, USA.
 12. Bio. 2011. Biotechnology Industry Organization. History of Biotechnology
 13. Boerboom C., Owen M. 2006. Facts about glyphosate-resistant weeds. The glyphosate, weeds, and crops series. The purdue extension education store. www.extension.purdue.edu/extmedia/gwc/gwc-1.pdf
 14. Bolívar F *et al.* 2003. Aplicaciones y controversias de las plantas transgénicas. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.). El Colegio Nacional, Ciudad de México.
 15. Bolívar F. 2007. Ciencia genómica, proteómica y bioinformática. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.). El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, 2ª edición, Ciudad de México, pp. 85–116.
 16. Bolívar F. *et al.* 2007. Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.). El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, 2ª edición, Ciudad de México.
 17. Bolívar F. *et al.* 2011. Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados. Comité de Biotecnología. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.
 18. Borderstein S.R. 2003. Symbiosis and the origin of species. En: Insect symbiosis. Bourtris K., Miller T. (Eds.). CRC Press, USA.
 19. Brookes G., Barfoot P. 2012. Global Impact of biotech crops. Environmental effects 1996–2010. *GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 3(2): 129–137.
 20. Brown T.A. 1999. Genomes. Wiley-Liss, Nueva York.
 21. Brussow H., Canchaya C., Hardt W. 2004. Phages and the evolution of bacterial pathogens: from genomic rearrangements to lysogenic conversion. *Microbiol. Mol. Bio. Rev.* 68: 560–602.
 22. Campbell A. 1996. Bacteriophages. En: *Escherichia coli and Salmonella: Cellular and molecular biology*. Neidhart *et al.* (Eds.), 2nd edition, ASM Press, Washington.
 23. Caplan A. *et al.* 1983. Introduction of genetic material into plant cells. *Science* 222(4625): 815–821.
 24. Carroll S. 2006. The making of the fittest: DNA and the ultimate forensic record of evolution. W.W. Norton, USA.
 25. Chen I., Dubnau D. 2004. DNA uptake during bacterial transformation. *Nat. Rev. Microbiol.* 2: 241–249.
 26. Clive J. 2014. ISAAA. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2014. Brief No. 49 ISAAA. Ithaca, New York.
 27. Cohen S. *et al.* 1973. Construction of biologically functional bacterial plasmids *in vitro*. *PNAS* 70: 3240–3244.
 28. Colleaux R *et al.* 1986. Universal code equivalent of a yeast mitochondrial intron reading frame is expressed into *E. coli* as a specific double strand endonuclease. *Cell* 44: 521–533.
 29. Coyne J. 2009. Why evolution is true. Oxford University Press, UK.
 30. Crisp A. *et al.* 2015. Expression of multiple horizontal acquired genes is a hallmark of both vertebrates and invertebrate. *Genome Biology* 16(50).
 31. Darwin C. 1859. On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life. 1st edition, John Murray, London.
 32. Darwin C., Wallace A. 1859. On the tendency of species to form varieties and on the perpetuation of varieties and species by natural means of selection. *J. of the Proceedings of the Linnean Society (Zoology)* 3: 45–62.
 33. Dawkins R. 2009. The greatest show on earth. The evidence for evolution. Free Press, New York.
 34. Denamur E. *et al.* 2000. Evolutionary implications of the frequent horizontal transfer of mismatch repair genes. *Cell* 103(5): 711–721.
 35. Doerr N. *et al.* 2010. Evaluating biological variation in non-transgenic crops: Executive summary from the ILSI Health and Environmental Sciences Institute Workshop. Nov. 16–17, 2009, París.
 36. Doolittle W. 1998. You are what you eat: a gene transfer ratchet could account for bacterial genes in eukaryotic nuclear genomes. *Trends Genetics* 14: 307–311.
 37. EFSA (European Food Safety Authority). 2012a. Final review of the Seralini *et al.* (2012a) publication on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603 as published online on 19 September 2012 in *Food and Chemical Toxicology*. *EFSA J.* 10(11): 2986. www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf
 38. EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO). 2012b. Scientific opinion on a request from the European Commission related to the emergency measure notified by France on genetically modified maize MON 810 according to article 34 of regulation (EC) No.1829/2003. *EFSA J.* 10 (5): 2705, 21 pp. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2012.2705/epdf>
 39. El-Sayed N.M. *et al.* 2005a. Comparative genomics of trypanosomatid parasitic protozoa. *Science* 309: 404–409.
 40. El-Sayed N.M. *et al.* 2005b. The genome of the african trypanosome *Trypanosoma brucei*. *Science* 309, 416–422.
 41. Emini E. (Ed.). 2002. The human immunodeficiency virus: biology, immunology and therapy. Princeton University Press, Princeton.
 42. Enserink M. 2011. DNA sequence yields clues to Germany's supertoxic *E. coli* outbreak. *Science News Insider*. <http://news.sciencemag.org/scienceinsider/2011/sequence-yields-clues-to-germany.html>
 43. Federoff N.V. 1989. About maize transposable elements and development. *Cell* 56: 181.
 44. Fratamico P. 2008. The application of “omics” technology for food safety and research. *Foodborne Patho. Dis.* 5: 369–370.

45. Fuentes M., La Baer J. 2014. Proteomics: Targeted Technology, Innovations and Applications. Fuentes M., LaBaer J., (Eds.). Caister Academic Press, UK.
46. Garten R. *et al.* 2009. Antigenic and genetic characteristics of swine origin 2009 AH1N1 influenza viruses circulating in humans. *Science* 325(5937): 197–201.
47. Goeddel D. *et al.* 1979. Expression of chemically synthesized genes for human insulin. *PNAS* 76: 106–110.
48. Goff J. *et al.* 2000. The rice genome. *Science* 296: 92–100.
49. Griffiths A. *et al.* 1993. Genetic analysis. W.H. Freeman and Co. USA.
50. Gupta R., Golding G. 1996. The origin of the eukaryotic cell. *Trends Biochem. Sci* 21: 166–171.
51. Hacker J., Kaper J. 2000. Pathogenicity islands on the evolution of microbes. *Annu. Rev. Microbiol.* 54: 641–679.
52. Hayden E.C. 2011. Human genome at ten: Life is complicated. *Nature* 464: 646–647.
53. Herrel A. *et al.* 2004. Omnivory in lacertid lizards: adaptative evolution or constraint? *J. of Evolutionary Biology* 17: 974–984.
54. Herrera Estrella L. *et al.* 1983. Expression of chimeric genes transferred into plant cells using a Ti-plasmid-derived vector. *Nature* 303: 209–213.
55. Herrera Estrella L. *et al.* 2002. La Biotecnología en el sector agrícola. En: Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.). Fondo de Cultura Económica y Conacyt, pp. 147–166, Ciudad de México.
56. Herrera Estrella L., Martínez M. 2003. Aplicaciones y controversias de las plantas transgénicas. En: Fronteras de la Biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.), El Colegio Nacional, Ciudad de México.
57. Herrera Estrella L., Martínez M. 2007. Plantas transgénicas. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.). El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, 2ª edición, Ciudad de México, pp. 167-194.
58. Heyneker H. *et al.* 1976. Synthetic *lac* operator is functional *in vivo*. *Nature* 263: 748–752.
59. Hogg J. 1861. On the distinctions of a plant and an animal, and on a Fourth Kingdom of Nature. *Edinburgh New Philosophical Journal* 12: 216–225.
60. Horie M. *et al.* 2010. Endogenous non-retroviral RNA virus elements in mammalian genomes. *Nature* 463(7277): 84–87.
61. Hozumi N. Tonegawa S. 1976. Evidence of somatic rearrangement of immunoglobulin genes coding for variable and constant regions. *PNAS* 73(10): 3628–3632.
62. INIA. 2006. En el desarrollo de plantas y otros organismos genéticamente modificados. [www.inia.cl/biotecnologia/publicaciones/GMO_INIA.pdf](http://www.inia.cl/biotecnologia/publicaciones/GMO_INIA.pdf+inia+trasng%C3%A9nicos&hl=es&gl=mx&ct=clnk&cd=1)
63. Itakura K. *et al.* 1977. Expression in *Escherichia coli* of chemically synthesized gene for the hormone somatostatin. *Science* 198: 1056–1063.
64. Itakura K., Riggs A. 1980. Chemical DNA synthesis and recombinant DNA studies. *Science* 209: 1401–1405.
65. Ivens K. *et al.* 2005. The genome of the kinetoplast parasite, *Leishmania major*. *Science* 309: 436–442.
66. Jackson D., Symons R., Berg P. 1972. Biochemical method for inserting new genetic information into DNA of Simian virus 40: circular SV40 DNA molecules containing *lambda* phage genes and the galactose operon of *Escherichia coli*. *PNAS* 67: 2904–2909.
67. Jiang N. *et al.* 2011. Pack mutator like transposable elements induce directional modifications of genes through biased insertion and DNA acquisition. *PNAS* 108: 1537–1542.
68. Johanson D.C., Edey M. 1981. *Lucy: The beginnings of humankind*. Simon and Schuster, 409 pp.
69. Jost F., Guespin M.J. 1993. Prokaryotic genetics: Genome organization, transfer and plasticity. Blackwell, London.
70. Kaper J. *et al.* 1997. Genetics of virulence of enteropathogenic *E. coli*. *Adv. Exp. Med. Biol.* 412: 279–287.
71. Keese P. 2008. Risks from GMOs due to horizontal gene transfer. *Environ. Biosafety Res.* 7: 123–149.
72. Kellis H. *et al.* 2004. Proof and evolutionary analysis of ancient genome duplication in the yeast *S. cerevisiae*. *Nature* 428: 617.
73. Klümper W., Qaim M. 2014. A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops (Un meta-análisis de los impactos de las cosechas genéticamente modificadas). *PLOS One* 9(11): e111629. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>.
74. Korana H. 1979. Total synthesis of a gene. *Science* 203: 614–625.
75. Krom N., Ramakrishna W. 2010. Conservation, rearrangements and deletion of gene pairs during evolution of four grasses genomes. *DNA Research* 17: 343–352.
76. Kupferschmidt K., 2011. Scientists rush to study genome of lethal *E. coli*. *Science* 332: 1249–1250.
77. Kyndt T. *et al.* 2015. The genome of cultivated sweet potato contains *Agrobacterium* T-DNAs with expressed genes: An example of a naturally transgenic food crop. *PNAS* 112(18): 5844–5849.
78. Lengeler J. *et al.* 1999. Biology of Prokaryotes, Blackwell Science, USA.
79. Lewin B. 1994. Genes V. Oxford University Press, USA.
80. López-Arredondo D.L., Herrera Estrella L. 2013. A novel dominant selectable system for the selection of transgenic plants under *in vitro* and greenhouse conditions based on phosphite metabolism. *Plant Biotechnol. J.* 11(4): 516–525.
81. Lwoff A. 1953. Lysogeny. *Bacterial Reviews* 17: 269–337.
82. Madigan M., Martinko J., Parker J. 2000. *Biology of microorganisms*. Prentice Hall, USA.
83. Maeda N., Smithies O. 1986. The evolution of multigene families: human haptoglobin genes. *Annu. Rev. Genet.* 20: 81–108.
84. Margulis L., Sagan D. 2005. What is life? University of California Press. USA.
85. Matic I. *et al.* 1995. Interspecies gene exchange in bacteria. *Cell* 80: 507–515.
86. Mazodier P., Davis J. 1991. Gene transfer between distantly related bacteria. *Annu. Rev. Genet.* 25: 147–171.
87. McClintock B. 1957. Controlling elements and the gene. *Cold Spring Harbor Symposium* 21: 197.
88. McClintock B. 1987. The discovery and characterization of transposable elements: the collected papers of Barbara McClintock. Garland Publishers, USA.
89. McDonald J. 1995. Transposable elements:

- possible catalysis of organismic evolution. *Trends Ecol. Evol.* 10: 123–126.
90. Michel F., Dubon B. 1986. Genetic exchanges between bacteriophage T4 and filamentous fungi. *Cell* 46: 323–335.
91. Morgante M. *et al.* 2005. Gene duplication and exon shuffling by helitron-like transposons generate intraspecies diversity in maize. *Nat. Genet.* 37(9): 997–1002.
92. Mullis K., Falonna F. 1987. Specific synthesis of DNA *in vitro* via polymerase catalyzed chain reaction. *Meth. Enzymol.* 55: 335–350.
93. Murat F. *et al.* 2010. Ancestral grass karyotype reconstruction unravels new mechanisms of genome shuffling as a source of plant evolution. *Genome Research* 20: 1547–1557.
94. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2016. Genetically engineered crops: experiences and prospects (Cultivares desarrollados por ingeniería genética: experiencias y prospectivas). The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/23395>.
95. Nass S. 1969. Similarities of bacteria and mitochondria. *International Review of Cytology* 23: 55–118. G.H. Bourne, J.F. Danielli (Eds.). Elsevier, USA.
96. Nicolia A. *et al.* 2014. An overview of the ten last years of genetically engineered crop safety research. *Critical Reviews in Biotechnology* 34(1): 77–123.
97. Osusky M., Kissova J., Kovac L. 1997. Interspecies transplacement of mitochondria in yeast. *Curr. Genetics* 32: 24–26.
98. Ozden Y. 2012. Transgenic plants; advances and limitations. *InTech*. Y. Ozden (Ed.). DOI: 10.5772/1409.
99. Pinkert C.A. 2016. Transgenic animal technology. C.A. Pinkert (Ed.). 3rd edition, Elsevier B.V.
100. Potrykus I. 2001. Golden rice and beyond. *Plant Physiol.* 125: 1157–1161.
101. Price D.C. *et al.* 2012. *Cyanophora paradoxa* genome elucidates origin of photosynthesis in algae and plants. *Science* 335(6070): 843–847.
102. Prudhomme M. *et al.* 2006. Antibiotic stress induces genetic transformability in human pathogen *S. pneumoniae*. *Science* 313: 189–192.
103. Ptashne M. 1992. A genetic switch. Phage lambda and higher organisms. 2nd edition, Blackwell, USA.
104. Purugganan M., Wessler S. 1992. The splicing of transposable elements and its role in intron evolution. *Genetica* 86: 295–303.
105. Ricroch A.E. 2013. Assessment of GE food Safety using “omics” techniques and long-term animal feeding studies. *New Biotechnology* 30(4): 349–354.
106. Ricroch A.E. *et al.* 2014. Looking back at safety assessment of GM food/feed: an exhaustive review of 90-day animal feeding studies. *Int. J. Biotechnol.* 13(4): 230–256.
107. Rumpho M.E. *et al.* 2008. Horizontal gene transfer of the algal nuclear gene *psbO* to the photosynthetic sea slug *Elysia chlorotica*. *PNAS* 105: 17867–17871.
108. Sánchez F. *et al.* 1975. Transformation of *Escherichia coli* K-12 by linear DNA from *Salmonella typhi*. *Microb. Genet. Bull.* 38: 13–14.
109. Schnable P.S. *et al.* 2009. The B73 Maize genome: complexity, diversity and dynamics. *Science* 326: 1112–1115.
110. Schubert S. *et al.* 2002. *Yersinia* high-pathogenicity island contributes to virulence in *Escherichia coli* causing extraintestinal infections. *Infect. Immun.* 70: 5335–5337.
111. Schubert S. *et al.* 2009. Role of the intraspecies recombination in the spread of pathogenicity islands in the *Escherichia coli* species. *PLOS Pathogens* 5(1): e1000257.
112. Séralini G. E. *et al.* 2012. Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Food and Chemical Toxicology* 50: 4221–4231.
113. Séralini G.E. *et al.* 2014a. Republished study: long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Environmental Sciences Europe* 26: 14.
114. Smith D. 1979. From extracellular to intracellular: the establishment of a symbiosis. *Proceedings of the Royal Society of London* 204: 115–130.
115. Solleiro J. L., Castañón R. 2013. Introducción al ambiente del maíz transgénico. Análisis de ocho casos en Iberoamérica. México: Agrobio México y CambioTec.
116. Swanson-Wagner R. *et al.* 2010. Pervasive gene content variations in maize and its undomesticated progenitor. *Genome Research* 20: 1689–1699.
117. Tagahian D., Nickoloff J. 1995. Electrotransformation of chinese hamster ovary cells. *Methods Mol. Biol.* 48: 115–124.
118. Touchon M. *et al.* 2009. Organised genome dynamics in the *Escherichia coli* species results in highly diverse adaptive paths. *PLOS Genetics* 5(1): e1000344.
119. Treangen T.J. *et al.* 2008. The impact of the neiserial DNA uptake sequences on genome evolution. *Genome Biol.* 9(3): R60. DOI: 10.1186/gb-2008-9-3-r60.
120. Venter J.C. *et al.* 2001. The sequence of the human genome. *Science* 291: 1304–1349.
121. Vielle-Calzada J.P. *et al.* 2009. The Palomero genome suggests metal effects on domestication. *Science* 326: 1078–1085.
122. Voytas D. 1996. Retroelements in genome organization. *Science* 274: 737–738.
123. Wallin I. 1927. *Symbiointicism and the origin of species*. Williams and Wilkins, Baltimore, 8.
124. Watson J. *et al.* 1988. Molecular biology of the gene. Benjamin/Cummings Publishing Company, USA.
125. Watson J. *et al.* 1996. Recombinant DNA. W.H. Freeman & Co. USA.
126. Watson J., Crick F. 1953a. Genetical implications of the structure of DNA. *Nature* 171: 964–967.
127. Watson J., Crick F. 1953b. Molecular structure of nucleic acids: A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature* 171: 737–738.
128. Wolfe K., Shields D. 1997. Molecular evidence for an ancient duplication of the entire yeast genome. *Nature* 387: 708–713.
129. Xing Y., Lee C. 2006. Alternative splicing and RNA selection pressure-evolutionary consequences for eukaryotic genomes. *Nature Reviews Genetics* 7: 499–509.
130. Yang D. *et al.* 1985. Mitochondrial origins. *PNAS* 82: 4443–4447.
131. Yao J.H. *et al.* 2002. Techniques for producing transgenic animals and the recent developments. *Di Yu Jun Yi Da Xue Xue Bao* 22: 78–81.
132. Young M., Edis T. 2004. Why intelligent design fails: A scientific critique of the new creationism. Rutgers University Press, USA.
133. Zhenxiang X. *et al.* 2012. Horizontal transfer of expressed genes in parasitic flowering plant. *BMC Genomics* 13: 227.



CAPÍTULO X

USO Y APLICACIÓN RESPONSABLE DE LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS

- MARCO JURÍDICO Y CONSIDERACIONES ADICIONALES DE ORGANIZACIONES
E INSTANCIAS SOBRE LOS TRANSGÉNICOS

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan algunas consideraciones, publicadas en revistas y reportes, sobre el uso responsable del conocimiento científico y de la tecnología que de él deriva. También se presentan los acuerdos internacionales y los marcos jurídicos para el manejo de los organismos transgénicos, en particular en México. Asimismo, se analizan las opiniones sobre los organismos genéticamente modificados (OGM) de algunas organizaciones internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), así como de las autoridades

y agencias regulatorias en diferentes regiones y países, como la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés), la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus siglas en inglés) y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios de México (Cofepris). Por otro lado, se retoman las posturas en torno a los transgénicos presentadas en las declaraciones de grupos de premios Nobel y en los reportes de las academias de ciencias y medicina de diferentes regiones del planeta. En particular, se desglosa la situación de los OGM en México. Finalmente, se presenta un conjunto adicional de señalamientos sobre los organismos transgénicos, muchos de ellos tratados ya con mayor detalle en capítulos anteriores.

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL USO RESPONSABLE DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO Y LA BIOTECNOLOGÍA

La ciencia es una actividad humana intrínsecamente arraigada en su espíritu inquisitivo que busca generar y avanzar el conocimiento científico sobre el universo y la naturaleza, incluido el ser humano y la sociedad.

El sustento de la originalidad del nuevo conocimiento científico debe darse a través de la evaluación por pares de expertos y de su publicación en revistas y libros arbitrados. Resulta fundamental avalar la veracidad y la originalidad del conocimiento, responsabilidad de la comunidad académica, ya que la ausencia de sustento, la mentira y el fraude destruyen la credibilidad de la sociedad y de la opinión pública por el trabajo científico, como se ha señalado en el capítulo VII.

El conocimiento científico ha sido utilizado para el desarrollo y la innovación de tecnología pertinente y competitiva, tecnología que debe ser responsable y sustentable, y que debe tener el propósito de resolver problemas, atender demandas y producir satisfactores para las sociedades locales y la global.

La sociedad humana está avanzando hacia una sociedad del conocimiento. Es deseo y propuesta de los académicos y científicos que, conforme se avanza en este camino, las decisiones de los gobernantes y miembros de la sociedad se sustenten cada vez más en conocimiento científico avalado por los verdaderos expertos científicos. Muchos de estos expertos en diferentes disciplinas, en particular los de mayor reconocimiento y liderazgo académico, integran las

academias de ciencias y medicina de diferentes países y regiones, incluyendo México. Las academias tienen como objetivo y misión elaborar reportes, recomendaciones y evaluaciones, con el mayor sustento científico posible, para informar y respaldar las decisiones de la sociedad, los gobiernos y las organizaciones internacionales, como la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y sus agencias.

Es indispensable que la utilización del conocimiento científico y de la tecnología se dé: i) de forma responsable, sustentable y respetuosa con la salud y el medio ambiente y la biodiversidad; ii) de manera justa, tratando de reducir las diferencias sociales y las inequidades; iii) respetando la riqueza cultural; iv) conforme a marcos jurídicos adecuados y v) tras un análisis detallado de los beneficios y los riesgos que representa el utilizar o no una tecnología particular para atender la solución de algún problema o demanda.

En particular, para el caso de la biotecnología, como se ha señalado a lo largo de este libro, a la fecha no existe evidencia científica sólida que indique un impacto negativo ni ningún daño a la salud o al medio ambiente por el uso de organismos transgénicos o sus productos, específicamente: de plantas transgénicas hoy presentes en el mercado. Sin embargo, como con cualquier tipo de tecnología, algunos productos transgénicos pudieran implicar riesgos potenciales, por lo que resulta necesario siempre evaluar su uso y, sobre todo, la posible liberación de OGM al ambiente, caso por caso, y con base en evidencia científica. Resulta relevante reiterar que el conocimiento que se utilice para estas evaluaciones debe contar con

amplio sustento científico. Lamentablemente existen numerosos ejemplos de publicaciones en revistas científicas y en libros que, luego de ser publicadas, son retiradas o retractadas en estas publicaciones por contener información falsa, no sustentada o no reproducible por otros. Entonces, es fundamental que el conocimiento y las evidencias científico-técnicas,

publicadas en ciertas áreas como la biotecnología, puedan ser replicadas de manera independiente por otros grupos de investigación en diferentes lugares para realmente sustentar la veracidad del conocimiento científico y de las evidencias publicadas de manera sólida. Es esencial que los experimentos, en particular en esta área de biotecnología y transgénicos, se



Figura X.1. Evaluación de los organismos transgénicos y sus productos.

hayan realizado en las condiciones técnicas y con los controles adecuados —como se ha señalado a detalle en los capítulos IV y VI—, de modo que permitan su replicación por otros (ver figura X.1). Finalmente, el conocimiento científico sobre biodiversidad que sustenta el uso responsable de la biotecnología, debe aplicarse en el desarrollo de biotecnologías que atiendan múltiples problemáticas y demandas en diferentes sectores, como se presentó detalladamente en los capítulos II, V, VII, VIII y IX. Estas biotecnologías deben ser evaluadas y validadas, deben ser además respetuosas con el medio ambiente y la salud; su objetivo hoy debe ser el de avanzar hacia un planeta más sustentable para lo cual debe hacerse uso responsable de organismos transgénicos y, en particular, de cultivos transgénicos y sus productos. Por último, como se expone en este capítulo, las biotecnologías deben ser aplicadas conforme a los acuerdos internacionales y a los marcos jurídicos nacionales y regionales para el manejo de OGM.

ACUERDOS INTERNACIONALES, REGULACIÓN EN EL EXTRANJERO Y MARCO JURÍDICO EN MÉXICO SOBRE EL USO DE LOS OGM

Como se ha señalado en varios capítulos de este libro, la utilización y la liberación al ambiente de los organismos transgénicos, en particular las plantas, ha despertado cuestionamientos y ha generado conciencia mundial sobre la importancia de analizar y evaluar responsable y exhaustivamente este proceso, tomando en cuenta los diferentes factores y los posibles riesgos. A través de discusiones y re-

visiones, lo anterior ha permitido la obtención de acuerdos internacionales y legislaciones nacionales para el manejo responsable de los OGM.

CONTEXTO INTERNACIONAL

Uno de los acuerdos internacionales, firmado por México, que norma el uso de los organismos transgénicos, y en particular de las plantas transgénicas y sus productos, es el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) de la ONU, el cual entró en vigor en 1993. Este convenio básicamente establece un acuerdo sobre la seguridad de la biotecnología o la bioseguridad entre las partes que lo conforman. Con base en lo anterior, en el año 2000 se estableció el Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología (SCSDB-Protocolo de Cartagena), que fue ratificado por México y entró en vigor en septiembre de 2003. Muchos países han firmado el CDB, el Protocolo de Cartagena y han desarrollado una legislación adecuada para el manejo de los transgénicos (ver figura X.2).

Mediante el Protocolo de Cartagena, los países firmantes, entre ellos México, se comprometieron a establecer las regulaciones y medidas necesarias para evaluar los movimientos transfronterizos de los transgénicos que pudieran tener efectos adversos sobre la diversidad biológica o sobre la salud humana. Más recientemente, en el año 2008, se instrumentó con el mismo propósito (la bioseguridad de la biotecnología) el Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur sobre Responsabilidad y Compensación Suplementario al Protocolo de Cartagena sobre Bioseguridad de la Biotecno-

logía (SCSDB-Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur), también firmado por México.

Estos son los acuerdos y marcos jurídicos internacionales que nos rigen. Ciertamente, los países desarrollados, incluyendo Estados Unidos y la Unión Europea, tienen marcos jurídicos nacionales o regionales y agencias especializadas para el manejo y la autorización de los transgénicos y sus productos. Estos países, como se ha señalado en varios capítulos anteriores, tienen autoridades o agencias regulatorias en materia de inocuidad y seguridad alimentaria para implementar las legislaciones y realizar las evaluaciones. En Estados Unidos se encuentra la FDA, en Europa la EFSA y en México la Cofepris.

CDB, 1993; SCSDB-Protocolo de Cartagena, 2000; SCSDB-Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur, 2011

ORGANISMOS INTERNACIONALES

Los organismos y las organizaciones internacionales más importantes que realizan trabajos de análisis y participan en la discusión y el establecimiento de mecanismos de cooperación, relacionados con bioseguridad y biotecnología, son, entre otros:

La OCDE cuenta con un área dedicada a la biotecnología. Dentro de las aportaciones en materia de organismos genéticamente modificados o transgénicos está la Conferencia de Edimburgo, que concluyó con la integración de un panel de consulta y discusión sobre los OGM. Los participantes (400 representantes, incluidas ONG, de 40 países), identificaron aspectos relevantes como la necesidad de un



Figura X.2. El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD) y el Protocolo de Cartagena son los instrumentos internacionales elaborados para proteger la biodiversidad y para dar el adecuado manejo transfronterizo a los OGM.

debate más abierto, transparente e incluyente en los procesos de definición de políticas en la materia, así como el reconocimiento de la importancia del uso de los OGM y su inocuidad y seguridad respecto a la salud humana.

Asimismo, en relación con la biotecnología la OCDE ha trabajado desde hace tiempo en la organización de reuniones, estudios y publicación de documentos entre los que destaca la versión revisada de la guía para identificar las plantas transgénicas y su clasificación (“OECD guidance for the designation of a unique identifier for transgenic plants”, 2006:

<http://www2.oecd.org/biotech/>), mediante la cual se han establecido los lineamientos para la asignación de claves a los OGM. También se ha integrado una base de datos de acuerdo con lo establecido en el Protocolo de Cartagena, en la cual se encuentra una lista de OGM utilizados mundialmente (<http://bch.biodiv.org/about/default.shtml>). Esta base de datos permite a las autoridades de los países miembros compartir información sobre los productos transgénicos. Por otro lado, existe un reporte de la OCDE sobre la seguridad de la biotecnología llamado “Recombinant DNA safety considerations”, París, 1986. Por último, en 2015 la OCDE publicó el documento “Novel food and feed safety. Safety assessment of foods and feeds derived from transgenic crops”, conformado por dos volúmenes que dedican cada capítulo al análisis de cada uno de los distintos cultivos. Lamentablemente, en el caso del maíz las referencias que sustentan las consideraciones no están actualizadas: de un total de 70, sólo cuatro o cinco son del año 2000 o 2001, todas las demás son anteriores. Por ello, dicha publicación no se consideró un documento actualizado para ser discutido en este libro.

La OMS coincide con el proceso de la evaluación del riesgo de la liberación de OGM y considera que los diferentes organismos genéticamente modificados (GM) incluyen genes insertados de formas distintas. Esto significa que cada alimento GM y su inocuidad deben ser evaluados individualmente, caso por caso, y que no es posible hacer afirmaciones generales sobre la inocuidad de todos los alimentos GM. Señala también que los alimentos GM actualmente disponibles en el mercado interna-

cional han pasado las evaluaciones de riesgo y no han generado daño, y que es probable que no representen riesgos para la salud humana. Además, no se han demostrado efectos negativos sobre la salud humana como resultado del consumo de dichos alimentos por la población de los países donde fueron aprobados. El uso continuo de evaluaciones de riesgo con base en los principios del Codex Alimentarius (FAO/OMS), incluido el monitoreo post comercialización, debe formar la base para evaluar la inocuidad de los alimentos GM. En 2006 la OMS publicó un documento sobre los alimentos transgénicos que se incluye como anexo 3 en esta publicación.

La FAO y la OMS han avalado protocolos para las pruebas de alimentos OGM. También, en 2011 la FAO elaboró el documento “Biosafety resource book” que consta de cuatro libros que buscan apoyar y avanzar en materia de bioseguridad.

OCDE, 1986; Codex Alimentarius, 2006; OCDE, 2006; OMS, 2006; Constable et al., 2007; Fratamico, 2008; Codex Alimentarius, 2009; FAO, 2011; Clive, 2014; OCDE, 2015

CONSIDERACIONES, DECLARACIONES, RECOMENDACIONES, MARCOS JURÍDICOS EXISTENTES Y PROPIEDAD INTELECTUAL

Es relevante remarcar que, como se ha señalado en el capítulo II, en el año 2015 se sembraron cultivos transgénicos en 28 países en donde el área cultivada aumenta año con año. En 2009 se reportaron 134 millones de hectáreas sembradas con cultivos transgénicos que incluyeron maíz,

arroz, soya, papa, betabel, calabaza, alfalfa, canola y algodón. En 2015 la superficie cultivada con plantas transgénicas fue de 179 millones de hectáreas. El cultivo y el uso de estos cultivos ocurre conforme a marcos jurídicos internacionales, regionales y locales.

En Estados Unidos, el país de mayor producción y utilización de productos transgénicos, desde su aparición, hace más de 35 años, ha habido un debate importante sobre los beneficios y los posibles riesgos de estos productos. Como se ha señalado previamente, más del 90% del maíz, la soya y el algodón que se cultiva en Estados Unidos es transgénico y sus productos se utilizan para alimentar a millones de seres humanos y animales, sin daños reportados. La FDA, como se señaló en los capítulos IV y VI, no ha retirado del mercado ningún producto de origen transgénico de los que actualmente se comercializan. Estados Unidos también cuenta con el Departamento de Agricultura (USDA, por sus siglas en inglés) para apoyar estos esfuerzos. En este sentido, como se ha comentado en los capítulos III, IV, V y VI, las tres Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos (NASEM, por sus siglas en inglés), que integran el Consejo Nacional de Investigación de Estados Unidos (NRC, por sus siglas en inglés), han elaborado y publicado un conjunto importante de documentos relacionados con los transgénicos y en particular con las plantas, tomando en cuenta el marco jurídico existente y las propuestas para su mejora. Entre estos documentos destacan aquellos que abordan los siguientes temas: a) la seguridad del alimento de origen transgénico (NRC, 2004); b) el efecto de las plantas

transgénicas al medio ambiente (NRC, 2002a); c) la biotecnología animal (NRC, 2002b); d) el monitoreo de los cultivos de OGM, con el propósito de orientar con sustento científico la toma de decisiones para la utilización de OGM (NRC, 1989). Recientemente se sumaron dos reportes más a esta lista, señalados ampliamente en el capítulo III: uno sobre el impacto de las cosechas de organismos desarrollados por ingeniería genética en la sustentabilidad de las granjas de Estados Unidos (NASEM, 2010), y el último, sobre las experiencias y los beneficios de las plantas transgénicas (NASEM, 2016). En este último reporte se presentan con detalle los amplios beneficios económicos, sociales y de otros tipos de los cultivos transgénicos en Estados Unidos y en otros lugares. También, este documento incluye un capítulo sobre la regulación de las plantas transgénicas, con artículos de Kuzma y colaboradores, 2008, y de Kuzma, 2013. Otros grupos importantes de científicos, como la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS, por sus siglas en inglés), que edita la revista *Science*, ha publicado pronunciamientos y señalamientos a favor de los cultivos transgénicos, como se señaló en el capítulo III.

NRC, 1989; NRC, 2002a; NRC, 2002b; NRC, 2004; Kuzma, 2008; NASEM, 2010; AAAS, 2012; FDA, 2013; Kuzma, 2013; Clive, 2014; FDA, 2015; NASEM, 2016

En la Unión Europea también ha habido varios señalamientos de academias de ciencias y medicina a favor de la biotecnología y los organismos transgénicos, en particular de

las plantas y sus productos. A raíz de esto, se han elaborado importantes documentos que sustentan los amplios beneficios de la biotecnología, como se ha señalado en los capítulos II y III. Por otro lado, en aquel continente se han desarrollado marcos jurídicos para la utilización y la liberación de OGM conforme a los señalamientos de la Comisión Europea con el apoyo de la EFSA. La Comisión Europea ha solicitado reportes sobre los OGM y se tiene uno publicado del año 2010. Entre las últimas decisiones sobre los cultivos transgénicos, se encuentra el pronunciamiento de la Comisión Europea (2015) para que la decisión de sembrar o no plantas transgénicas en sus territorios nacionales sea trasladada a nivel de los países miembros de la Unión.

Ciertamente, como se señaló en los capítulos IV y VI, en Europa existe una situación dividida con relación a los transgénicos y en particular a las plantas y sus productos. De hecho, varios países prohíben su cultivo; sin embargo, el maíz transgénico se cultiva en cinco países miembros de la Unión Europea y los alimentos transgénicos se consumen en muchos más. Existen 58 productos alimentarios autorizados por la EFSA, lo cual en alguna medida resulta paradójico y extraño ya que los europeos consumen alimentos transgénicos y sus productos, aunque la mayoría de los países objeta la siembra, pero no el consumo. Como se ha señalado ya, la EFSA no ha retirado del mercado ningún transgénico ni sus productos. Esta agencia también evalúa y regula el uso de los herbicidas químicos, como el glifosato, y en una publicación reciente (2016) su postura seguía siendo la misma, tema que se aborda a

detalle en los capítulos IV y VI. Esta situación de discordancia y falta de sentido común que ocurre en Europa, se ha comentado recientemente en un artículo de Tagliabue, 2016. También en el año 2016 se publicó un reporte técnico del Instituto Flamenco de Biotecnología de Bélgica, en el que se señalan los beneficios, en particular para el medio ambiente, de los cultivos transgénicos.

European Commission, 2010; EFSA, 2012; EASAC, 2013; European Commission, 2015a; European Commission, 2015b; EFSA, 2016; Reporte Técnico Fundación Antama, 2016; The Royal Society, 2016; Tagliabue, 2016

En China, India y nueve países de Iberoamérica (Argentina, Brasil, Chile, Colombia, España, Honduras, Portugal, Uruguay y México) se cultivan y se consumen OGM, y muchos de estos países incluso exportan los cultivos transgénicos y sus productos. Como se señaló ya en los capítulos V y VI, en el libro de Solleiro y Castañón, 2013, se relata la experiencia de la siembra de maíz y otros cultivos transgénicos en ocho países de Iberoamérica, incluyendo Argentina, Brasil y España, y se reporta la coexistencia sin daño del maíz transgénico con maíces híbridos convencionales, así como los amplios beneficios para los usuarios. Se habla entonces de una agricultura de coexistencia. En China hubo un esfuerzo importante para desarrollar plantas transgénicas, en particular arroz y maíz, pero aparentemente se frenó por las consideraciones, las presiones y los supuestos daños de los cultivos transgénicos y sus productos, enarboladas por ONG y activistas,

tipo Greenpeace, sin sustento científico, como ocurre en muchos países de Europa y América, incluyendo México. Sin embargo, el Gobierno de China, a través de la compañía ChemChina, en 2016 compró a la empresa suiza/transnacional Syngenta, que produce semillas transgénicas. Lo anterior indica que esta nación se prepara para desarrollar sus propias variedades transgénicas, máxime que han vencido algunas de las patentes de los genes de resistencia a insectos. Además, el maíz y la soya transgénicos hoy se cultivan aparentemente de manera ilegal en varias provincias de China. Resulta difícil encontrar alguna estrategia más adecuada, inteligente y responsable para contender con las demandas por alimentos saludables y adecuados para cerca de 1,400 millones de habitantes chinos, sin el apoyo de los cultivos transgénicos. El mismo asunto a menor escala ocurrió en Brasil, Argentina y Paraguay que iniciaron con siembras ilegales y finalmente hoy ya siembran soya y maíz transgénicos de manera legal.

AgBioWorld Declaration in Support of Agricultural Biotechnology, 2012: <http://www.agbioworld.org/declaration>; Solleiro y Castañón, 2013; Brookes y Barfoot, 2014; Clive, 2014; Huang y Peng, 2015; The Economist, 2016; Bao-Rong, 2016; Han et al., 2016; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html; NASEM, 2016, DOI: 10.17226/23395

Es muy alentador y estimulante contar con dos declaraciones (2012 y 2016) de grupos de premios Nobel en apoyo de la biotecnología y

los transgénicos. En ambas se señala que no se ha reportado daño por el uso de los transgénicos y que, por ende, son seguros. En la del año 2016, firmada hasta ahora por 123 premios Nobel, se indica que se han mal interpretado los riesgos y desvirtuado los beneficios de los cultivos transgénicos y sus productos, y se indica que las plantas transgénicas que se usan en el campo representan una tecnología perfeccionada, también llamada “agricultura de precisión”, superior a las anteriores y con grandes beneficios, entre ellos, reducir los tiempos y la incertidumbre en la creación de nuevos cultivos, beneficiando así al medio ambiente y a la sociedad. Además, en esta declaración se señala que los detractores liderados por los activistas de Greenpeace han destruido de manera criminal cultivos transgénicos y en particular los del arroz dorado (ver figura X.8). Esta variedad de arroz dorado transgénico, como se indica en la declaración, fue diseñada para incrementar los precursores de la vitamina A en este cereal, alimento principal en Asia. Muchos consumidores de arroz en el continente asiático, y en particular los más pobres, no tienen la posibilidad de una dieta balanceada y una deficiencia importante es la de vitamina A, lo cual puede causar ceguera e incluso la muerte. Como también se señala en esta declaración, la deficiencia en vitamina A ha sido la causa de muerte de varios cientos de miles de niños, en particular menores de un año, anualmente. Confiamos en que estos señalamientos hagan reaccionar a los detractores y en particular a Greenpeace.

AgBioWorld Declaration in Support of Agricultural Biotechnology, 2012: <http://www.agbioworld.org>



Figura X.3. Cultivares transgénicos de arroz y maíz.

org/declaration; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html

Todos estos documentos, reportes, experiencias e información con relación a los organismos transgénicos, generada en diferentes instancias, organizaciones y entornos a lo largo y ancho del mundo, deben tomarse en cuenta de manera seria para contar con los argumentos que permitan un uso responsable pero inaplazable de los organismos transgénicos; en particular en México, de las plantas GM, como se analiza en la siguiente sección y se comentó en los capítulos VI y VIII. Se insiste en que en varios países, incluyendo nueve iberoamericanos como Argentina y Brasil, el uso ilegal de las plantas transgénicas fue el inicio de su utilización en estos países. Posteriormente, los amplios beneficios permitieron que hoy los agricultores de estas naciones legalmente cultiven,

consuman y exporten cereales transgénicos. El mismo escenario podría darse en China y también en México, ya que ambos países importan cereales transgénicos para consumo humano y animal por la incapacidad para producir todo el cereal que se requiere.

Finalmente, es importante recordar que la propiedad intelectual de los cultivares transgénicos pertenece a las compañías transnacionales, como Monsanto, Dupont, Dow AgroSciences, Syngenta y Bayer, que suministran el grano a los campesinos en diferentes países. Como se señaló ya en el capítulo VIII, algunas de las patentes comerciales que protegen a las plantas transgénicas de primera generación vencen en el año 2016 y, por ello, los genes que protegen a las plantas contra plagas de insectos se podrán usar pronto como genéricos.

Algunas de las compañías antes mencionadas han cambiado de dueño por distintos motivos. En el año 2016, la compañía alemana Bayer

hizo una oferta para adquirir a Monsanto y la compañía estatal china, ChemChina, adquirió a Syngenta. La compra de Monsanto por Bayer es una indicación que esta empresa europea que produce también insecticidas químicos, no quiere perder el control del mercado del alimento. La decisión del Gobierno de China de comprar Syngenta habla del convencimiento responsable de contar en China con la capacidad para desarrollar cultivares transgénicos y sus productos, donde ya se utilizan y se requieren para alimentar una población creciente de casi 1,400 millones de habitantes. También existen trabajos recientes que indican los beneficios de los cultivos transgénicos en general, y en particular: el uso del algodón transgénico en India, como la publicación del año 2016 del Instituto Flamenco de Biotecnología de Bélgica, en la cual se indica que la producción de algodón transgénico ha aumentado en dicha nación de manera significativa, pasando de ser un país importador a uno exportador de fibra de calidad con amplios e importantes beneficios para los agricultores que lo siembran. Asimismo, y congruente con lo que se presenta y se subraya en este libro, el uso de insecticidas químicos en India ha disminuido de manera dramática en los últimos cinco años. Como se señaló en el capítulo VI (ver figura VI.2) se ha reportado en varios países la coexistencia entre cultivos transgénicos y los tradicionales, que ha permitido una verdadera agricultura de coexistencia, con ventajas para esos países.

NRC, 1989; NRC, 2002a; NRC, 2002b; Thomas y Fuchs, 2002; NRC, 2004; Flannery et al., 2004; AEBC, 2005; APBN, 2004; Trigo y Capp, 2006; CibioGem, 2008; Kuzma, 2008; Tang et al., 2009; European Commission,

2010; Kanter, 2010; NASEM, 2010; AAAS, 2012; EFSA, 2012; AgBioWorld Declaration in Support of Agricultural Biotechnology, 2012: <http://www.agbioworld.org/declaration>; EASAC, 2013; FDA, 2013; Kuzma, 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Brookes y Barfoot, 2014; Clive, 2014; European Commission, 2015a; European Commission, 2015b; FDA, 2015; Huang y Peng, 2015; Bao-Rong, 2016; EFSA, 2016; Han et al., 2016; NASEM, 2016, DOI: 10.17226/23395; Reporte Técnico Fundación Antama, 2016; The Royal Society, 2016; Tagliabue, 2016; The Economist, 2016; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html

CONTEXTO NACIONAL

En México, mediante una iniciativa del Senado de la República, que solicitó y contó con el apoyo del Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), y en cumplimiento con compromisos internacionales adquiridos —en particular, la firma del Protocolo de Cartagena—, en 2005 el Congreso de la Unión emitió la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM), después de un proceso de amplia consulta, discusión y revisión que tuvo una duración de tres años.

Esta ley tiene como objetivo garantizar la protección de la salud humana, del medio ambiente, de la diversidad biológica y de la sanidad animal, vegetal y acuícola en cualquier actividad vinculada con OGM. Entre los puntos más importantes que abarca, destacan los siguientes:

i) La definición de los principios y la política de bioseguridad —como la evaluación caso



Figura X.4. Cámara de Diputados de México.

por caso y paso por paso— con base en conocimiento científico.

- ii) La determinación de competencias de diferentes dependencias gubernamentales.
- iii) El establecimiento de las bases para el funcionamiento de la Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (Cibiogem).
- iv) La definición de las bases de los procedimientos para la evaluación y el monitoreo, caso por caso, de posibles riesgos en el uso de OGM.
- v) El establecimiento de regímenes para el manejo de OGM (permisos, avisos y autorizaciones).
- vi) Las bases para el establecimiento del Sistema Nacional de Información sobre Biosegu-

ridad y Registro Nacional de Bioseguridad de OGM.

- vii) La determinación de áreas geográficas libres de OGM.
- viii) La definición de las bases para el establecimiento de normas en materia de bioseguridad.
- ix) El establecimiento de las medidas de control y sanciones.
- x) La definición de los mecanismos para la participación pública, el acceso a la información y la participación social a través del Consejo Consultivo Mixto de la Cibiogem.
- xi) La definición de instrumentos de fomento a la investigación científica y tecnológica en materia de bioseguridad y biotecnología.

La LBOGM, publicada en 2005 en el Diario Oficial de la Federación, cuenta con un reglamento, publicado en 2008, para instrumentarla (RLBOGM, 2008). Otra herramienta jurídica con la que se cuenta en nuestro país es la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SAG/BIO-2014: “Especificaciones generales para el etiquetado de organismos genéticamente modificados que sean semillas o material vegetativo destinado a siembra, cultivo y producción agrícola” (NOM, 2014).

Por otro lado, en México también existe, como ya fue señalado, la Cofepris, encargada de analizar los riesgos sanitarios y de apoyar a la Secretaría de Salud en la evaluación de la inocuidad por el consumo de los alimentos transgénicos conforme a la Ley General de Salud y a la LBOGM. Se indicó previamente, y se insiste, que las semillas de las plantas transgénicas que se utilizan actualmente para siembra y alimento en México, registradas en la Cofepris, no han sido retiradas del registro.

Esta ley incluye y establece las funciones de la Cibiogem, comisión que ha trabajado en el registro de organismos transgénicos conforme a la LBOGM, apoyando a las secretarías de estado responsables: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Secretaría de Salud (SS), y a la Cofepris. La Cibiogem en 2015 publicó el libro *Orden jurídico nacional e internacional en materia de bioseguridad de organismos genéticamente modificados*, en el cual se listan todos los ordenamientos jurídicos relacionados con los organismos transgénicos (Convenio de Diversidad Biológica CDB, 1993; SCSDB-Protocolo de Cartagena PCSB, 2000; SCSDB-Protocolo

Kuala-Lumpur PHL, 2008; LBOGM, 2005; RLBOGM, 2008, y NOM, 2014).

Actualmente, como se indica en el capítulo VI, México adquiere semillas transgénicas como alimento para ganado y consumo humano (ver figura X.5). La Cofepris ha generado numerosos permisos para la importación y el consumo de OGM por animales y humanos, en particular maíz, que en el periodo de 1995 a 2013 sumaron 116. Estos permisos permitieron la importación de diferentes productos, principalmente soya, algodón y maíz que se usan conforme a lo establecido por la LBOGM y la Ley General de Salud. De hecho, anualmente se importa de Estados Unidos más del 70% del maíz amarillo, de origen transgénico, para satisfacer la demanda para consumo principalmente animal pero también por humanos. Además, los cereales transgénicos y sus derivados procesados, producidos en Estados Unidos, se venden en los supermercados de México. La Cofepris no ha retirado del mercado ningún producto de origen transgénico por problemas de daños a la salud.

Desde 1988 la Sagarpa ha evaluado la liberación experimental de OGM al ambiente. En el marco de la LBOGM, la Semarnat, con el apoyo de la Cibiogem y en coordinación con la Sagarpa, se han evaluado los posibles usos y la liberación de OGM. En el periodo 2005–2015 se han otorgado cerca de 600 permisos para la siembra de cultivos transgénicos. Existe trabajo ya mencionado, del año 2013, que presenta un análisis de la liberación de cultivos transgénicos en ocho países iberoamericanos, incluyendo México, Brasil, Argentina y España. Este reporte, como se señaló en los capítu-

los IV, V y VI, señala que no hay evidencia de daño y también que no hay contaminación por el cultivo de maíz transgénico, sino coexistencia entre el maíz transgénico y los maíces convencionales, que existe una verdadera agricultura de coexistencia. Lamentablemente, como se señaló a detalle también el capítulo VI, los argumentos y señalamientos en contra de las plantas transgénicas por supuestos daños a la salud, al medio ambiente y la biodiversidad, a través de diferentes estrategias, mecanismos y acciones, incluyendo la demanda colectiva de 2013 a nivel del poder judicial, han impedido la siembra comercial de maíz transgénico. Esta demanda por supuestos daños de los OGM no cuenta con sustento científico y, sin tomar en cuenta los múltiples beneficios de las plantas transgénicas, ha impedido que los campesinos en México puedan acceder a esta tecnología, como sí ocurre con los agricultores de Estados Unidos y varios países de Iberoamérica. Lamentablemente, la demanda colectiva en contra de la siembra de maíz ha impedido la siembra, incluyendo a nivel experimental, lo cual impide probar y evaluar las plantas de maíz transgénico que se desarrollan en México. La prohibición ha permanecido hasta el momento, aún a expensas de la presentación de información sobre los amplios beneficios y la ausencia de daño de los cultivos transgénicos ante el juzgado correspondiente. Lo anterior implica que en México se siguen usando insecticidas químicos sintéticos para eliminar las plagas de insectos, en detrimento de la salud de campesinos y de la sociedad en general. En 2013 se dejó de sembrar maíz transgénico en México por supuestos daños de diferentes

tipos, empezando por los daños a la salud que supuestamente causan las plantas transgénicas y el glifosato que se utiliza para eliminar las malezas. Como ya se comentó en extenso en los capítulos IV y VI, muchos de los argumentos y señalamientos sobre los supuestos daños a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad, son parciales, obsoletos o falsos; por ejemplo, siguen sustentando el daño a la salud publicado en el artículo de Séralini y colaboradores, 2012, mismo que fue ampliamente descalificado por el ámbito científico y contraargumentado por instituciones como la EFSA, aunado al hecho de que en 2014 dicho artículo fuera retractado por el editor de la revista en la que se publicó originalmente, señalamientos que se exponen en los capítulos IV y VI.

Como se ha detallado previamente en el capítulo VI, se han otorgado permisos para la siembra de cultivos transgénicos de soya, algodón y otros vegetales, cuyos registros pertenecen también a las compañías transnacionales. Lamentablemente, además de la demanda contra la siembra de maíz en el año 2013, en años posteriores (2014, 2015 y 2016) se han presentado amparos para impedir la siembra de soya transgénica en varios estados del sureste de México. Todas estas acciones están orientadas a impedir o dificultar la siembra y el consumo de cultivos transgénicos en nuestro país. Por ello, resulta fundamental y moralmente obligatorio para contender con la injusticia, insistir en que el uso de plantas transgénicas en Estados Unidos y otros países iberoamericanos, así como el algodón transgénico en México e India, han reducido de manera importante la utilización de insecticidas químicos sintéticos

y han dejado ver los amplios beneficios a la salud, a la economía de los agricultores, a la biodiversidad y al medio ambiente, no sólo por la reducción en el uso de insecticidas químicos sino también indirectamente por la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, como se detalló en los capítulos V y VI. Por lo anterior, resulta también muy lamentable la decisión del Gobierno de Yucatán de buscar convertirse, por decreto, en un estado libre de transgénicos, con las grandes desventajas que esto implica para los agricultores en Yucatán.

Por otro lado, la pérdida de la propiedad comercial de las patentes de semillas transgénicas, hasta ahora propiedad de compañías transnacionales y, por ende, la consecuente oportunidad de un desarrollo nacional apoyado en la biotecnología, abre un nuevo panorama de opciones y decisiones respaldadas por centros de investigación mexicanos que trabajan en el desarrollo de cultivares transgénicos que poseen capacidades extraordinarias para contender con necesidades y problemáticas actuales del país y del planeta. En particular, es importante resaltar las variedades transgénicas de maíz con las que ya se cuenta, que son resistentes al calor y la sequía, desarrollada por Beatriz Xoconostle, y los diferentes vegetales transgénicos capaces de crecer en fosfito en lugar de fosfato como fertilizante, desarrollados por el grupo de Luis Herrera Estrella. Se reitera que algunas de las variedades comerciales de plantas transgénicas de primera generación pertenecientes a compañías transnacionales, en 2016 perdieron sus patentes por lo que próximamente se podrán usar como genéricos. Como se comenta en el capítulo II,

existe la experiencia en el trabajo de producción de genéricos con empresas farmacéuticas mexicanas que fabrican proteínas transgénicas humanas genéricas para el tratamiento de varias enfermedades infecciosas y problemáticas clínicas. Además, en el capítulo VIII se describe un conjunto de estrategias para avanzar hacia la seguridad y la sustentabilidad alimentarias que incluye el uso de genéricos y variedades de plantas transgénicas extraordinarias ya mencionadas, desarrolladas en México para contender con el cambio climático, la contaminación y la degradación del medio ambiente por insecticidas y herbicidas químicos.

Sin embargo, es relevante enfatizar que, más allá del marco jurídico existente, México no ha logrado una política agropecuaria sólida, integral, que contemple adecuada y conjuntamente la seguridad y la suficiencia sustentable alimentaria y la sustentabilidad del medio ambiente. Dicha política debe contemplar éstos y otros asuntos relevantes como la derrama de beneficios para los campesinos, garantizando un uso más justo y equitativo de los recursos a través del conocimiento y la biotecnología en beneficio de la sociedad y la biodiversidad mexicanas, sin perder de vista que, además, la biotecnología y los transgénicos representan una herramienta amigable con la salud, la biota y el medio ambiente. Aunque es importante resaltar, como se señaló en el capítulo VIII, que el Plan Nacional de Desarrollo (PND) y el Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación (PECiTI) de la actual administración, publicados en 2013 y 2014, señalan a la biotecnología como un área estratégica, y apuntan a que los transgénicos deben utilizar-

se de manera responsable para contender con necesidades y requerimientos de la sociedad mexicana, en particular, con la producción de alimentos para, con ello, intentar reducir la pobreza en el campo y las inequidades de la nación. Estos señalamientos son congruentes con la propia LBOGM, la cual dispone establecer instrumentos de fomento a la investigación científica y tecnológica en bioseguridad y biotecnología. Se subraya también que la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) contempla a la biotecnología como “una tecnología que utiliza recursos biológicos, organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos”. Por lo anterior, esta ley prevé el uso de la biotecnología y, por ende, de los organismos transgénicos para aprovechar responsablemente la biota. Lo anterior debería alcanzarse mediante un esfuerzo de articulación y coordinación con la LBOGM. Bajo este propósito de una política de estado para el campo, resulta también importante señalar la lamentable decisión tomada por el gobierno en 1991 de liquidar a la empresa Productora Nacional de Semillas (Pronase), organismo descentralizado de la Sagarpa. Asimismo, resulta importante destacar que el sistema mexicano de investigación agropecuaria ha estado desarticulado, a diferencia de sistemas mejor integrados en otros países, como la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos o el Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Francia, pues es limitada la coordinación entre investigación básica de tipo molecular, como la desarrollada

en diferentes sedes del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav), y la aplicada de tipo agrícola. Es importante, entonces, redoblar esfuerzos para avanzar en una mejor coordinación y un mejor aprovechamiento de las capacidades y riquezas nacionales, incluyendo la aceptación y utilización de plantas transgénicas en México para así realmente tener la oportunidad de contender con grandes problemas y demandas globales y nacionales, presentes y futuras.

Para realmente avanzar hacia una política de estado para el campo, adecuada e incluyente, además de aceptar y reconocer lo señalado anteriormente, resulta estratégico enfatizar y dar a conocer a los diferentes sectores de la opinión pública y la sociedad, los amplios beneficios de los cultivos transgénicos, buscando una respuesta en la propia sociedad mexicana para el uso de los transgénicos, combatiendo la ignorancia y la falta de visión política de algunos gobernantes. En los países que cultivan plantas transgénicas, la aceptación de la biotecnología ha ocurrido, en alguna medida, dando a conocer los amplios beneficios a la salud, a la economía y al medio ambiente, beneficios percibidos directamente por muchos agricultores que están adoptando dicha tecnología. La sociedad mexicana debe conocer en detalle las ventajas de los cultivares transgénicos y sus productos, para así demandar su uso, en beneficio del campo mexicano y de los mexicanos. Y se insiste aquí en lo señalado por los 123 premios Nobel en su declaración del año 2016, que las plantas transgénicas usadas en el campo representan una tecnología perfeccionada, también llamada “agricultura de precisión”,

superior a las anteriores, más avanzada por lo preciso, y con grandes beneficios para el agricultor y el medio ambiente. Congruente con lo aquí planteado, varias academias de ciencias y de medicina del planeta, en múltiples países, ponen a disposición de la sociedad los documentos y escritos sobre el tema, desde hace más de 15 años. El Comité de Biotecnología de la AMC no es la excepción por lo que mucho de este material se encuentra en las páginas electrónicas de la AMC y en algunas de las instituciones de educación superior y de investigación científica donde laboran los integrantes de dicho comité.

Lamentablemente, como ya se señaló en el capítulo VI, las demandas y los amparos en México han disminuido el uso de estas tecnologías en el campo, mientras las importaciones de alimentos transgénicos se incrementan porque aquí no se produce suficiente. No obstante, a nivel nacional se continúa haciendo investigación en materia de biotecnología y cultivos transgénicos para paliar y atender necesidades del campo, conforme a lo comentado en el capítulo VIII.

Diferentes grupos antagónicos consideran que el maíz transgénico no debe sembrarse en México por ser nuestro país centro de origen y de diversificación de esta planta, lo cual hace muy difícil la aceptación del señalamiento en este libro respecto a que los maíces transgénicos no dañarán ni a las variedades nativas ni a los cultivos convencionales que hoy se utilizan. Se insiste, una vez más, en la ausencia de daño por la coexistencia entre maíces transgénicos y convencionales ya que el flujo génico mediado por el polen, como fue ampliamente comentado y sustentado en el capítulo VI, no implica

daño ni contaminación. El planeta y el país pierden una gran oportunidad si no se rebate y discute el señalamiento, casi dogma, de que el polen transgénico va a causar daño a las variedades convencionales o nativas por la posible incorporación de transgenes en estas plantas.

Habrà que echar mano de todos los conocimientos y las experiencias de los campesinos y agricultores mexicanos, y en la extraordinaria riqueza de la biodiversidad mexicana, para ir avanzando hacia un acuerdo para contender con las grandes demandas y los problemas regionales, nacionales y globales, donde la biotecnología moderna y los cultivares transgénicos deberían desempeñar un papel fundamental en beneficio de los campesinos mexicanos y de la sustentabilidad del medio ambiente y la biodiversidad.

No es la posición ni la recomendación en este documento propiciar la sustitución de las variedades y los cultivos nativos, de los cuales México es centro de origen, por cultivos transgénicos únicamente, es decir, la homogenización del campo; la idea es más bien sumar experiencias, conocimientos, incluyendo los desarrollos de cultivos transgénicos nacionales, y el valor de la biodiversidad mexicana para contender de manera inteligente y eficiente con las demandas y los problemas extraordinarios que estamos enfrentando y que en el mediano plazo se agravarán.

CDB, 1993; SCSDB-Protocolo de Cartagena, 2000; Arias y Muñoz, 2002; Bolívar et al., 2002; Bolívar et al., 2003; Ibarra et al., 2003; Herrera Estrella et al., 2002; Herrera Estrella y Martínez, 2003; Ortiz y Ezcurra, 2003; LBOGM, 2005; Singh et al., 2006;



Figura X.5. Maíz transgénico que se importa a México para consumo principalmente animal pero también humano.

OCDE, 2006; Trigo y Capp, 2006; Barrera, 2007; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; RLBOGM, 2008; Cibogem, 2008; PKL, 2008; Band et al., 2011; Bolívar et al., 2011; SCSDB-Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur, 2011; Agreda Laguna et al., 2012; LGEEPA, 2012; EFSA, 2012; Álvarez Buylla y Piñeyro, 2013; Koultros et al., 2013; López Arredondo y Herrera Estrella, 2013; Solleiro y Castañón, 2013; PND Gobierno de la República, 2013–2018; Brookes y Barfoot, 2014; Burgeff et al., 2014; Clive, 2014; Jones et al., 2014; Klümper y Qaim, 2014; NOM, 2014; PECITI Gobierno de la República, 2014–2018; Cibogem, 2015; Panorama Agroalimentario Maíz, 2015; Decreto 418/2016 del estado de Yucatán, 2016; EFSA, 2016; NASEM, 2016: www.nap.edu/23395, DOI:10.17226/23395; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html; Xoconostle, 2017

RECOMENDACIONES Y CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA EL USO Y LA APLICACIÓN RESPONSABLE DE LOS ORGANISMOS TRANSGÉNICOS

A continuación se presentan recomendaciones adicionales al marco jurídico para el uso responsable de los organismos transgénicos, ya tratadas la mayoría con más detalle en capítulos anteriores. Se presentan también consideraciones sobre los transgénicos de siguientes generaciones.

- Existe un consenso internacional sobre la necesidad de seguir evaluando y de dar seguimiento, caso por caso y con base en el amplio conocimiento científico existente, a los nuevos organismos transgénicos que se deseen utilizar y, en particular, a aquellos que se pretende liberar al medio ambiente. Para ello, se deberán utilizar las ciencias ómicas que permiten una

caracterización muy detallada y fina a nivel molecular de los nuevos organismos. Este tipo de caracterización ha permitido comprobar que las plantas transgénicas son muy similares a las convencionales.

Es importante insistir en que las técnicas finas de edición del ADN, tipo CRISPR-Cas9, y la biología sintética, serán responsables de la construcción de los organismos transgénicos de tercera y cuarta generaciones, en los cuales los nuevos transgenes se integrarán por transferencia horizontal de ADN en sitios específicos del genoma del organismo receptor, previamente seleccionados. Es importante señalar que en Estados Unidos ya se tienen ejemplos en el campo de vegetales desarrollados por estas técnicas CRISPR-Cas9. En dichos organismos se han eliminado genes, lo cual le da a la planta portadora ciertas ventajas y, dado que los genes solamente han sido eliminados, la FDA no considera a estos productos como organismos genéticamente modificados (estrictamente OGM o transgénicos, porque no llevan material genético de otro origen, aunque son organismos genéticamente mejorados). Además, se tendrán transgénicos en los cuales se integrarán más de dos genes, como ahora se tiene con las plantas transgénicas de primera y segunda generación. El ejemplo ya mencionado es el arroz transgénico, llamado arroz dorado, que tiene dos genes adicionales que le permiten producir el precursor de la vitamina A que se requiere para contener con problemas de ceguera. Este tipo de arroz, como ya se ha comentado, fue defendido en la declaración de los 123 premios Nobel.

Ya se mencionó que en México hemos desarrollado cultivos transgénicos de tercera

generación de gran valor, capaces de crecer en fosfita como fertilizante, y una variedad que es resistente a la sequía y el calor. Estas capacidades podrían usarse para conferir, vía transferencia horizontal de ADN o por otros métodos, a plantas nativas protección ante el inminente cambio climático y ante problemas de contaminación del campo y herbicidas, como el glifosato, que además se ha convertido en una problemática mayor por el incremento de resistencia a este herbicida en muchas malezas.

Asimismo, contaremos con nuevos organismos en los cuales se incorporen varios genes sintetizados, algunos por química orgánica, como el ejemplo original de las bacterias que produjeron insulina humana de origen transgénico por primera vez en 1979. Habrá también organismos transgénicos que lleven varios genes de diferentes orígenes, algunos de origen químico cuyo propósito sea producir metabolitos celulares u otros productos de interés comercial por su impacto en varios sectores. Mediante este tipo de estrategia se construirán células que puedan redirigir por ingeniería metabólica parte de esta capacidad hacia la síntesis de los metabolitos o productos de interés.

Tomando en cuenta este escenario que ya está ocurriendo en muchos países, es indispensable realizar un análisis a nivel nacional, en el que se considere amplia y detalladamente la comparación de los beneficios y posibles riesgos derivados del uso de un determinado OGM, así como los riesgos de no emplearlos, si se mantienen los esquemas actuales de producción y de degradación, considerando realmente los graves problemas y las demandas nacionales y globales a los que nos enfrentamos,

mismos que difícilmente podrán ser atendidos sin la participación inteligente y responsable de los organismos transgénicos, en particular, de los cultivares. De hecho, a lo largo de los varios capítulos de este libro, en particular los capítulos IV, V y VI, se señala que los organismos transgénicos que han sido detalladamente caracterizados, son responsables de amplios beneficios, incluyendo la ausencia de daño a la salud y al medio ambiente por parte de los cultivares transgénicos usados actualmente en el mercado. Por su parte, en el capítulo VI también se enlistan, analizan y contestan los cuestionamientos hechos en torno a las plantas transgénicas. Es importante presentar las nuevas alternativas de los organismos transgénicos y las plantas mejoradas genéticamente, vía CRISPR-Cas9, de tercera y cuarta generación para contender con las problemáticas del cambio climático y de la contaminación del campo por herbicidas.

Itakura et al., 1977; Goeddel et al., 1979; NRC, 1989; Hails, 2000; Ye et al., 2000; Potrykus, 2001; NRC, 2002a; NRC, 2002b; NRC, 2004; Ibarra et al., 2003; Herrera Estrella y Martínez, 2003; Ortiz y Ezcurra, 2003; Kapuscinski et al., 2003; AEBC, 2005; Zhang et al., 2004; LBOGM, 2005; Singh et al., 2006; OCDE, 2006; Trigo y Capp, 2006; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Byun et al., 2008; CibioGem, 2008; European Commission, 2010; NASEM, 2010; Gibson et al., 2010; Gilbert, 2010; Bolívar et al., 2011; AAAS, 2012; Agreda Laguna et al., 2012; EFSA, 2012a; EFSA, 2012b; AgBioWorld Declaration in Support of Agricultural Biotechnology, 2012: <http://www.agbioworld.org/declaration>; Jinek et al., 2012; Zhe-

xiang et al., 2012; Cong et al., 2013; De Souza, 2013; Jinek et al., 2013; López Arredondo y Herrera Estrella, 2013; Mali et al., 2013; Qi L.S. et al., 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Koutros et al., 2013; EASAC, 2013; FDA, 2013; Riccroch, 2013; Brookes y Barfoot, 2014; Clive, 2014; Fuentes et al., 2014; Gilbert et al., 2014; Klümper y Qaim, 2014; Riccroch et al., 2014; CibioGem, 2015; Crisp et al., 2015; Kleininstiver et al., 2015; Kyndt et al., 2015; Maxmen, 2015; Nihongaki et al., 2015; OCDE, 2015; Waltz, 2015a; Waltz, 2015b; Waltz, 2016; Hutchinson III et al., 2016; Ledford, 2016; NASEM, 2016, DOI: 10.17226/23395, The Royal Society, 2016: Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html

Como se ha señalado en este documento, existe la legislación para hacer uso responsable de los organismos transgénicos. En la sección anterior se mencionaron algunos de los nuevos organismos transgénicos de siguientes generaciones que serán desarrollados mediante las nuevas técnicas de edición fina del genoma (biología sintética y CRISPR-Cas9). Habrá que estar atentos a las diferentes iniciativas de ley que se presenten para regular a los organismos desarrollados por estas nuevas tecnologías. En principio, los nuevos OGM que lleven material genético de otro origen, diseñados y construidos por estas nuevas técnicas, son de facto organismos transgénicos que llevan genes de otros organismos, incluyendo aquellos sintetizados químicamente que han sido previamente usados y ampliamente evaluados. Es fundamental tomar en cuenta la amplia información existente, incluyendo el marco jurídico y los

acuerdos internacionales sobre los organismos transgénicos, para no retrasar sino aprovechar rápidamente el uso de estas nuevas, poderosas y más precisas tecnologías. Finalmente, como ya se señaló, la biología sintética y los organismos transgénicos inician con el uso de ADN sintetizado por química orgánica, y el primer ejemplo de aplicación de uso práctico fue, como se señaló en el capítulo II, el diseño y desarrollo de bacterias transgénicas que codifican para la hormona insulina idéntica a la humana, mismas que llevan genes sintéticos para ello.

Itakura et al., 1977; Goeddel et al., 1979; NRC, 1989; CDB, 1993; SCSDB-Protocolo de Cartagena, 2000; Ye et al., 2000; Potrykus, 2001; Ibarra et al., 2003; NRC, 2002a; NRC, 2002b; Flannery et al., 2004; NRC, 2004; LBOGM, 2005; Trigo y Capp, 2006; Bolívar et al., 2007; Byun et al., 2008; Kuzma, 2008; PKL, 2008; RLBOGM, 2008; Kanter, 2009; Tang et al., 2009; European Commission, 2010; Kanter, 2010; NASEM, 2010; Bolívar et al., 2011; SCSDB-Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur, 2011; AAAS, 2012; AgBioWorld Declaration in Support of Agricultural Biotechnology, 2012: <http://www.agbioworld.org/declaration>; EFSA, 2012; Jinek et al., 2012; LGEEPA, 2012; Zhenxiang et al., 2012; Cong et al., 2013; De Souza, 2013; EASAC, 2013; FDA, 2013; Jinek et al., 2013; Kusma, 2013; López Arredondo y Herrera Estrella, 2013; Mali et al., 2013; PND Gobierno de la República, 2013–2018; Riccroch, 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Brookes y Barfoot, 2014; Clive, 2014; Gilbert et al., 2014; NOM, 2014; PECITI Gobierno de la República, 2014–2018; Riccroch et al., 2014; CibioGem, 2015; European Commission, 2015a; European Commission, 2015b; FDA, 2015; OCDE, 2015; Waltz, 2015a; Waltz,

2015b; Waltz, 2015c; EFSA, 2016; NASEM, 2016, DOI: 10.17226/23395; The Royal Society, 2016; The Economist, 2016; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html

Con base en amplia y contundente evidencia científica de cerca de 2,000 referencias bibliográficas en varios metaanálisis, presentada en los capítulos IV y V, se puede afirmar que los OGM, y en particular los cultivares transgénicos que se utilizan en la actualidad como alimento, no han generado daño a la salud humana ni a la animal por su consumo, siendo éstos los organismos transgénicos mejor estudiados y caracterizados. No obstante, es importante subrayar que se deben seguir realizando las pruebas aceptadas para mostrar la inocuidad alimentaria de nuevos productos que se pretendan incorporar al mercado.

Como se señaló, existe una publicación de Séralini y colaboradores del año 2016 en la que señalan que existen diferencias metabólicas importantes entre un cultivo de maíz transgénico y los maíces convencionales. Sin embargo, como ya se comentó, no hay sustento en estos señalamientos y la contestación detallada se puede encontrar en el capítulo VI de esta obra. Es importante reiterar que, como se detalló en los capítulos IV y VI, donde se presentan las consideraciones y publicaciones adversas a los transgénicos, existen y seguirán apareciendo publicaciones en diferentes medios, incluyendo revistas científicas, con señalamientos en contra de los organismos transgénicos, en las que se indican supuestos daños en algunos animales tras haber consumido ciertos cultivares

transgénico. De hecho, como ya se señaló, el pronunciamiento de la EFSA sobre el trabajo de Séralini y colaboradores, 2012, descalifica contundentemente este trabajo. Se señalan también los trabajos de la Dra. Ricoch y colaboradores de los años 2013 y 2014, donde se reportan las decenas de trabajos en los que se alimentan animales con plantas transgénicas y cultivadas muchas de ellas con glifosato para eliminar malezas, pero en condiciones técnicas adecuadas, sin reportar daños a la salud (ver figuras IV.1, IV. 2 y IV. 3 y capítulo VI).

De lo anterior se desprende una observación relacionada con la publicación de conocimiento científico: resulta fundamental que el conocimiento científico que se publique, sobre todo en revistas científicas, esté bien sustentado. Debe quedar claro que las evidencias de supuestos daños a la salud, al medio ambiente y la biodiversidad por el uso de los cultivos transgénicos que han sido publicadas en múltiples medios, incluyendo libros, periódicos, algunas revistas científicas (como las mencionadas en el capítulo VI) o en internet, carecen de todo sustento científico y, por ende, resultan notas irresponsables. En este sentido, es fundamental que cualquier evidencia publicada que señale posibles efectos por el uso de alimentos transgénicos o sus productos, como las de Séralini y su grupo, puedan ser obtenidas de manera independiente por otros grupos de investigación para corroborar los resultados, lo cual no ha ocurrido en este caso. Para el caso de las plantas transgénicas, la réplica de experimentos se ha realizado por distintos grupos de investigación, sin encontrar evidencia de daños a la salud de los animales utilizados y alimentados. Lamen-

tablemente, existen varios casos de artículos publicados en revistas de circulación internacional que supuestamente cuentan con evaluación de expertos, pero que finalmente son retirados o retractados por falsos o incompletos, o por carecer de los controles y las condiciones adecuadas, como ocurrió con las publicaciones de Séralini y su grupo (2012). Existen también artículos publicados cuyos resultados no pueden ser reproducidos de manera independiente, lo cual descalifica lo publicado. Se debe realizar un esfuerzo importante, como comunidad académica y científica, para reducir los casos no evaluados adecuadamente, que muchas veces se publican en libros y revistas.

NRC, 1989; Arias y Muñoz, 2002; NRC, 2002a; NRC, 2002b; Herrera Estrella et al., 2002 y 2003; ICSU, 2003; Schiemann, 2003; APBN, 2004; NRC, 2004; Sinagawa García et al., 2004; INIA, 2006; OMS, 2006; Trigo y Capp, 2006; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Ramírez y Uribe, 2007; Kuzma, 2008; Ayala Rodríguez et al., 2009; Kanter, 2010; Tang et al., 2009; European Commission, 2010; NASEM, 2010; Codex Alimentarius, 2009; Bio, 2011; Bolívar et al., 2011; AAAS, 2012; AgBioWorld Declaration in Support of Agricultural Biotechnology, 2012: <http://www.agbioworld.org/declaration>; EFSA, 2012; Séralini et al., 2012; Álvarez Buylla y Piñeyro (Coords.), 2013; EASAC, 2013; FDA, 2013; Herman y Price, 2013; Ricoch, 2013; Solleiro y Castañón, 2013; Brookes y Barfoot, 2014; Clive, 2014; Nicolía et al., 2014; Séralini, 2014a; Séralini et al., 2014b; Ricoch et al., 2014; Van Eeneemaam y Young, 2014; European Commission, 2015a; European Commission, 2015b; FDA, 2015; OCDE, 2015; EFSA, 2016; NASEM,

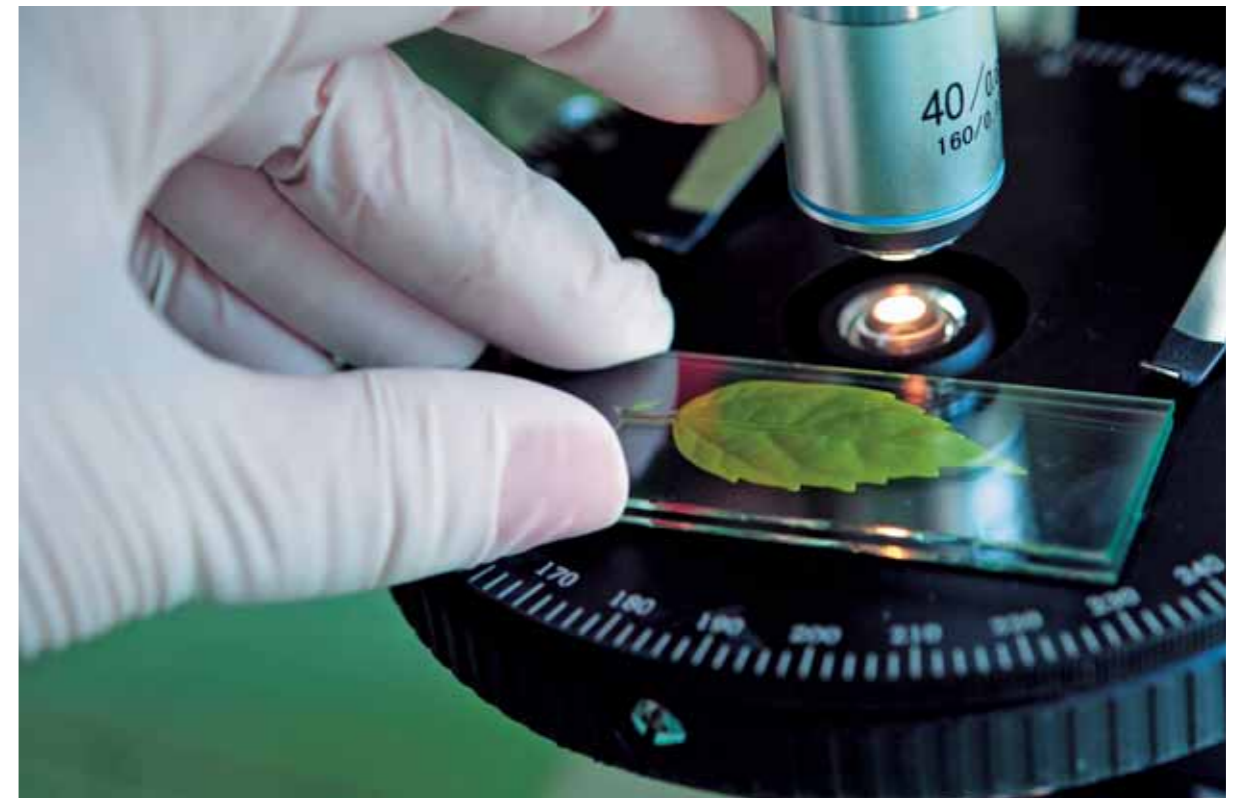


Figura X.6. El análisis y la caracterización de los cultivos transgénicos está estipulado en la LBOGM y en la Ley General de Salud para evaluar el posible riesgo de estos alimentos.

2016, DOI:10.17226/23395; Mesnage, Séralini et al., 2016; Panchin y Tuzhikov, 2016; The Royal Society, 2016; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html

- Con el ánimo de responder los cuestionamientos en contra de los transgénicos, se insiste en que son varios los estudios sociales y económicos, de carácter multidisciplinario, que se han realizado en torno al uso y los beneficios de esta tecnología, en particular en Estados Unidos y en nueve países iberoamericanos, incluyendo México. Existe amplia información científica y técnica que indica los varios tipos

de beneficios, incluyendo el económico y el social, además de aquellos vinculados a la salud, por el uso de los cultivos transgénicos y sus productos. Esta Información fue ya presentada a detalle en varios capítulos de esta obra, en particular en los capítulos V y VI, en donde se recuerdan algunas cifras importantes: se ha reportado una ganancia económica de más de 18.8 mil millones de dólares en el año 2015. Durante 17 años, la aplicación comercial de esta tecnología generó un monto de 116.6 mil millones de dólares por el uso de organismos transgénicos en la agricultura. De éstos, el 50% correspondió a una reducción en los costos de producción y, en especial, en el uso de insect-

ticidas químicos, lo cual es el propósito de las plantas transgénicas de primera generación. Esta tecnología ha reducido en 37% el uso de pesticidas químicos, muchos de los cuales son carcinogénicos, y ha sido responsable de incrementar 22% la productividad de las cosechas y las ganancias de los agricultores en 68%. Se ha señalado ya que los cultivos transgénicos y sus productos han sido utilizados por más de 400 millones de personas en 58 países. También, como se ha subrayado, esta tecnología es responsable de la reducción de los insecticidas químicos que contaminan el medio ambiente y algunos causan daños a la salud.

Con base en este amplio conjunto de beneficios contundentes de los cultivos transgénicos y sus productos en diferentes sectores del planeta, en México resulta fundamental contar con una política agropecuaria que contemple estos beneficios y su derrama de manera integral para garantizar una utilización más justa y equitativa de dicha tecnología en beneficio de la nación —sociedad, agricultores, biota y medio ambiente. Se reitera que en México existen grupos que han desarrollado plantas transgénicas de tercera generación, con extraordinarias características que podrían utilizarse en beneficio del país y del planeta; asimismo, algunas de las patentes comerciales de las plantas transgénicas de primera generación que confieren resistencia a plagas de insectos, han perdido su propiedad, lo que representa una gran oportunidad.

Todo lo anterior, como ya se indicó, permite visualizar un cambio importante en las estrategias de países en vías de desarrollo, como México, para producir alimentos y medica-

mentos genéricos de una manera más adecuada, sustentable y económicamente atractiva. También se señaló que para lograr lo anterior, la importancia que tiene seguir fortaleciendo la investigación científica, tecnológica y la innovación en lo general, así como la atención a los problemas nacionales. Como parte de esta estrategia, resulta indispensable fortalecer la formación de recursos humanos de manera interdisciplinaria en el área de la biotecnología (ver figura X.7). Esta estrategia se puede potenciar si se aprovechan las nuevas variedades transgénicas, incluyendo las genéricas que aparezcan en otros países y las nuevas plantas transgénicas de tercera generación que ya existen en el mercado, como el arroz transgénico que produce el precursor de la vitamina A, y algunos otros de los organismos transgénicos, mencionados al principio de esta sección.

Por otro lado, es indudable que existen diferencias de opinión respecto a la pertinencia de liberar variedades de cultivos transgénicos, en particular en México por ser centro de origen del maíz. En el capítulo VI se señalaron los cuestionamientos por supuestos daños y las respuestas a estos cuestionamientos, muchos de ellos sin sustento científico sólido. Sin embargo, la propuesta es que conforme a la LBOGM se definan las zonas donde el maíz transgénico no pueda ser sembrado por ser un sitio de origen de diversidad biológica, pero que se permita su siembra en algunas otras áreas que no lo sean, primariamente en el norte del país. Lo anterior permitiría adquirir experiencias importantes sobre la siembra de maíz transgénico, que se sumarían a las existentes con el algodón y la soya transgénicos en nuestro país, y a las exis-

tentes en nueve países iberoamericanos por la siembra de estos cultivos.

Goeddel et al., 1979; Moses y Cape, 1991; CDB, 1993; Ye et al., 2000; NRC, 2000; SCADB-Protocolo de Cartagena, 2000; Potrykus, 2001; NRC, 2002a; Gil y Martínez, 2003; Ibarra et al., 2003; Acieman, 2003; Ortiz y Ezcurra, 2003; Flannery et al., 2004; NRC, 2004; Sinagawa García et al., 2004; Zhang et al., 2004; LBOGM, 2005; INIA, 2006; OCDE, 2006; Why silence is not an option, 2006; Trigo y Capp, 2006; Bolívar et al., 2007; Constable et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Ramírez y Uribe, 2007; Byun et al., 2008; Kuzma, 2008; PKL, 2008; RLBOGM, 2008; Ayala Rodríguez et al., 2009; Kanter, 2009; Tang et al., 2009; European Com-

mission, 2010; Gilbert et al., 2010; NASEM, 2010; Kanter, 2010; Band et al., 2011; Bio, 2011; Bolívar et al., 2011; Mallory-Smith y Sánchez, 2011; SCADB-Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur, 2011; AAAS, 2012; AgBioWorld Declaration in Support of Agricultural Biotechnology, 2012: <http://www.agbioworld.org/declaration>; Agreda Laguna et al., 2012; EFSA, 2012; LGEEPA, 2012; Álvarez Buylla y Piñeyro (Coords.), 2013; EASAC, 2013; FDA, 2013; Koutros et al., 2013; López Arredondo y Herrera Estrella, 2013; PND Gobierno de la República, 2013–2018; Solleiro y Castañón, 2013; Alavanja et al., 2014; Brookes y Barfoot, 2014; Burgeff et al., 2014; Clive, 2014; Jones et al., 2014; Klümper y Qaim, 2014; NOM, 2014; PECITI Gobierno de la República, 2014–2018; Blanco et al., 2014; Cibiogem, 2015;



Figura X.7. La formación de recursos humanos es estratégica para propiciar el desarrollo de la ciencia y la biotecnología.



Figura X.8. Cultivar transgénico de arroz dorado.

European Commission, 2015a; European Commission, 2015b; FDA, 2015; OCDE, 2015; EFSA, 2016; NASEM, 2016, DOI:10.17226/23395; The Royal Society, 2016; The Economist, 2016; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laura-te-gmo-letter_rjr.html; Xoconostle, 2017

- Es esencial contar con una sociedad y una opinión pública bien informada para que los gobernantes y los miembros de la sociedad puedan tomar las mejores decisiones con base en el conocimiento científico y no en la información de internet, mucha sin sustento científico. Resulta fundamental avanzar hacia una sociedad del conocimiento, especialmente del conocimiento científico, en la cual la cien-

cia y la tecnología tengan mayor presencia, jerarquía y reconocimiento. El objetivo es que las decisiones que se tomen estén sustentadas primariamente, en el conocimiento científico.

Se requiere que los jueces, legisladores y servidores públicos responsables de las áreas administrativas de las diferentes secretarías de estado, cuenten con información actualizada y sustentada científicamente sobre los transgénicos y sus amplios beneficios en diferentes sectores. También, se recomienda que los servidores públicos cuenten con la asesoría de personal técnico y científico calificado para tomar decisiones con base en sustento científico y en información existente. Es lamentable y reprochable que en esta materia se tomen decisiones basadas en supuestos daños o efectos nocivos a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad, sin evidencia científica, como ha ocurrido con la demanda colectiva en contra de la siembra de maíz transgénico y con los amparos contra la soya. Es necesario que las decisiones para otorgar amparos en contra de los cultivos transgénicos y las posibles modificaciones al marco jurídico, se hagan con base en evidencia científica, tomando en cuenta los amplios beneficios y no las presiones de grupos populistas y activistas que se valen de argumentos parciales, obsoletos y, muchos de ellos, falsos.

Resulta indispensable también que las entidades gubernamentales responsables de la definición de las políticas para la aprobación y la liberación de los organismos transgénicos, dispongan de los elementos y la información adecuados para la emisión de las normas correspondientes que definan y apliquen los

procedimientos administrativos para el uso de OGM, de conformidad con la legislación nacional y los acuerdos internacionales. Es importante recordar que existe la LBOGM, el PND y el PECITI de la administración 2012–2018, que señalan a la biotecnología como área prioritaria y mencionan a los organismos transgénicos como herramienta que deben utilizarse para coadyuvar a la producción de medicamentos y alimentos.

En este sentido, es necesario organizar la participación concertada de los sectores social, académico, industrial y gubernamental para la integración de grupos multidisciplinarios, apoyándose en la información presentada en este libro y otros, así como en el Comité de Biotecnología de la AMC, para que cuenten con las herramientas necesarias para asesorar a los jueces en las demandas presentadas y a los legisladores en la evaluación de posibles iniciativas que pretendan hacer más restrictiva la LBOGM y su reglamento, sin considerar la amplia y contundente información científica sobre los beneficios y la ausencia de daño de los transgénicos. También, invitamos a los servidores públicos que laboran en la Cofepris, en la CibioGem y las secretarías de estado involucradas en la evaluación del riesgo biológico, a que cuenten con los elementos adecuados para este propósito, entre ellos, los grandes avances registrados y las experiencias de múltiples usuarios.

Es indispensable presentar adecuadamente la amplia y contundente información científica que se incluye, sistematiza y sustenta en cientos de referencias científicas sólidas y en reportes de otras academias de ciencias, como el del Conse-

jo Nacional de Investigación de Estados Unidos (NASEM, 2016), o en el presente libro, elaborado por 17 expertos mexicanos. Es importante reiterar que muchos de los reportes y documentos sobre plantas y organismos transgénicos señalados en este libro se encuentran disponibles en versiones electrónicas, la mayoría de libre acceso, como el libro sobre el uso responsable de los OGM que sirvió de base para la presente publicación (en español y en inglés) y otros relacionados con biotecnología (disponibles en la página electrónica de la AMC y de algunas otras instituciones como el Instituto de Biotecnología de la UNAM y el Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad (Langebio) del Cinvestav-Irapuato). Las nuevas ediciones también estarán disponibles en ambas versiones.

NRC, 1989; CDB, 1993; SCADB-Protocolo de Cartagena, 2000; Potrykus, 2001; NRC, 2002a; NRC, 2002b; ICSU, 2003; Purohit, 2003; Schiemann, 2003; AEBC, 2004; APBN, 2004; Flannery et al., 2004; NRC, 2004; LBOGM, 2005; OCDE, 2006; OMS, 2006; Codex Alimentarius, 2006; Trigo y Capp, 2006; Singh et al., 2006; Why silence is not an option, 2006; Barrera, 2007; Bolívar et al., 2007; Herrera Estrella y Martínez, 2007; Kuzma, 2008; PKL, 2008; RLBOGM, 2008; Codex Alimentarius, 2009; Kanter 2009; Tang et al., 2009; European Commission, 2010; Kanter, 2010; NASEM, 2010; Band et al., 2011; Bio, 2011; Bolívar et al., 2011; SCADB-Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur, 2011; AAAS, 2012; AgBioWorld Declaration in Support of Agricultural Biotechnology, 2012: <http://www.agbioworld.org/declaration>; EFSA, 2012; LGEEPA, 2012; Álvarez Buylla y Piñeyro (Coords.), 2013; EASAC, 2013; FDA, 2013; López Arredondo y He-

rrera Estrella, 2013; Koutros et al., 2013; PND Gobierno de la República, 2013–2018; Solleiro y Castañón, 2013; Brookes y Barfoot, 2014; Burgeff et al., 2014; Clive, 2014; Jones et al., 2014; Klümper y Qaim, 2014; PECITI Gobierno de la República, 2014–2018; Cibogem, 2015; European Commission, 2015a; European Commission, 2015b; FDA, 2015; Huang y Peng, 2015; OECD, 2015; Bao-Rong, 2016; EFSA, 2016; Han et al., 2016; NASEM, 2016, DOI: 10.17226/23395, Reporte Técnico Fundación Antama, 2016; The Royal Society, 2016; Tagliabue, 2016; The Economist, 2016; Laureates Letter Supporting Precision Agriculture, 2016: http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html; Xoconostle, 2017

USOS ILEGALES Y CUESTIONABLES DE CIERTOS OGM

La LBOGM señala explícitamente que ningún organismo transgénico podrá ser utilizado como arma biológica. Es posible construir OGM que pudieran tener impactos negativos en la salud humana, animal y vegetal, pero su construcción sería ilegal e inmoral. Estos organismos transgénicos no pueden ni deben siquiera construirse. Ejemplos de este tipo pudieran ser bacterias que normalmente viven en el intestino del humano a las que se incorporaran genes productores de toxinas que afectan la salud,

como las del botulismo o el cólera. En lo referente a las plantas, un ejemplo podría ser la utilización de genes terminadores que impidan la germinación de las siguientes generaciones de semillas, dando a estos genes la capacidad de transmitirse de manera horizontal a otras plantas y generar problemas y daños graves.

Existe consenso en la comunidad científica nacional sobre el hecho de que las plantas comestibles, y específicamente el maíz, no deben modificarse genéticamente para que produzcan sustancias de interés industrial, tales como plásticos, aunque fuesen de naturaleza biodegradable. En particular, el uso de cultivares alimenticios para la producción de compuestos farmacéuticos (vacunas, hormonas proteicas, anticuerpos) debe ser analizado casuística y exhaustivamente, porque la posible ingesta de estas plantas, capaces de producir medicamentos, pudieran asimismo tener efectos secundarios no previsibles, relacionados con la dosis del medicamento consumido.

En principio, podrían utilizarse plantas como tabaco y algodón para la producción de ciertos medicamentos y compuestos que hoy se producen vía industria química para reducir la contaminación y el posible daño por la ingesta, dado que estos vegetales no son plantas comestibles.



Figura X.9. Los cultivares transgénicos se utilizan cada vez con mayor frecuencia en el mundo ya que son amplios los beneficios que ofrecen al medio ambiente donde se cultivan y a los agricultores que los siembran.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AAAS (American Association for the Advancement of Science). 2012. Statement by the Board of Directors of the AAAS on labelling of genetically modified foods, USA (Pronunciamiento del Consejo Directivo de la AAAS sobre el etiquetado de alimentos genéticamente modificados). www.aaas.org/aaas_GM_statement.pdf
2. AEBC (Agriculture and Environment Biotechnology Commission). 2005. What shapes the research agenda in agricultural biotechnology? Plant breeding case study URN 05/1084.
3. AgBioWorld Declaration in Support of Agricultural Biotechnology. 2012. <http://agbioworld.org/declaration/index.html>
4. Agreda Laguna K.A. et al. 2012. Methods to obtain drought resistant plants. Patente WO 2012085806 A1. Desarrollada por B. Xoconostle y colaboradores.

5. Alavanja M.C.R. *et al.* 2014. Non-Hodgkin lymphoma risk and insecticide, fungicide and fumigant use in the agricultural health study. *Plos One* 9(10): e109332.
6. Álvarez Buylla E.R., Piñeyro N.A. 2013. El maíz en peligro ante los transgénicos Un análisis integral en el caso de México. Centro de Investigación Interdisciplinaria UNAM-UCCS (Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad) y Universidad Veracruzana. México. 568.
7. APBN (Asian Pacific Biotech News). 2004. Green Light for GM Cotton Australia. *Asia Pacific Biotech News* 8(20): 1125. http://www.asiabiotech.com/publication/apbn/08/english/preserved-docs/0820/1125_1129.pdf
8. Arias C., Muñoz O. 2002. La biotecnología en el sector salud. En: Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.), Fondo de Cultura Económica y Conacyt, pp. 171–183.
9. Ayala Rodríguez A.E. *et al.* 2009. Nixtamalized flour and tortillas from transgenic maize (*Zea mays L.*), expressing amarantin: Technological and nutritional properties. *Food Chemistry* 114: 50–56.
10. Band P.R. *et al.* 2011. Prostate cancer risk and exposure to pesticides in British Columbia farmers. *Prostate* 71(2): 168–183.
11. Bao-Rong L. *et al.* 2016. Challenges of transgenic crops commercialization in China. *Nature Plants* 2(16077). DOI: 10.1038/NPLANTS.2016.77
12. Barrera H. 2007. Manipulación genética de animales. Transgénesis y clonación. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 2ª edición, pp. 131–165.
13. Bio. 2011. Biotechnology Industry Organization. History of Biotechnology.
14. Blanco C.A *et al.* 2014. Maize pests in Mexico and challenges for the adaptation of integrated pest management program. *Journal of Integrated Pest Management*. 5(4): E1-E6. <https://doi.org/10.1603/IPM14006>
15. Bolívar F. 2007. Ciencia genómica, proteómica y bioinformática. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, 2ª edición, pp. 85–116.
16. Bolívar F. *et al.* 2002. Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), Fondo de Cultura Económica y Conacyt, Ciudad de México.
17. Bolívar F. *et al.* 2003. Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 1: Genómica, proteómica y bioinformática, Módulo 3: Biotecnología agrícola, Módulo 7: Ingeniería celular, biodiversidad e industria. El Colegio Nacional, Ciudad de México.
18. Bolívar F. *et al.* 2007. Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord. y Ed.), El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 2ª edición.
19. Bolívar F. *et al.* 2011. Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados. Comité de Biotecnología. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.), Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México.
20. Brookes G., Barfoot P. 2014. Economic impact of GM Crops. The global income and production effects 1996–2012. *GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 5(3): 65–75.
21. Burgeff C. *et al.* 2014. How much can GMO and non GMO cultivars coexist in a megadiverse country? *Agrobioforum* 17: 90–101.
22. Byun M., Known H., Park S. 2008. Recent advances in genetic engineering of potato crops for drought and saline stress tolerance. En: Advances in molecular breeding towards drought and salt tolerance crops. Jenks M.A., Hasegawa P.M. y Jain S.M. (Eds.), Springer, Holanda, pp. 713–730.
23. CDB (Convenio sobre la Diversidad Biológica). 1993. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Ambiental. www.un.org/es/events/biodiversityday/convention.shtml
24. Cibogem. 2008. Bioseguridad en la aplicación de la Biotecnología y el uso de los organismos genéticamente modificados. Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados, Ciudad de México.
25. Cibogem. 2015. Bioseguridad en la aplicación de la Biotecnología y el uso de los organismos genéticamente modificados. Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados, Ciudad de México.
26. Clive J. 2014. ISAAA. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2014. Brief No. 49 ISAAA. Ithaca, New York.
27. Codex Alimentarius. 2006. Normas internacionales de los alimentos. FAO/OMS. www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/es/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCAC%2BGL%2B60-2006%252FCXG_060s.pdf
28. Codex Alimentarius. 2009. Foods derived from modern biotechnology. FAO/OMS. Rome. ftp://ftp.fao.org/codex/Publications/Booklets/Biotech/Biotech_2009e.pdf
29. Cong L. *et al.* 2013. Multiplex genome engineering using CRISPR. *Science* 339: 819–823.
30. Constable A. *et al.* 2007. History of safe use as applied to safety assessment of novel foods and foods derived from genetically modified organisms. *Food Chem Toxicol.* 45(12): 2513–2525.
31. Crisp A. *et al.* 2015. Expression of multiple horizontal acquired genes is a hallmark of both vertebrates and invertebrate. *Genome Biology* 16(50).
32. De Souza N. 2013. RNA-guided gene editing. *Nature Methods* 10(3): 189.
33. Decreto 418/2016 del estado de Yucatán por el que se declara al estado de Yucatán, zona libre de cultivos agrícolas con organismos genéticamente modificados. Diario Oficial, p. 17, Mérida, Yucatán, 29 de octubre de 2016.
34. Dev S.M., Rao N.C. 2007. Socio economic impact of Bt Cotton. Monograph No 3. Hyderabad. Centre for Economic and Social Studies (CESS).
35. EASAC (European Academies Science Advisory Council). 2013. Policy report. Planting the future: opportunities and challenges for using crop genetic improvement technologies for sustainable agriculture (Plantando el futuro: oportunidades y retos para el uso de cosechas generadas por mejoramiento genético para una agricultura sustentable). www.easac.eu/fileadmin/Reports/Planting_the_Future/EASAC_Planting_the_Future_FULL_REPORT.pdf / www.easac.eu
36. EFSA (European Food Safety Authority). 2012a. Final review of the Seralini *et al.* (2012a) publication on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603

- as published online on 19 September 2012 in *Food and Chemical Toxicology*. *EFSA J.* 10(11): 2986. www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/2986.pdf
37. EFSA (European Food Safety Authority). 2016. Modification of existing maximum levels of residue levels of glyphosate in borage and corn gromwell seeds. *EFSA J.* 14(4): 4468, 20. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2016.4468/epdf>
 38. European Commission / European Research Area / Food, Agriculture and Fisheries, and Biotechnology. 2010. A decade of EU-funded GMO research (2001–2010) [Una década de financiamiento europeo a la investigación de OGM (2001–2010)]. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxembourg, Bélgica. www.researchgate.net/profile/Danuta_Cichocka/publication/233770770_A_decade_of_EU-funded_GMO_research_2001-2010/links/09e4150b5ec0a1c71d000000/A-decade-of-EU-funded-GMO-research-2001-2010.pdf?origin=publication_detail/https://bookshop.europa.eu/en/a-decade-of-eu-funded-gmo-research-2001-2010-pbKINA24473/
 39. European Commission. 2015a. Directive (EU) 2015/412 of the European Parliament and of the Council amending Directive 2001/18/EC as regards the possibility for the member states to restrict or prohibit the cultivation of genetically modified organisms (GMOs) in their territory. *Official Journal of the European Union* L 68/1-L 68/8. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0412&from=EN>
 40. European Commission-Fact Sheet: Questions and answers on EU's policies on GMOs. 2015. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-4778_en.htm
 41. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2011. Biosafety resource book, Roma. <http://www.fao.org/docrep/014/i1905e/i1905e.pdf>
 42. FDA (U.S. Food and Drug Administration). 2013. Biotechnology Consultation Note to the File BNF No.000133. http://cera-gmc.org/files/cera/GmCropDatabase/decdocs/DAS444066/DAS444066_soybean_US_food_feed.pdf
 43. FDA (U.S. Food and Drug Administration). 2015. Biotechnology Consultation Note to the File BNF No.000141. www.fda.gov/food/ingredients-packaginglabeling/geplants/submissions/ucm436173.htm
 44. Flannery M. *et al.* 2004. An economic cost benefit analysis of GM crops-cultivation: An Irish case study. *The Journal of Agrobiotechnology, Managements and Economics* 7(4): 149-157.
 45. Fratamico P. 2008. The application of "omics" technology for food safety and research. *Foodborne Patho. Dis.* 5: 369–370. ftp://ftp.fao.org/codex/Publications/understanding/Understanding_ES.pdf
 46. Fuentes I. *et al.* 2014. Horizontal genome transfer as an asexual path for the formation of new species. *Nature* 511: 232–235.
 47. Gibson D.G. *et al.* 2010. Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science* 329: 52–56.
 48. Gil L., Martínez, V. (Eds.). 2003. Bioseguridad y comercio internacional de alimentos transgénicos en las Américas: decisiones y desafíos. OEA y Gobierno de Chile, Santiago.
 49. Gilbert L.A. *et al.* 2014. Genome-scale CRISPR-mediated control of gene repression and activation. *Cell* 159 (3): 647–661.
 50. Gilbert N. 2010. Food: Inside the hothouses of Industry. *Nature* 466: 548–551.
 51. Goeddel D. *et al.* 1979. Expression of chemically synthesized genes for human insulin. *PNAS* 76: 106–110.
 52. Hails R.S. 2000. Genetically modified plants—the debate continues. *Trends in Environmental Ecology* 15(1): 14–18.
 53. Han F. *et al.* 2016. How China can enhance adoption of biotech crops. *Nat. Biotechnol.* 34(7): 693.
 54. Herman R.A., Price W.D. 2013. Unintended compositional changes in genetically modified (GM) crops: 20 years of research. *J. Agric. Food Chem.* 61(48): 11695–11701.
 55. Herrera Estrella L. *et al.* 2002. La biotecnología en el sector agrícola. En: Biotecnología moderna para el desarrollo de México en el siglo XXI. Retos y oportunidades. Francisco G. Bolívar Zapata (Coord.), Fondo de Cultura Económica y Conacyt, Ciudad de México, pp. 147–166.
 56. Herrera Estrella L., Martínez M. 2003. Aplicaciones y controversias de las plantas transgénicas. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.), El Colegio Nacional, Ciudad de México.
 57. Herrera Estrella L., Martínez M. 2007. Plantas transgénicas. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, 2ª edición, pp. 167–194.
 58. Huang J. Peng B. 2015. Consumer's perceptions on GM food safety in urban China. *Journal of Integrative Agriculture* 14(11): 2391–2400.
 59. Hutchinson III C.A. *et al.* 2016. Design and synthesis of a minimal bacterial genome. *Science* 351(6280): aad6553 1–11.
 60. Ibarra J., Soberón M., Bravo A. 2003. La biotecnología y el control biológico de insectos. En: Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.), El Colegio Nacional, Ciudad de México.
 61. ICSU (International Council for Science). 2003. New genetics, food and agriculture: Scientific discoveries-societal dilemmas, 56. www.icsu.org/cms/2017/05/ICSU_GMO_report_May_2003.pdf
 62. INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias). 2006. www.inia.cl/
 63. Itakura K. *et al.* 1977. Expression in *Escherichia coli* of chemically synthesized gene for the hormone somatostatin. *Science* 198: 1056–1063.
 64. Jinek M. *et al.* 2012. A programmable dual RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337: 816–821.
 65. Jinek M. *et al.* 2013. RNA programmed genome editing in human cells. *eLife* 2: e00471.
 66. Jones R.R. *et al.* 2014. Incidence of solid tumours among pesticide applicators exposed to the organophosphate insecticide diazinon in the agricultural health study: an updated analysis. *Occup. Environ. Med.* 72: 496–503.
 67. Kanter J. 2010. E.U. clears biotech potato for cultivation. *The New York Times*. Section: Global Business <http://www.nytimes.com/2010/03/03/business/global/03potato.html?ref=world&pagewanted=prin>
 68. Kapuscinski A.R. *et al.* 2003. Making 'safety first' a reality for biotechnology products. *Nature Biotechnology* 21(6): 599–601.
 69. Kleinstiver B.P. *et al.* 2015. Engineering CRISPR-Cas nucleases with altered PAM specificities. *Nature* 523(7561): 481–485.
 70. Klümper W., Qaim M. 2014. A meta-analysis

- of the impacts of genetically modified crops (Un meta-análisis de los impactos de las cosechas genéticamente modificadas). *Plos One* 9(11): e111629.
71. Koutros S. *et al.* 2013. Risk of total and aggressive prostate cancer and pesticide use in the agricultural health study. *Am. J. Epidemiol.* 177(1): 59–74.
 72. Kuzma J. 2013. Properly paced? Examining the past and present governance of GMOs in the United States. En: *Innovative Governance Models for Emerging Technologies*. G Marchant *et al.* (Eds.). Cheltenham, Edward Elgar, UK, pp. 176–197. DOI: <http://dx.doi.org/10.4337/9781782545644.00016>
 73. Kuzma J. *et al.* 2008. An integrated approach to oversight assessment for emerging technologies. *Risk Analysis* 28(5): 1197–1220.
 74. Kyndt T. *et al.* 2015. The genome of cultivated sweet potato contains *Agrobacterium* T-DNAs with expressed genes: An example of a naturally transgenic food crop. *PNAS* 112(18): 5844–5849.
 75. Laureates Letter Supporting Precision Agriculture 2016. http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laureate-gmo-letter_rjr.html
 76. LBOGM (Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados). 2005. Diario Oficial de la Federación, 1–44. www.conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/normatividad/vigente/LBOGM.pdf
 77. Ledford H. 2016. Riding the CRISPR wave. *Nature* 531: 156–159.
 78. LGEEPA (Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente). 2015. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>
 79. López Arredondo D.L., Herrera Estrella L. 2013. A novel dominant selectable system for the selection of transgenic plants under *in vitro* and greenhouse conditions based on phosphite metabolism. *Plant Biotechnol. J.* 11(4): 516–525.
 80. Mali P. *et al.* 2013. RNA-guided human genome engineering via Cas9. *Science* 339: 823–826.
 81. Mallory-Smith C.A., Sánchez-Olguín E.S. 2011. Gene flow from herbicide-resistance crops: It is not just for transgenes. *J. Agric. Food Chem.* 59: 5813–5818.
 82. Maxmen A. 2015. Three technologies that changed genetics. *Nature* 528(7580): S2–S3.
 83. Mesnage R. *et al.* 2016. An integrated multi-omics analysis of the NK603 Roundup-tolerant GM maize reveals metabolism disturbances caused by the transformation process. *Sci. Rep.* 6: 37855. DOI: 10.1038/srep37855.
 84. Moses V., Cape R.E. 1991. *Biotechnology: the science and business*. Hardwood Academic Publishers, USA.
 85. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2010. *The Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States* (El impacto de cosechas desarrolladas por ingeniería genética en la sustentabilidad de las granjas en Estados Unidos de América). Committee on the Impact of Biotechnology on Farm-Level, Economics and Sustainability, Board on Agriculture and Natural Resources, Division on Earth and Life Studies. The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/12804>
 86. NASEM (National Academies of Science, Engineering, and Medicine). 2016. *Genetically engineered crops: experiences and prospects* (Cultivares desarrollados por ingeniería genética: experiencias y prospectivas). The National Academies Press, USA. <https://doi.org/10.17226/23395>.
 87. Nicolai A. *et al.* 2014. An overview of the last 10 years of genetically engineered crop safety research. *Crit. Rev. Biotechnol.* 34(1): 77–88.
 88. Nihongaki Y. *et al.* 2015. Photoactivable CRISPR-Cas9 for optogenetic genome editing. *Nature Biotechnol.* 33: 755–760.
 89. Norma Oficial Mexicana (NOM). 2014. Proyecto de norma oficial mexicana NOM-001-SAG/BIO-2014. Especificaciones generales de etiquetado de organismos genéticamente modificados que sean semillas o material vegetativo destinado a siembra, cultivo y producción agrícola. Sagarpa, Ciudad de México. www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5346453&fecha=28/05/2014
 90. NRC (National Research Council). 1989. *Field testing genetically modified organisms. Framework for decisions*. The National Academies Press, USA.
 91. NRC (National Research Council). 2002a. *Environmental effects of transgenic plants. The scope and adequacy of regulation*. The National Academies Press, USA.
 92. NRC (National Research Council). 2002b. *Animal biotechnology. Science based concerns*. The National Academies Press, USA.
 93. NRC (National Research Council). 2004. *Safety of Genetically Engineered foods*. The National Academies Press, USA.
 94. OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2006. *The OECD Edinburgh conference on the scientific and health aspects of genetically modified foods*. <http://www.oecd.org/sti/biotech/geneticallymodifiedfoods.htm>
 95. OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2015. *Safety assessment of foods and feeds derived from transgenic crops. Volume 1. En: Novel food and feed safety*.
 96. OMS. 2006. *20 preguntas sobre los alimentos genéticamente modificados (GM)*.
 97. Ortiz S., Ezcurra E. 2003. *La liberación de cultivos transgénicos al medio ambiente: esquemas adecuados y su importancia en el manejo del riesgo*. En: *Fronteras de la biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3: Biotecnología agrícola*. Francisco G. Bolívar Zapata y L. Herrera Estrella (Coords.), El Colegio Nacional, Ciudad de México, pp. 115–132.
 98. Panchin A.Y., Tuzhikov A.I. 2016. Published GMO studies find no evidence of harm when corrected for multiple comparisons. *Crit. Rev. Biotechnol.* 1–5. DOI: 10.3109/07388551.2015.1130684
 99. Panorama Agroalimentario. 2015. *Maíz 2015*. FIRA, Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial, Ciudad de México. www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf
 100. PECiTI (Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación). 2014–2018. *Gobierno de la República. Fomentar las aplicaciones de la biotecnología para atender responsablemente las amenazas a la salud humana y animal, a la biodiversidad, a la disponibilidad de alimentos y de recursos energéticos, y a las provenientes del cambio climático. Se requieren incentivos y apoyos para lograr que las aplicaciones con organismos genéticamente modificados transiten adecuadamente por el entramado regulatorio. Capítulo II. Alineación a las metas nacionales. II.2 Prioridades del Sector de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 50 pp. www.conacyt.gob.mx/images/conacyt/PECiTI_2014-2018.pdf

101. PND (Plan Nacional de Desarrollo). 2013–2018. Gobierno de la República. Meta IV: México próspero. Aprovechar el desarrollo de la biotecnología cuidando el medio ambiente y la salud humana. Línea de acción. Estrategia 4.10.4. Objetivo 4.10: Construir un sector agropecuario y pesquero que garantice la seguridad alimentaria, 142 pp. www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5299465
102. Potrykus I. 2001. Golden rice and beyond. *Plant Physiol.* 125: 1157–1161.
103. Purohit S. 2003. Agricultural biotechnology. Agrobios, India.
104. Qi L.S. *et al.* 2013. Repurposing CRISPR as an RNA-guided platform for sequence-specific control of gene expression. *Cell* 152(5): 1173–1183.
105. Ramírez O.T., Uribe J. 2007. Biotecnología farmacéutica moderna en México. El caso de Probiomed, S.A. de C.V. En: Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna. Francisco G. Bolívar Zapata (Comp. y Ed.), El Colegio Nacional y Academia Mexicana de Ciencias, 2ª edición, pp. 391–428.
106. Reporte Técnico Fundación Antama. 2016. Sobre la publicación del Instituto Flamenco de Biotecnología en Bélgica, acerca de los beneficios de los cultivos transgénicos. www.vib.be/en/about-vib/plant-biotech-news/Pages/default.aspx
107. Ricroch A.E. 2013. Assessment of GE food safety using “-omics” techniques and long-term animal feeding studies. *New Biotechnology* 30(4): 349–354.
108. Ricroch A.E. *et al.* 2013. Long-term and multi-generational animal feeding studies. En: Animal nutrition with transgenic plants. Flachowsky G. (Ed.), Oxfordshire, CABI Biotechnology Series, pp. 112–127.
109. Ricroch A.E. *et al.* 2014. Looking back at safety assessments of GM food/feed: An exhaustive review of 90-day animal feeding studies. *Int. J. of Biotechnol.* 13(4): 230–256.
110. RLBOGM (Reglamento de la LBOGM). 2008. Diario Oficial de la Federación, 1–30. www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LBOGM.pdf
111. Schiemann J. 2003. Co-existence of genetically modified crops with conventional and organic farming. *Environ. Biosafety Res.* 2: 213–217. DOI: 10.1051/ebr:2003017
112. SCSDB-Protocolo de Cartagena (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica). 2000. Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología del Convenio sobre la Diversidad Biológica: texto y anexos. Montreal: Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. www.cbd.int/doc/legal/cartagena-protocol-es.pdf
113. SCSDB-Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica). 2011. Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur sobre la responsabilidad y compensación suplementario al protocolo de Cartagena sobre seguridad de la Biotecnología. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Montreal: Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. http://www.wipo.int/edocs/lexdocs/treaties/es/cbd-sp/trt_cbd_sp.pdf
114. Séralini G.E. *et al.* 2012. Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Food Chem. Toxicol.* 50(11): 4221–4231.
115. Séralini G.E. *et al.* 2014a. Republished study: long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Environmental Sciences Europe* 26: 14.
116. Séralini G.E. *et al.* 2014b. Retraction notice to “Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize [Food Chem. Toxicol. 50(2012): 4221–4231]. *Food Chem. Toxicol.* 63, 244.
117. Sinagawa García S.Y. *et al.* 2004. Safety assessment by *in vitro* digestibility and allergenicity of genetically modified maize with an amaranth 11S globulin. *J. Agricultural and Food Chemistry* 52: 2709–2714.
118. Singh O.V., Ghai S., Paul D., Jain R.K., 2006. Genetically modified crops: success, safety assessment, and public concern. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 71, 598–607.
119. Solleiro J. L., Castañón R. 2013. Introducción al ambiente del maíz transgénico. Análisis de ocho casos en Iberoamérica. México: Agrobio México y CambioTec.
120. Tagliabue G. 2016. The EU legislation on GMOs between nonsense and protectionism: An ongoing Schumpeterian chain of public choices. *GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 8(1): 57–73.
121. Tang G.W. *et al.* 2009. Golden rice is an effective source of vitamin A. *American Journal of Clinical Nutrition* 89: 1776–1783.
122. The Economist. 2016. Genetically modified crops. Gene-policy transfer. *The Economist*.
123. The Royal Society (UK), Brazilian Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Indian National Science Academy, Mexican Academy of Sciences, National Academy of Sciences of the USA, The Third World Academy of Sciences. 2000. Transgenic plants and world agriculture (Plantas transgénicas y agricultura global). www.amc.unam.mx/Noticias/contenido_doc_trans.html
124. The Royal Society. 2016. GM plants. Questions and answers. <https://royalsociety.org/~media/policy/projects/gm-plants/gm-plant-q-and-a.pdf>
125. Thomas J.A., Fuchs R.L. (Eds.). 2002. Biotechnology and safety assessment. Academic Press, USA.
126. Trigo E.J., Capp E.J. 2006. The performance of agricultural sector during the period 1996–2006. En: *Ten years of genetically modified crops in Argentine agriculture*. Argenbio, Argentina.
127. Van Eenennaam A.L., Young A.E. 2014. Prevalence and impacts of genetically engineered feedstuffs on livestock populations. *J. Anim. Sci.* 92(10): 4255–4278.
128. Waltz E. 2015a. Non Browning GM apple cleared for market. *Nat. Biotech.* 33(4): 326–327.
129. Waltz E. 2015b. USDA approves next generation GM potatoes. *Nat. Biotech.* 33(1): 12–13.
130. Waltz E. 2016. CRISPR edited crops free to enter the market, skip regulation. *Nat. Biotech.* 34(6): 582.
131. Why silence is not an option. 2006. *Nature Biotechnology* 24(10): 1177.
132. Xoconostle B. 2017. Comunicación personal con F.G. Bolívar sobre las características de la planta transgénica de maíz CIEA-9, las cuales se describen en el capítulo VIII.
133. Ye X. *et al.* 2000. Engineering the provitamin A biosynthetic pathway into rice endosperm. *Science* 287: 303–305.
134. Zhang J.Z. *et al.* 2004. From laboratory to field. Using information from Arabidopsis to engineer salt, cold and drought tolerance in crops. *Plant Physiol.* 135(2): 615–621.
135. Zhenxiang X. *et al.* 2012. Horizontal transfer of expressed genes in parasitic flowering plant. *BMC Genomics* 13: 227.



CAPÍTULO XI CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES FINALES

- AMPLIA EVIDENCIA CIENTÍFICA Y TÉCNICA QUE SUSTENTA LA AUSENCIA DE DAÑOS A LA SALUD, AL MEDIO AMBIENTE Y A LA BIODIVERSIDAD POR EL USO RESPONSABLE DE TRANSGÉNICOS
- GRANDES BENEFICIOS EN DIFERENTES SECTORES

La biotecnología moderna, su participación en el estudio de la biodiversidad y el uso responsable de plantas transgénicas en la agricultura poseen muchos elementos de discusión importantes, en particular en México por ser centro de origen del maíz. Algunos piensan que la siembra de cultivares transgénicos daña las variedades nativas, en particular de maíz, y que el consumo de alimentos transgénicos causa daño a la salud humana.

Este contexto de oposición a la siembra de maíz transgénico en México hace muy difícil la discusión y aceptación del señalamiento de este libro de que los maíces transgénicos no harán daño ni a las variedades nativas ni a los cultivos convencionales que hoy se utilizan. Se insiste en la ausencia de daño por coexistencia, ya que el flujo génico mediado por el polen —como fue ampliamente comentado y

sustentado en el capítulo VI— no implica daño ni contaminación *per se*. Además no se ha reportado daño, sino una verdadera agricultura de coexistencia en varios países.

Las respuestas a estos cuestionamientos y a otros supuestos daños de los organismos genéticamente modificados (OGM) se presentan y analizan a lo largo del libro, en particular en los capítulos IV, VI y en el anexo 9, toda vez que se comentan más adelante. La ausencia de daño, el impacto positivo y los amplios beneficios por el uso de organismos transgénicos y sus productos en varios sectores —así como los documentos que sustentan estas aseveraciones— se encuentran de manera resumida en el capítulo I y a detalle a lo largo de todo este libro, en particular en los capítulos II, IV y V. Como se ha reiterado, los beneficios han impactado diversos sectores para coadyuvar a

la solución de diferentes problemas y demandas de la sociedad, relacionadas con la salud, la producción sustentable de alimentos, la industria y la conservación y recuperación del medio ambiente. Un listado de estas ventajas se incluye en el anexo 10. Se insiste en que los organismos transgénicos son el resultado de haber aprovechado conocimientos y tecnologías específicas para resolver diversos problemas en el sector salud, el agrícola y el de la industria química, abriendo así extraordinarias oportunidades y ventajas en el futuro inmediato.

En cuanto a los beneficios en el sector salud, cabe resaltar el hecho de que ahora contamos con cerca de 100 nuevos biomedicamentos de origen transgénico en farmacias —incluyendo las de México—, ninguno de los cuales existiría de no haberse desarrollado los OGM. Estos medicamentos incluyen vacunas contra organismos patógenos, entre ellos los virus causantes de la influenza y la hepatitis. Las aplicaciones avanzan rápidamente, lo que permite contender con muchas problemáticas clínicas y de enfermedades infecciosas. Adicionalmente se ha llegado ya al vencimiento de las patentes iniciales, lo que resulta en una reducción del precio de medicamentos genéricos de origen transgénico.

Se presentan también muchas evidencias que sustentan de manera decisiva la ausencia de daño por el consumo de alimentos de origen transgénico. Varios productos derivados de plantas transgénicas han sido introducidos desde hace más de 20 años a la cadena alimenticia de diversos países, incluyendo México, sin evidencia científica de que esto haya causado el menor daño a la salud humana o ani-

mal. Además del consumo directo de grano de maíz y soya por cientos de millones de seres humanos y miles de millones de animales, un conjunto muy grande de ingredientes derivados de cultivos transgénicos forman parte hoy de la industria alimentaria: derivados de cereales en forma de harinas, aceites y extractos de proteína, entre otros, que se distribuyen en tiendas y supermercados de muchos países, incluido México.

El uso de plantas transgénicas diseñadas para contender con plagas de insectos y simultáneamente reducir el uso de insecticidas químicos ha tenido efectos extraordinarios y múltiples beneficios. La reducción en el empleo de insecticidas químicos sintéticos en el campo es un avance muy importante y significativo, ya que varios de ellos causan cáncer y otros incrementan el riesgo de adquirirlo. Además, estos agroquímicos contaminan el medio ambiente y muchos son recalcitrantes. El propósito original de reducir el uso de insecticidas químicos por la utilización de cultivos transgénicos, ya cumplido, es un logro extraordinario en beneficio de la sustentabilidad del medio ambiente y de la biodiversidad del planeta. Esta reducción se ha traducido indirectamente en una disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, en la atenuación de la contaminación atmosférica y en una menor pérdida de insectos benéficos, entre ellos los polinizadores, en beneficio de la biodiversidad. Los beneficios de los cultivos transgénicos incluyen también una mejor salud para los agricultores que los emplean y el impacto económico y social por dejar de comprar y utilizar insecticidas químicos. Como consecuencia de una menor incidencia

de plagas se ha logrado también un incremento en la productividad de las cosechas. Por todas estas razones los usuarios de esta tecnología la han adoptado rápidamente en muchos países, incluyendo algunos iberoamericanos.

El presente libro documenta extensamente los apoyos a la biotecnología y a los organismos transgénicos, en particular plantas, de expertos reconocidos por su liderazgo científico y por las academias de ciencias y medicina de diferentes países. Estos testimonios indican, con base en la amplia y contundente evidencia científica publicada en más de 1,800 artículos científicos arbitrados, que no existe daño a la salud humana y animal por consumir alimentos transgénicos y sus productos. Por ello, las agencias y autoridades reguladoras de la inocuidad y seguridad alimentaria de diferentes países no han cancelado o retirado del mercado ningún producto transgénico de los que se comercializan al día de hoy.

Debido a los grandes beneficios de los organismos transgénicos y sus productos (medicamentos y alimentos incluyendo plantas, granos y aceites), el planeta se está moviendo hacia una bioeconomía sustentada en la biotecnología y los organismos transgénicos. El capítulo VIII resalta la importancia de apoyar el desarrollo nacional de variedades transgénicas propias de tercera generación como parte de una estrategia que propicie la seguridad y sustentabilidad alimentarias, máxime que las patentes de las plantas transgénicas de primera generación propiedad de compañías transnacionales están expirando. Esto abre el camino y la oportunidad al uso de genes que confieren resistencia a plagas de insectos en productos

genéricos, además de que México cuenta ya con plantas transgénicas desarrolladas localmente, con capacidades y propiedades extraordinarias, para ayudar a contender simultáneamente con la sustentabilidad alimentaria y del medio ambiente.

Unas cuantas compañías transnacionales concentran el control de los cultivos transgénicos pues son dueñas de las semillas transgénicas de primera y segunda generación. Por ello insistimos en que es necesario desarrollar variedades propias convencionales, transgénicas y mejoradas con técnicas de edición de ADN como parte de una estrategia inteligente y sustentable para contender no sólo con la producción de alimentos, sino también con los efectos del cambio climático, la contaminación ambiental, la conservación de plantas nativas y las injusticias en el campo mexicano. El hecho de que las compañías transnacionales sean las propietarias de las semillas transgénicas es el factor de mayor rechazo al uso de OGM, en particular plantas, como se explica en los capítulos V, VI, VII y VIII. No habrá consenso en el uso de OGM, en particular con los cultivos, hasta que la sociedad y la opinión pública los conozcan realmente y sepan apreciar sus beneficios; hasta que reconozcan la ausencia de daño y la posibilidad de usar variedades transgénicas mexicanas de tercera generación con capacidades extraordinarias para atender grandes necesidades y problemas.

Los capítulos II, IV y IX analizan las razones y evidencias científicas que sustentan el bajo riesgo de los organismos transgénicos y sus productos, al ser organismos generados por mecanismos similares a los procesos na-

turales de transferencia horizontal de ADN y posterior reorganización del genoma: la transgénesis. Estos mecanismos han ocurrido y ocurren naturalmente en la biota y han sido, además, parcialmente responsables de la evolución de las especies, independientemente de la existencia de transgénicos. El capítulo IX expone algunos ejemplos sorprendentes de transgénesis que han otorgado nuevas funciones a distintos organismos. El capítulo X, finalmente, presenta los marcos jurídicos nacional e internacional, la opinión de organizaciones internacionales y la situación en otros países que apoyan la utilización responsable de la biotecnología y los OGM.

CONSIDERACIONES FINALES

¿Qué entendemos por biotecnología?

La biotecnología es una actividad multidisciplinaria que contribuye al estudio y caracterización de los organismos vivos que integran la biota y pretende su utilización respetuosa y sustentable. Es una tecnología biológica, incluyendo los organismos transgénicos, que ha sido amigable a la salud, a la biodiversidad y el medio ambiente. Esto resalta al compararla con otras tecnologías, en particular las que utilizan compuestos químicos sintéticos como los insecticidas químicos, pues se sabe que muchos de ellos son recalcitrantes, dañan la salud y contaminan el medio ambiente. Los primeros organismos transgénicos fueron construidos con el propósito de atender, responsable y sustentablemente, demandas y problemas de la sociedad y el planeta, algunos de estos

propiciados por el abuso de tecnologías como los insecticidas químicos ya mencionados. Entre estos problemas se encuentra la producción sustentable de alimentos, medicamentos y otros satisfactores, la contaminación del medio ambiente, la destrucción de la biodiversidad y los efectos del inminente cambio climático. La biotecnología se utiliza desde tiempos prehistóricos con el mismo propósito de contender con estos problemas y necesidades. Los OGM, en particular los cultivos transgénicos, han incrementado extraordinariamente el potencial para aligerar el impacto de la actividad agropecuaria en el medio ambiente.

La transferencia horizontal de genes en la naturaleza y el laboratorio

Los capítulos II, IV y IX se ocupan de analizar a detalle la evidencia científica que sustenta el bajo riesgo de los organismos transgénicos y sus productos, al ser éstos organismos generados por mecanismos similares a procesos naturales de transferencia horizontal de ADN y su posterior reorganización con el genoma de la célula receptora —lo que llamamos transgénesis— que ocurren y han ocurrido en la biota independientemente de la existencia de transgénicos. Estos capítulos presentan distintos ejemplos, algunos asombrosos, de transferencia horizontal de ADN de bacterias a organismos precursores de plantas y animales que han ocurrido a lo largo del tiempo y han otorgado nuevas funciones a diferentes especies. Entre estos ejemplos está la transferencia de genes responsables de la fotosíntesis en plantas, originalmente de bacterias, y la existencia

de un camote que se consume actualmente en el cual se identificaron genes empleados en la construcción de OGM pero transferidos de manera natural. También se analiza la evidencia de que los organelos llamados mitocondrias y cloroplastos presentes en las células de animales y plantas, originalmente bacterias, fueron transferidos de manera horizontal mediante endosimbiosis —un fenómeno que permitió la ganancia de muchas funciones presentes hoy en día en los actuales mitocondrias y cloroplastos— a los organismos precursores de los animales y plantas actuales. Otro ejemplo de transferencia horizontal de material genético son los cromosomas de todos los organismos de mayor complejidad —plantas y animales, incluyendo la especie humana—, donde existe un número importante de genes de origen bacteriano, algunos de los cuales son funcionales.

Todos estos ejemplos son congruentes con la teoría de la evolución de las especies de Darwin, la cual señala que todos los seres vivos provenimos de un precursor común, y con la propuesta de este libro: que la transgénesis, la transferencia horizontal de ADN, ha desempeñado un papel relevante en la evolución de las especies y en la creación de la biodiversidad actual. El sustento principal reside en el hecho de que la estructura general de la molécula de doble hélice de ADN, donde se localizan los genes y reside la esencia de la vida biológica, es la misma en todos los organismos vivos.

Un objetivo fundamental de este libro es resaltar que la transgénesis que se realiza en el laboratorio para construir organismos trans-

génicos es un proceso similar al fenómeno natural que ocurre en la biodiversidad. Gracias a este fenómeno, los organismos en general y las plantas en particular han adquirido diversas funciones a lo largo del tiempo. Sin embargo, es importante señalar que los actuales organismos vivos han desarrollado mecanismos que permiten contender, o en su defecto eliminar, los ADN de origen foráneo o heterólogo que pudieran llegar a la célula por transferencia horizontal de ADN, como aquellos provenientes de infecciones virales. Por lo anterior, si bien la transgénesis es un fenómeno poco frecuente, ocurre particularmente mediada por infecciones de ciertos virus, llamados retrovirus, que pueden incorporar su material genético en los cromosomas de las células que infectan, como es el caso del VIH, responsable del sida. La bacteria *Agrobacterium tumefaciens*, por su parte, es capaz de infectar varios vegetales y puede transferir de manera horizontal parte de su material genético a las plantas infectadas.

Beneficios a la biodiversidad y el medio ambiente

La biodiversidad es una gran riqueza nacional y mundial. Se debe utilizar responsable y sustentablemente, buscando incorporar, cuando sea adecuado, un mayor valor agregado a los productos de origen biológico. La biotecnología ha ayudado en este sentido desde tiempos prehistóricos; la biotecnología moderna, en particular los organismos transgénicos, ha permitido incorporar valor agregado a los OGM a través de los transgenes. Estas nuevas propiedades de los OGM, algunas extraordinarias,

no podrían haberse obtenido mediante otras metodologías. Gracias a las ciencias ómicas y la caracterización detallada de los organismos vivos que éstas proveen, contamos hoy con un mayor y más profundo conocimiento a nivel molecular de las plantas que se utilizan en la industria alimentaria y de los OGM y productos derivados que se usan como alimentos y medicamentos. Para el uso responsable y sustentable de la biota y del medio ambiente se requiere utilizar la amplia y contundente información científica sobre organismos transgénicos, analizada de manera científica, responsable e integral; no con señalamientos de supuestos daños a la biodiversidad y a plantas nativas sustentados por consideraciones parciales y obsoletas; motivados por fanatismo, desconocimiento, pseudociencia y prejuicios y también, hay que señalarlo, mentiras. Como resultado de estos señalamientos adversos, lamentablemente se ha denostado a la biotecnología, a los organismos transgénicos y sus productos, generando animadversión en la opinión pública y la sociedad.

Este libro pretende integrar, comentar y analizar objetivamente los grandes beneficios al medio ambiente y a la biodiversidad por el uso de los organismos transgénicos y sus productos. El énfasis del mismo es sobre las plantas diseñadas para contender con plagas de insectos, que no sólo han sido efectivas sino que han permitido reducir el uso de insecticidas químicos, favoreciendo así la salud de agricultores y reduciendo la contaminación del medio ambiente. El empleo de cultivares transgénicos también ha beneficiado la biodiversidad, particularmente a insectos no perjudiciales, entre

ellos algunos polinizadores, ya que dejan de ser eliminados por insecticidas químicos inespecíficos que destruyen a todos los insectos sin distinción y dañan a los animales. También se enfatiza que no existe daño a las variedades comerciales y por ende a las nativas, ni contaminación, debido a la presencia en el campo de cultivares transgénicos. Así, podemos afirmar que en muchos países existe una agricultura de coexistencia sin evidencia de daño alguno a la fecha. Asimismo se analizaron las consecuencias, riesgos y problemas de descartar el uso de plantas transgénicas en nuestro país y de continuar usando insecticidas químicos. De hecho, uno de los beneficios indirectos para la biodiversidad de la siembra de cultivos transgénicos con resistencia a plagas de insectos es que, a diferencia de plaguicidas químicos inespecíficos (y algunos cancerígenos), aquellos son altamente específicos y por ello incrementan el número de insectos no plaga, incluyendo los benéficos.

Resulta inaceptable la premisa de ciertos grupos antagónicos a los transgénicos de que no tenemos derecho a modificar los organismos vivos de la biota por los supuestos daños y riesgos que aquellos aluden. Por un lado, ésta es una actividad que hemos venimos haciendo desde el nacimiento de la agricultura. Y por otro, esto equivaldría a renunciar al desarrollo de mejores sistemas biológicos como los transgénicos: organismos muy similares a los padres de los que derivan, construidos por transferencia horizontal de ADN y diseñados para atender problemáticas y demandas diversas.

Opinión de la comunidad científica internacional en materia de OGM

Un número significativo de documentos, incluyendo reportes y recomendaciones de grupos, asociaciones científicas y academias de ciencias y medicina de América y de Europa, muestran por un lado su preocupación por la manipulación de información y por el otro, reiteran su apoyo a la biotecnología y a los transgénicos, en particular a las plantas. Estos documentos, comentados en los capítulos III y IV, demuestran que los OGM son una tecnología responsable, respetuosa de la salud y del medio ambiente y que conlleva importantes beneficios. Resalta un reciente reporte de 2016 de las tres Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de Estados Unidos (NASEM, por sus siglas en inglés) que trata sobre “plantas construidas por ingeniería genética: experiencias y prospectivas”. Se debe recordar que las academias de ciencias de muchos países, México incluido, están integradas por investigadores, profesores y académicos distinguidos en su campo de estudio y expertos en sus disciplinas respectivas; entre sus funciones está la de realizar estudios, reportes y recomendaciones para gobiernos y organizaciones internacionales así como informar a la opinión pública sobre diferentes asuntos, problemas y oportunidades. Entre estos investigadores distinguidos se cuenta con expertos en biotecnología, transgénicos, alimentos, ecología y medio ambiente que colaboraron con el reporte de las NASEM.

También se presentó la opinión a título individual de otros reconocidos expertos y

de grupos a favor de los transgénicos y sus productos, como una primera declaración de 2012 firmada por 25 premios Nobel —varios de ellos verdaderos expertos en biología molecular, ADN y biotecnología vegetal: James Watson, Arthur Konberg, Norman Bourlag— y por Mario Molina. Una segunda declaración en apoyo a la biotecnología y a los transgénicos, en particular a plantas, ha sido firmada por 123 premios Nobel a marzo de 2017. Estas declaraciones fueron suscritas también por miembros de diversas academias de ciencias del mundo, los cuales se sumaron a favor del uso de los transgénicos, incluyendo integrantes del Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), autores de este libro.

Inocuidad de los OGM

Con respecto a la inocuidad de los cultivos transgénicos y sus derivados, la ausencia de daño a la salud por su consumo y sus beneficios, se reitera que el reporte sobre plantas transgénicas elaborado por las NASEM de Estados Unidos en 2016 y ampliamente comentado a lo largo de este libro destaca por lo completo e integral de su visión, así como por el rigor científico y técnico con que analiza la información.

El reporte citado fue elaborado por un comité integrado por verdaderos expertos en diferentes disciplinas. Una de sus conclusiones revela que no existe evidencia sustentada científica y técnicamente que indique daño a la salud humana o animal por consumir plantas transgénicas o sus productos. De igual manera cita que los cultivares transgénicos y sus productos se consumen como alimento huma-

no y animal desde hace muchos años en un sinnúmero de países, incluyendo nueve iberoamericanos, varios europeos, China, India y Sudáfrica, entre otros. Resaltan asimismo las cifras de Estados Unidos, donde más del 90% del maíz y soya que se siembran en su territorio son de origen transgénico y cientos de millones de humanos y animales los consumen desde hace más de 20 años. En México, con la autorización de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris) para complementar la demanda, se importa de Estados Unidos el 70% del maíz amarillo de origen transgénico que se consume en el país, principalmente como alimento de ganado pero también para consumo humano.

Evidencia científica relacionada con la inocuidad de los organismos transgénicos

Como sustento adicional a la inocuidad y ausencia de daño de los alimentos transgénicos, se reitera que este libro analiza un conjunto amplio de metaanálisis de cientos de publicaciones científicas arbitradas —más de 1,800— elaboradas por grupos independientes de diferentes universidades y centros de investigación, el cual soporta y avala la conclusión de los reportes de las NASEM de Estados Unidos y de otras partes del mundo, incluyendo Europa, acerca de la ausencia de daño por el consumo de plantas transgénicas y sus productos derivados. La inocuidad también se sustenta en los hechos, pues los organismos transgénicos son generados por procesos de transferencia horizontal de ADN y reorganización del genoma que ocurren en la naturaleza, y son evaluados extensa, pro-

funda e individualmente antes de ser comercializados.

Las evidencias sobre ausencia de daño a la salud humana y animal por consumir plantas transgénicas —algunas de ellas producidas con glifosato como herbicida— se analizan en los capítulos II, IV y VI; existe una gran variedad de artículos científicos que abordan metaanálisis llevados a cabo por laboratorios independientes, los cuales demuestran que no ha habido evidencia que sugiera daño a los animales utilizados en los experimentos por consumir plantas transgénicas o sus productos durante periodos extensos y a lo largo de diferentes generaciones, como lo mandatan las agencias regulatorias de inocuidad y seguridad de varios países. Entre estos destaca el más reciente metaanálisis de la Dra. E. Ricroch y colaboradores, 2014, el cual abarca un examen exhaustivo de un total de 44 artículos revisados por pares, publicados en revistas arbitradas, de experimentos realizados por laboratorios independientes utilizando nueve diferentes cosechas transgénicas como alimento por periodos de 90 días en diferentes animales, principalmente roedores, conforme lo mandatan las autoridades de inocuidad y seguridad, en particular la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus siglas en inglés). El análisis también toma en cuenta 60 opiniones de la propia EFSA sobre los 44 artículos citados, lo cual implica un total de 104 documentos (ver anexos 7 y 8) relativos a la inocuidad por la alimentación de animales con cultivos transgénicos. Este metaanálisis examina 27 casos que evalúan la alimentación de ratas con maíz transgénico de diferentes países, y confirma lo presentado en

metaanálisis previos sobre las revisiones de decenas de artículos publicados por otros grupos. Todos estos trabajos concluyen en la ausencia de efectos negativos o dañinos, de significancia biológica o toxicológica, en los animales objeto de estudio por haber consumido alimentos provenientes de plantas transgénicas por periodos de 90 días. Como se señala en el capítulo VI, algunos de estos cultivos fueron producidos utilizando glifosato como herbicida para eliminar malezas. Éste es un herbicida de muy baja toxicidad; la ausencia de daño en los experimentos analizados por Ricroch, 2014, indica que el glifosato y otros herbicidas fueron utilizados responsablemente bajo las condiciones adecuadas y aprobadas.

Asimismo, cabe resaltar que algunos de estos metaanálisis —realizados también por la Dra. Ricroch— indican que las plantas transgénicas han sido amplia y detalladamente caracterizadas por diferentes grupos de investigación, usando los métodos modernos y poderosos de las ciencias ómicas. Tomando como base decenas de artículos independientes publicados en revistas arbitradas, el metaanálisis concluyó que los cultivos transgénicos son muy parecidos a las plantas convencionales y a las parentales, que no existen diferencias importantes ni significativas entre las miles de moléculas que integran los metabolismos de estas plantas, y que por lo tanto son composicional y metabólicamente equivalentes. Tampoco se detectaron cambios relevantes, no planeados o inesperados del análisis por ciencias ómicas de los cultivos transgénicos comparados con sus plantas parentales. Todo esto sustenta y corrobora la ausencia

de daño por el consumo de plantas transgénicas y la equivalencia sustancial entre cultivos transgénicos y plantas convencionales.

Impacto económico, ambiental y social de los OGM

La siembra y uso de cultivos transgénicos y sus productos han tenido un gran impacto y múltiples beneficios para la sustentabilidad del medio ambiente y la biodiversidad del planeta. En varios países, México incluido, se ha reducido sustantivamente el uso de insecticidas químicos sintéticos —muchos de ellos contaminantes— para controlar y eliminar plagas de insectos con mayor eficiencia, toda vez que algunos de estos insecticidas causan cáncer y otros incrementan el riesgo de adquirirlo. Éste era y sigue siendo el propósito del desarrollo y uso de las plantas transgénicas de primera y segunda generación: controlar simultáneamente las plagas de insectos y reducir el uso de insecticidas químicos. Esta meta se ha logrado y ha derramado múltiples beneficios a la economía y salud de los agricultores que utilizan cultivos transgénicos, pues dejan de comprar insecticidas y de fumigar con ellos. El capítulo V analiza a detalle tres trabajos sobre el impacto económico e incluye un metaanálisis de 147 publicaciones científicas y técnicas realizado por un grupo alemán. Éste señala que, en promedio, la adopción de esta tecnología ha reducido 37% el uso de pesticidas, ha incrementado 22% el rendimiento de las cosechas y 68% las ganancias de los agricultores, entre otros factores por dejar de comprar y aplicar insecticidas químicos. En este sentido,

otro de los reportes señala que de 1996 a 2012 los agricultores que utilizan esta tecnología registraron un beneficio económico neto de 18.8 mil millones de dólares en 2012 y un total acumulado de 116.6 millones de dólares durante el periodo citado.

Una precisión en relación a las plantas transgénicas de primera y segunda generación es que no fueron diseñadas originalmente para aumentar la productividad de las cosechas sino para contender con plagas de insectos y reducir el uso de insecticidas químicos sintéticos, como se ha enfatizado en este libro. Sin embargo, el hecho de que los agricultores dejen de comprar y utilizar insecticidas químicos se traduce en una mayor productividad, como lo señalan los reportes técnicos comentados en el capítulo V.

Además de los impactos ambientales y económicos positivos, la reducción en el uso de insecticidas químicos ha sido responsable indirectamente de una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero, como se detalla en el capítulo V, lo cual constituye un beneficio adicional al medio ambiente. La biodiversidad también se ha beneficiado, en particular los insectos no plaga —algunos polinizadores como las abejas— que han incrementado su presencia en campos de cultivos transgénicos que ya no son fumigados con insecticidas químicos inespecíficos. La suma de beneficios económicos, a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad se traduce en un beneficio social que repercute en una mejor calidad de vida para los usuarios. Estos beneficios se deben a que los cultivos transgénicos que actualmente se usan en el campo representan una tecnología

perfeccionada, llamada “agricultura de precisión” por el grupo de 123 premios Nobel en su declaración de 2016. Esta tecnología es superior y más avanzada que las anteriores y proporciona extraordinarias ventajas a los agricultores; ha permitido, además, reducir los tiempos y la incertidumbre en la creación de cultivares con nuevas características, en beneficio del medio ambiente y de la sociedad.

Menor riesgo de consumo de insecticidas químicos

La mayoría de los cereales que se producen y consumen en México provienen de cultivares que utilizan insecticidas químicos para eliminar insectos plaga. Es poco probable hallar rastros elevados de ellos en los productos procesados, pero nadie puede garantizar la ausencia total de insecticidas químicos sintéticos, en particular en semillas. Por ello resulta más inteligente y sano —como lo señala reiteradamente desde hace años el Comité de Biotecnología de la AMC— consumir alimentos transgénicos —muchos de los cuales se encuentran en supermercados—, incluyendo granos provenientes de Estados Unidos donde se ha reducido de manera importante el uso de insecticidas químicos sintéticos, ya que los vegetales transgénicos no los requieren. Por ello consideramos que es absurdo, lamentable, inmoral e injusto que los campesinos y agricultores de México no dispongan de la amplia información existente sobre plantas transgénicas, que no conozcan sus usos y beneficios y que no cuenten con esta alternativa. Lo deseable sería que las opciones existieran, que pudieran tener la

capacidad de decidir qué semillas y qué tipos de insecticida usar. Es injusto que prevalezca la satanización de granos y alimentos transgénicos por algunos grupos de activistas que argumentan supuestos daños por su consumo. Como este libro señala, nuestra propuesta para México es consolidar el desarrollo nacional y avanzar hacia una producción sustentable de alimentos que incluya nuestros propios cultivares transgénicos, buscando reducir el uso de insecticidas químicos y fortalecer el desarrollo de productos genéricos.

Uso adecuado del glifosato para eliminar malezas. Supuestos daños a la salud por consumo de plantas transgénicas y uso de ciencias ómicas para evaluar su inocuidad

Hasta la fecha los argumentos más adversos sobre cultivares transgénicos por supuestos daños a la salud y al medio ambiente —incluyendo los artículos de Séralini y colaboradores comentados a detalle en los capítulos IV, V y VI— no han aportado evidencia que lleve al retiro del mercado por parte de las autoridades y agencias gubernamentales responsables de la autorización e inocuidad de cultivares transgénicos y sus productos derivados que actualmente se consumen y comercializan en diferentes países. Cabe enfatizar que varias solicitudes por supuestos daños de plantas transgénicas —algunas crecidas con glifosato— han implicado su reevaluación, sin cambio en las decisiones de dichas autoridades y agencias respecto al supuesto daño. Entre éstas se encuentran la Cofepris en México, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) y la

EFSA en Europa. Debido a estas decisiones los productos transgénicos se utilizan cada vez con mayor frecuencia en el mundo. Estas agencias y el Departamento de Agricultura de Estados Unidos regulan el uso de herbicidas químicos como el glifosato, el cual se utiliza para eliminar las malezas que crecen conjuntamente con cultivares; dicho compuesto tampoco ha sido retirado del mercado ni se han modificado las concentraciones aprobadas para su uso. El capítulo VI presenta un estudio de Kniss, 2017, acerca del uso de herbicidas en Estados Unidos, el cual sostiene que el glifosato es un herbicida de muy baja toxicidad y el más benigno. En los dos últimos años se utilizó para eliminar malezas en 25%, 46% y 48% de los cultivos de maíz, soya y algodón, respectivamente, de los cuales el 90% son transgénicos. Por su baja toxicidad, el glifosato contribuyó únicamente con 0.1%, 0.3% y 3.5% de la muy reducida toxicidad crónica encontrada en esos cultivos, respectivamente, destacando que una parte o la totalidad de esta toxicidad puede ser resultado de un uso irresponsable o fuera de condiciones aprobadas, ya sea por falta de información o descuido, o bien debida a individuos particularmente sensibles, como ocurre con otros compuestos. Finalmente, sigue siendo indispensable y necesario el uso de herbicidas para eliminar malezas que compiten por nutrientes con cultivos comestibles; por su baja toxicidad comparado con la mayoría de herbicidas el glifosato sigue siendo utilizado por la mayoría de los agricultores en Estados Unidos, y debe aplicarse en las condiciones aprobadas por las agencias.

Por todo lo anterior, los organismos transgénicos y sus productos autorizados actual-

mente presentes en el mercado se siguen produciendo en 28 países y consumiendo en más de 50 naciones, por más de 400 millones de personas y más de 1,000 millones de animales, sin daño a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad. Todo este conjunto de señalamientos responde a falsos cuestionamientos por supuestos daños atribuidos a las plantas transgénicas, por ingesta de maíz transgénico y uso de glifosato, como se explica a detalle en los capítulos IV y VI. En México, lamentablemente, ciertos amparos y demandas ante el poder judicial contra la siembra de transgénicos se sustentan en argumentos de supuestos daños a la salud y de contaminación por los OGM y el glifosato (ver capítulo VI). Las agencias reguladoras no han cambiado su posición en relación a este herbicida químico: si se utiliza en condiciones y concentraciones autorizadas, no debería causar daño a la salud ni contaminar el medioambiente. Sin embargo se recomienda seguir los lineamientos aprobados pues cualquier agroquímico eventualmente puede tener efectos negativos si se usa de manera irresponsable, por ejemplo, incrementando las concentraciones autorizadas y la frecuencia de las aplicaciones permitidas.

Por ello, el objetivo ulterior que persigue este libro—como se indica en los capítulos II, VI y VIII— es fomentar el desarrollo de plantas transgénicas de tercera generación que permitan la eliminación en el campo de herbicidas químicos como el glifosato y representen grandes avances en cuanto a sustentabilidad. Esto será factible gracias al uso de cultivares transgénicos desarrollados en México por Luis Herrera Estrella, los cuales son capaces de crecer

en fosfito en lugar de fosfato, ya que las malezas —que de otra manera tendrían que ser eliminadas con glifosato u otros herbicidas más tóxicos— no crecen en fosfito como fertilizante y fuente de fósforo. Reiterando que el uso de cultivares transgénicos no conlleva daños, si en algún momento y de manera independiente varios grupos detectaran y demostraran cualquier daño debido al uso o consumo de cualquier planta transgénica, ésta debería retirarse del mercado, al igual que ciertos medicamentos han sido retirados a causa de sus efectos secundarios.

Todos los cuestionamientos en contra de los cultivos transgénicos se responden a detalle en el capítulo VI. Entre estos, un argumento dice que las plantas transgénicas generan problemas no esperados, y peligrosos en ciertos casos, por la inserción del transgén y la reorganización del genoma del maíz. Algunos grupos y publicaciones antitransgénicos sostienen que los cambios, incluyendo los epigenéticos, son responsables de modificar la célula que lleva el transgén, ocasionando cambios profundos en el genoma, transcriptoma, proteoma y metaboloma de la planta transgénica. Estas publicaciones advierten sobre la importancia de realizar evaluaciones mediante ciencias ómicas para caracterizar fina y profundamente a los nuevos organismos. La respuesta a este señalamiento es que el maíz y las plantas transgénicas derivadas de él han sido y siguen siendo estudiados amplia y detalladamente, tanto como alimentos como organismos vegetales vivos, desde hace cientos de años, incluyendo su caracterización genética y epigenética. Por ello el

maíz es uno de los organismos vivos mejor estudiados. Los cultivos transgénicos, particularmente el maíz, han sido caracterizados molecularmente de manera exhaustiva utilizando ciencias ómicas, como expone a detalle este libro.

Los capítulos IV, VI y IX explican que estos nuevos y poderosos métodos para medir la calidad y composición del alimento transgénico han permitido caracterizar y evaluar miles de moléculas no blanco de ARN, proteínas y muchos otros compuestos celulares. Asimismo han permitido demostrar que cuando se comparan plantas transgénicas producidas por ingeniería genética con plantas no transgénicas, los resultados arrojan que son similares a las plantas paternas, que no se generaron cambios importantes y que son composicional, metabólica y sustancialmente equivalentes. En diciembre de 2016, durante la etapa final de preparación de este libro, apareció un artículo de Mesnage y colaboradores, entre ellos el Dr. Séralini, quienes son el mismo grupo que en 2012 publicó otro artículo donde se argumenta que el consumo de un cierto maíz transgénico causa daño a la salud; dicho artículo fue retractado por el editor de la revista que lo acogió inicialmente debido a fallas graves y limitaciones.

El nuevo artículo utiliza el mismo evento de maíz del año 2012; al respecto los autores mencionan que el proceso de transformación genética causa alteraciones que hacen dudar que la variedad transgénica sea sustancialmente equivalente a la línea parental que le dio origen. Se utilizaron los mismos métodos de ciencias ómicas para caracterizarlas. Los autores reportan que los niveles de 117 proteí-

nas y 91 metabolitos están alterados en la variedad transgénica respecto a la parental. Los resultados de estos experimentos se utilizan para alertar de manera alarmante que el maíz transgénico no es equivalente al convencional, aunque lo verdaderamente sorprendente es que las diferencias sean tan pequeñas. Considerando que el maíz tiene un potencial para producir más de 75,000 proteínas diferentes y decenas de miles de metabolitos, llama mucho la atención que un número tan reducido de moléculas biológicas, sólo 117 proteínas (0.1%) y 91 metabolitos (0.2%), tengan un nivel ligeramente distinto respecto al progenitor convencional. Además no se detectaron cambios relevantes, ni cambios no planeados ni inesperados, del análisis por ciencias ómicas de la variedad transgénica objeto de estudio comparada con las plantas parentales. Como se ha señalado en los trabajos de la Dra. Ricroch, el análisis por ciencias ómicas entre variedades de maíz o nuevos cultivos generados por mutágenos permitidos en las técnicas de mejoramiento tradicional, han mostrado que las variaciones en plantas transgénicas son menores a las encontradas entre diferentes variedades de maíz o a las obtenidas por mutagénesis. Muchas de estas variedades se utilizan comercialmente y se consumen desde hace muchos años sin daño a la salud o al medio ambiente.

Por lo anterior, el trabajo citado de Mesnage y colaboradores, más que alertar sobre cambios alarmantes en un producto transgénico, debe considerarse como evidencia adicional a las decenas de artículos científicos analizados a detalle mediante ciencias ómicas por la Dra.

Ricroch en el año 2013, los cuales demuestran que las variedades transgénicas son equivalentes, metabólica y sustancialmente similares, a las tradicionales y parentales. De cualquier manera, las nuevas variedades que se produzcan deberán seguir siendo caracterizadas a profundidad mediante ciencias ómicas antes de ser comercializadas. Así que este nuevo intento de Séralini y colaboradores se suma a los publicados anteriormente basados en engaños, señalamientos parciales, obsoletos, limitados y falsos en algunos casos.

Supuesta contaminación de variedades nativas por plantas transgénicas

Los detractores argumentan que el maíz transgénico “contamina”, daña los cultivos convencionales de maíz y, en el caso de México, pone en riesgo los maíces nativos de los cuales nuestro país es centro de origen. De acuerdo con el diccionario, se entiende que contaminación implica daño. Entonces, en primer lugar hay que resaltar que no existe ninguna evidencia científica publicada que pruebe que el maíz transgénico “contamine”, dañe o ponga en riesgo cualquier cultivo de maíz, o que lesione las 60 variedades de maíces nativos y sus parientes silvestres. En segundo lugar no hay evidencia de daño por la coexistencia de maíces transgénicos con otras variedades de híbridos convencionales. Coexistencia significa compartir presencia, existencia conjunta; no implica daño ni contaminación. En muchos países existe, como se ha señalado, una agricultura de coexistencia entre cultivares tradicionales y transgénicos con beneficios para los agricultores.

Respecto al argumento de que el flujo génico mediado por granos de polen de maíz transgénico daña o contamina a la planta receptora nativa, en principio se señala que es perfectamente factible que el transgén esté presente en el polen, y que por transferencia vertical (de padres a hijos) de ADN, pudiera fecundar el óvulo de la planta receptora a la que el polen llega, de la misma manera que han ocurrido eventos en los cuales las plantas han adquirido nuevos genes o alelos que les proporcionan nuevas características. Si estas características representan ventajas adaptativas para la planta o le confieren ventajas que el agricultor juzga convenientes, se pueden fijar en la población y entonces ocurre una introgresión. El flujo de genes es un proceso natural y no representa por sí mismo un efecto adverso. Si las características que confiere un transgén a la progenie que lo porta favorecen su adecuación, éste se puede seleccionar y mantener. Si por el contrario la característica no es adaptativa o no representa un atributo deseable para el agricultor, éste no la seleccionará y se eliminará de la población. Siempre es posible señalar esta posibilidad de transferencia si un transgén apareciera en una variedad no transgénica aunque esto es poco probable ya que las células cuentan, como se ha señalado, con mecanismos para eliminar el material genético foráneo.

La generación de malezas resistentes a herbicidas ligado al flujo de genes mediado por polen u otros mecanismos es otro de los señalamientos en contra del uso de plantas transgénicas. Éste es el caso de la transferencia de genes que confieren resistencia a herbicidas a malezas emparentadas a los cultivos de plantas trans-

génicas que portan tal característica. Como se ha indicado, es posible que la transferencia de genes de resistencia a herbicidas presentes en el polen transgénico ocurra, mas ello no necesariamente acarrea daño para la planta donadora ni efectos directos en el pariente silvestre si éste no se encuentra sujeto a la presión de selección dada por la presencia del herbicida. Sólo en caso de que el pariente silvestre sea ya una maleza que se controla en el ambiente agrícola se podría requerir el uso de herbicidas con un compuesto activo diferente. Un trabajo reciente indica la evidencia de transferencia de genes que confieren resistencia a herbicidas entre cultivares no transgénicos y sus malezas emparentadas. Esto demuestra que la transferencia de genes con resistencia a herbicidas ha ocurrido en la naturaleza y seguirá ocurriendo independientemente de la existencia o no de cultivares transgénicos. Es importante señalar que el problema de resistencia a los herbicidas, y en particular al glifosato, se resolverá al contar con una tecnología que permita reducir el uso de este y otros herbicidas en el campo. Esto es factible y se podría alcanzar comercializando la tecnología de plantas transgénicas que utilizan fosfito como fertilizante y no requieren glifosato para eliminar malezas, desarrollada en México por Luis Herrera Estrella.

Organismos genéticamente modificados y propiedad intelectual

Es importante recordar que la propiedad intelectual de los cultivares transgénicos de primera y segunda generación pertenece a compañías transnacionales como Monsanto, Dupont,

Dow Agrochemicals, Syngenta y Bayer, las cuales suministran el grano a los agricultores de diferentes países. Las compañías transnacionales dueñas de semillas transgénicas y pesticidas controlan este mercado. Sin embargo, como indican los capítulos V, VI, VIII y X, el 90% de variedades mejoradas e híbridos convencionales también son manejados por las mismas empresas, así que el supuesto daño de perder soberanía alimentaria en México sucedió hace más de 30 años cuando estas empresas empezaron a dominar el mercado de semillas convencionales del país. La propiedad de las semillas sigue repartida inadecuadamente entre pocas empresas, si bien esta situación no aplica sólo a las plantas transgénicas. La concentración de riqueza en pocas compañías podría dar lugar a mayor injusticia en el reparto de oportunidades de empleo y subsistencia y constituye el mayor rechazo hacia los cultivos transgénicos. Es importante enfatizar que existe la oportunidad de usar parte de la capacidad existente en los transgenes de plantas transgénicas propiedad de transnacionales en el campo mexicano, sumando esta posibilidad al extraordinario conocimiento que existe en el país para avanzar en la producción sustentable de alimentos, como se comenta más adelante.

Como se expone en los capítulos V, VI, VIII y X, algunas patentes comerciales que protegen a las plantas transgénicas de primera generación expiraron en 2016; por ello, los genes que protegen contra plagas de insectos podrían usarse como genéricos, lo cual representa una verdadera oportunidad. Algunas de estas compañías han cambiado de dueño y de estrategia, por varias razones. Bayer lanzó

una oferta de compra a Monsanto en 2016 y la compañía estatal china, ChemChina, adquirió Syngenta. La posible compra de Monsanto por parte de la alemana Bayer —que también produce insecticidas químicos sintéticos— sugiere que Bayer no quiere perder la oportunidad de ejercer un gran control sobre el mercado mundial de alimentos ni de fortalecer su capacidad en la tecnología biológica no contaminante de los transgénicos. La razón es que esta biotecnología está siendo adoptada por infinidad de usuarios en muchos países, a pesar de que los productos transgénicos son rechazados en varios países europeos y por ahora sólo se cultivan en cinco de ellos, si bien existen decenas de productos aprobados por la EFSA como alimentos en Europa. Por otro lado, la decisión del Gobierno de China de comprar Syngenta habla de su convencimiento de contar con la capacidad para desarrollar cultivos transgénicos en China, donde de hecho ya se utilizan y se requieren para alimentar una población creciente de casi 1,400 millones de habitantes. Estos dos ejemplos muestran las estrategias y acciones de compañías transnacionales y gobiernos que buscan tener una mayor participación y control del mercado global de alimentos apoyados en cultivos transgénicos.

Opinión pública sobre los transgénicos.

No habrá unanimidad en el uso de los OGM

Como se ha comentado a lo largo del libro, es indudable que debido a los amplios beneficios de los organismos transgénicos, para la comunidad científica nacional e internacional los organismos y productos de origen transgénico

representan una herramienta que no se puede soslayar en el desarrollo de la agricultura global y nacional. Nunca habrá unanimidad sobre el uso de transgénicos y sus diferentes derivados como tampoco en temas como la importancia de las vacunas y el cambio climático, del cual el actual presidente de Estados Unidos niega la evidencia. Existe una ofensiva en contra de la ciencia. Es obvio que existen poderosos intereses económicos alrededor de estos temas (como se señala en el capítulo VII); hay instituciones y grupos a favor y en contra de los transgénicos. No hay consenso: hay ignorancia, indiferencia e intereses económicos poderosos que no permiten reconocer los amplios beneficios de los organismos transgénicos para la salud humana y animal, el medio ambiente y la biodiversidad, y en la reducción en el uso de insecticidas químicos. También queda claro que ciertas compañías no están aparentemente interesadas en dejar de producir pesticidas químicos sintéticos pues perderían una parte importante de su participación en el mercado global de alimentos.

Legislación y organismos transgénicos de nueva generación

Existen acuerdos internacionales, marcos regulatorios y legislaciones nacionales, así como la convicción de hacer un uso responsable de los transgénicos (ver capítulo X). Con este propósito se han desarrollado nuevas tecnologías mediante biología sintética y técnicas de edición fina de ADN basadas en herramientas CRISPR-Cas9 que permiten ya la construcción de organismos transgénicos de tercera y cuar-

ta generación, más precisos y mejorados. Su ventaja principal es que en ellos el transgén se incorporará en el lugar del genoma que se seleccione previamente. En este libro se mencionan tres ejemplos de organismos desarrollados mediante estas técnicas de edición de material genético que otorgan, gracias a la eliminación de genes específicos en diferentes cultivares, ventajas a los organismos resultantes que por ello serían organismos genéticamente mejorados pero sin transgenes. Los transgénicos también son organismos genéticamente mejorados y sus ventajas o mejoras se encuentran en los transgenes. Con base en todos estos extraordinarios avances en biología sintética y molecular en cuanto a edición de genes, habrá que estar atentos a las diferentes iniciativas de ley o reglamentos que se presenten en pos de regular los organismos desarrollados por estas tecnologías. Es fundamental considerar la regulación que ya existe sobre organismos transgénicos para no retrasar, sino aprovechar rápidamente, el uso de estas nuevas tecnologías biológicas.

No hay que olvidar que la biología sintética inicia con el uso de ADN sintetizado por química orgánica; el primer ejemplo de aplicación de uso práctico fue el diseño y construcción de bacterias con transgenes sintetizados químicamente que codifican para insulina de origen transgénico, idéntica a la humana, uno de los medicamentos que se encuentran en farmacias alrededor del mundo para contender con cierto tipo de diabetes. Es alentador que en Estados Unidos exista ya este conjunto de organismos con nuevas propiedades construidos con tecnologías CRISPR-Cas9, y que aparentemente no

serán sujetos de regulación como los transgénicos de primera y segunda generación. Asimismo cabe recordar que los transgénicos de nueva generación construidos con estas técnicas podrán caracterizarse inmediatamente después de su construcción, gracias a la determinación completa de la secuencia nucleotídica del genoma del nuevo transgénico y mediante ciencias ómicas. Lo anterior permitirá determinar si la inserción del transgén ha ocurrido en el sitio previsto y confirmar que no hayan acontecido cambios adicionales en el genoma del organismo receptor más allá del motivado por el transgén en el sitio deseado.

Los OGM y los cultivos transgénicos y sus productos son ya una realidad en diferentes mercados

Es esencial que la sociedad y la opinión pública estén bien informadas sobre los beneficios de los transgénicos; que no cunda información parcial, incompleta, sesgada y en algunos casos falsa sobre los daños que los OGM supuestamente causan, los cuales son analizados y refutados en el capítulo VI. Los OGM se utilizan desde hace más de 35 años en el sector salud; las farmacias cuentan con más de 100 medicamentos y vacunas de origen transgénico para atender problemáticas clínicas e infecciones causadas por organismos patógenos. En el sector alimentario se pueden encontrar muchos productos procesados que se elaboran con organismos transgénicos o sus proteínas, los cuales están disponibles en supermercados de todo el mundo. Las plantas transgénicas y sus productos se usan y consumen desde hace

más de 20 años sin evidencia alguna de daño a la salud o al medio ambiente; las plantas transgénicas de primera y segunda generación, diseñadas para contender con plagas de insectos y de malezas, han tenido, además, grandes beneficios para la economía de los agricultores que las cultivan. Los cultivos transgénicos y sus productos derivados son ya una realidad en muchos países, son nutricionalmente equivalentes a los convencionales y cientos de millones de personas y miles de millones de animales los consumen. Por ello, el planeta se mueve vigorosamente como comunidad global hacia una bioeconomía sustentada en la biotecnología.

POLÍTICAS Y CONSIDERACIONES PARA EL FORTALECIMIENTO DEL CAMPO MEXICANO

Supuestos daños a maíces nativos

Es importante insistir en que no hay evidencia científica sólida publicada que indique que las plantas de maíz transgénico “contaminen”, dañen o tengan efectos negativos sobre las 60 variedades de maíz nativo y sus parientes cercanos que existen en México. La evidencia científica apunta a que estas variedades nativas han coexistido durante años con cientos de variedades de maíz, en particular con híbridos convencionales que portan grandes cambios genéticos y que actualmente se utilizan sin contaminación ni daño a las razas nativas, en México y otros países iberoamericanos. Existe una agricultura de coexistencia entre todas estas diferentes plantas; las variedades nativas coexisten con variedades de maíz transgénico

sin detrimento alguno porque se trata de organismos vivos con esencialmente el mismo genoma. La posible incorporación de material genético (transgén) proveniente de un cultivar transgénico a una variedad convencional o nativa no implica daño. Se trata de un gen adicional que se suma a los más de 20,000 que tienen las plantas de maíz, que además le puede conferir ventajas ante plagas de insectos o resistencia al glifosato. Los resultados de la liberación y siembra de maíz y otros cultivos transgénicos en nueve países iberoamericanos, incluyendo Argentina, Brasil, España y Portugal sustentan la convivencia: no hay evidencia de daño por la coexistencia de maíces convencionales con cultivos transgénicos. Nuevamente se afirma que todas las plantas transgénicas están diseñadas para atender y utilizar de manera responsable y sustentable la biodiversidad y el medio ambiente.

Lamentablemente diversos grupos antagónicos consideran que el maíz transgénico no debe sembrarse en México por ser nuestro país centro de origen y diversificación del maíz. Debido a esto, resulta muy difícil aceptar el señalamiento por el que este libro intercede: que los maíces transgénicos no causan daño a las variedades nativas ni a las cultivos convencionales que hoy se utilizan. La ausencia de daño por coexistencia se demuestra por el hecho de que el flujo génico mediado por polen no implica daño ni contaminación, como se explica en el capítulo VI. El planeta y el país pierden una gran oportunidad si el argumento en contra prevalece y se toma casi como dogma que el polen y los cultivares transgénicos causan daño a variedades convencionales y nativas

por la posible incorporación de transgenes en el genoma de ellas.

La necesidad de capacidades biotecnológicas en el país

Como se discute en los capítulos VI, VIII y X, el Gobierno de México debe implementar un programa a largo plazo, dentro de un Plan Nacional de Desarrollo Agropecuario, para desarrollar de manera más contundente sus capacidades biotecnológicas, en particular el desarrollo de variedades mejoradas propias que incluyan cultivares transgénicos y genéticamente mejorados obtenidos por técnicas de edición fina de ADN. Estas nuevas variedades podrían construirse tomando como base las semillas nativas y criollas existentes, incorporándoles nuevas propiedades mediante metodologías de ingeniería genética y de edición de genomas. Así se podría contender, de manera inteligente y sustentable, con los problemas, demandas e inequidades actuales y futuras del agro en México. La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) considera la biotecnología como “una tecnología que utiliza recursos biológicos, organismos vivos o sus derivados, para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos”. De ello se desprende que esta ley prevé el uso de biotecnología y, por ende, de organismos transgénicos para hacer un uso sustentable de la biota y los ecosistemas. Esto debería lograrse mediante una articulación adecuada con la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM). El Plan Nacional de Desarrollo (PND) y el

Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación (PECiTI) del Gobierno de la República para el periodo 2013–2018 señalan que la biotecnología es un área estratégica; el PECiTI, por su parte, afirma que la biotecnología y los transgénicos deben usarse de manera responsable para coadyuvar con las demandas y problemas nacionales, en particular la seguridad y sustentabilidad alimentaria.

Estos compromisos son congruentes con la LBOGM, la cual mandata establecer instrumentos de fomento a la investigación científica y tecnológica en bioseguridad y biotecnología. Asimismo, estos señalamientos coinciden con los apoyos a los transgénicos en diferentes regiones del mundo y con los pronunciamientos de diversas academias de ciencias. Sin embargo, en aras de avanzar hacia un Plan Nacional de Desarrollo Agropecuario, se debe considerar que el sistema mexicano de investigación agropecuaria ha estado en alguna medida desarticulado, a diferencia de instancias como la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos o el Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Francia. En nuestro país hay una coordinación limitada entre la investigación básica de tipo molecular, como la desarrollada en diferentes sedes del Cinvestav (presentada en el capítulo VIII) y la aplicada de tipo agrícola. Es esencial redoblar esfuerzos para avanzar hacia una mejor coordinación y aprovechamiento de las capacidades nacionales, en particular en el área de biotecnología, incluyendo la aceptación y utilización de plantas transgénicas en México.

La necesidad de desarrollar localmente semillas mejoradas para contender con las injusticias en el campo

Conforme a lo señalado en los capítulos VI, VIII y X, para contender con la preocupación de la propiedad de las semillas en unas cuantas empresas transnacionales —y los conocimientos y capacidades que ello implica—, México deberá desarrollar sus propias semillas mejoradas para acercarse a un escenario de mayor equidad y menor injusticia. Se deben aprovechar los valiosos conocimientos del campo, aprovechar de manera sustentable la valiosísima biodiversidad mexicana y considerar las capacidades y experiencias de los campesinos para construir una alternativa sustentable e inteligente que ayude a contender en parte con las injusticias del agro en México. Para lograr esto se requiere que los campesinos y agricultores en México cuenten con información técnica actualizada y tengan acceso a las tecnologías por las que este libro aboga, como las semillas transgénicas que se usan desde hace años en Estados Unidos y varios países de Iberoamérica. No se trata de imponer ninguna tecnología sino de ofrecer alternativas y presentar sus ventajas y beneficios, el riesgo de usarlas así como de no utilizarlas, de modo que el campesino pueda elegir la alternativa que más le convenga.

El riesgo del cambio climático en la agricultura, el fin de las patentes de algunos cultivos transgénicos y oportunidades relacionadas

El capítulo VIII aborda la urgencia de enfatizar y generar una señal de alarma de que, de acuer-

do a las predicciones de los efectos del cambio climático a nivel global, se prevé que México será uno de los países más afectados por el incremento de la temperatura promedio y la reducción de lluvias. Así, resulta imperativo e indispensable que, como se ha insistido en párrafos anteriores, se establezca un Plan Nacional de Desarrollo Agropecuario que incluya las variedades de todos los cultivos que se requerirán para mantener la producción de alimentos durante los próximos 30 años de manera sustentable. Para ello se tendrá que hacer uso de toda tecnología y conocimiento disponible: esquemas de mejoramiento genético tradicionales, ingeniería genética y edición de genomas, la valiosa investigación sobre vulnerabilidad de los maíces tradicionales frente al cambio climático y las experiencias en la conservación de razas locales. También se requerirá el extraordinario, ancestral y profundo conocimiento sobre las muchas y diversas variedades de plantas mexicanas, particularmente aquellas de regiones desérticas y de temporal, para coordinar esfuerzos que realmente ayuden a mitigar desastres y siniestros actuales y futuros. Para avanzar hacia estos objetivos y estar mejor preparados como nación, se deben reforzar los apoyos a los grupos de investigación en biotecnología que desarrollan organismos transgénicos orientados a la producción de medicamentos, cultivos agrícolas y forestales, así como otros aspectos de innovación biotecnológica como la biorremediación, la cual ayuda a enfrentar problemas de contaminación en el campo y el medio ambiente, en particular la derrama accidental o provocada de hidrocarburos.

Al igual que las más de mil variedades

híbridas de maíz que hoy están registradas en México —de las cuales al menos 30% pertenece a empresas transnacionales— y, sin haber lesionado a las variedades nativas, México deberá contar con sus propias variedades de maíz —y de otros vegetales— incluyendo variedades mejoradas genéticamente mediante edición de genomas y cultivos transgénicos con características extraordinarias, desarrolladas por investigadores mexicanos. Aunado a lo anterior, existe la gran oportunidad de que algunas patentes de genes que dan protección contra plagas de insectos, propiedad de compañías transnacionales, expiraron en 2016, lo que facilitará el uso de algunos de estos genes como genéricos. Éstos son indispensables para controlar plagas de insectos y reducir la cantidad de insecticida químico que se usa actualmente en el campo mexicano, y así eventualmente bajar los precios en el mercado y reducir la contaminación del medio ambiente. Existe experiencia en el uso de productos genéricos en el área de medicamentos transgénicos, la cual ha permitido la fabricación y utilización en México de medicamentos transgénicos genéricos a precios bajos, avalados por la Cofepris.

Desarrollos nacionales actuales de enorme potencial

En cuanto a los avances en el desarrollo en México de variedades de plantas mejoradas propias, incluyendo cultivos mejorados genéticamente por edición de genes y variedades transgénicas —como parte indispensable de la estrategia de sustentabilidad alimentaria y cuidado del medio ambiente—, conta-

mos con ejemplos extraordinarios de cultivos de tercera generación que son motivo de orgullo. Uno de ellos es fruto del trabajo de Beatriz Xoconostle y colaboradores, quienes construyeron una planta de maíz transgénica que no lleva un transgén que le otorgue nuevas propiedades, sino fragmentos de ADN de otros orígenes —por eso es transgénica— que modifican la expresión del gen que codifica para una proteína, el cual le permite adquirir resistencia a ciertos factores abióticos del clima como heladas y sequía. Estas capacidades también están presentes en otras plantas. Otro ejemplo, los cultivos transgénicos de diferentes vegetales construidos por Luis Herrera Estrella y su grupo, cuentan con la capacidad para utilizar fosfito como fertilizante y fuente de fósforo en lugar de fosfato. Esta capacidad, presentada a lo largo de este libro, constituye una oportunidad extraordinaria y una pieza fundamental dentro de una estrategia general hacia la sustentabilidad, pues alivia la degradación y contaminación del medio ambiente por la presencia de herbicidas y representa un nuevo paradigma para contender con el grave problema de las malezas que utilizan fosfato como fertilizante y crecen conjuntamente con cultivos transgénicos. Adicionalmente, esta innovación atiende el grave problema de la creciente aparición de malezas resistentes al glifosato. La capacidad de utilizar fosfito de estas nuevas plantas transgénicas implicará, si se implementa su uso a nivel comercial, reducir drásticamente el uso de herbicidas, entre ellos el glifosato, el cual se emplea desde hace mucho tiempo para la eliminación de malezas. Estos extraordinarios desarrollos

mexicanos nos ayudan a estar mejor capacitados para contender, sustentable e inteligentemente, con problemas de contaminación del medio ambiente, con sequías y efectos del cambio climático, lo que va de la mano con la protección de la biodiversidad y el cuidado de la salud humana —en particular de campesinos— gracias a la disminución del uso de insecticidas químicos, muchos de ellos carcinogénicos, y en un futuro cercano, la reducción en el campo de herbicidas químicos como el glifosato.

Sin embargo, es importante señalar que este libro no pretende abogar por la sustitución de cultivos de los cuales México es centro de origen ni por el uso único de cultivos transgénicos, lo que significaría una homogenización en el campo. Lo que sí pretende es sumar experiencias y recursos —incluyendo el desarrollo de cultivos transgénicos nacionales extraordinarios—, conocimientos y capacidades nacionales que, aunadas a la riqueza de nuestra biodiversidad, ayuden a contender de manera inteligente con las múltiples demandas y problemas que México y el planeta enfrentan, entre ellos la defensa y conservación de variedades y cultivos de los cuales este país es centro de origen, así como la producción sustentable de alimentos en el presente y a futuro, en el escenario ineludible del cambio climático.

Política nacional para el manejo de OGM

El mencionado PND considera la biotecnología como área prioritaria; el marco jurídico de la LBOGM y su reglamento permite la liberación de maíz y otros cultivos transgénicos de ma-

nera inteligente, responsable y controlada, en beneficio del campo. Esto no significa imponer el maíz u otras plantas transgénicas al campesino o agricultor, sino proporcionarles una alternativa biotecnológica amigable, avanzada y segura, que conlleve ventajas para la salud y beneficios económicos y sociales para quienes deseen utilizarla.

Los permisos de siembra comercial de cultivos transgénicos, en particular de maíz, podrían otorgarse inicialmente en algunos estados del norte que no son centros de origen, monitorear su desarrollo y utilizar esta experiencia para sustentar la siembra de maíz en otros lugares. Como se ha señalado, existen experiencias que podrían aprovecharse en el cultivo de maíz transgénico en países similares al nuestro, como Argentina, Brasil, Honduras y España. El éxito del algodón transgénico en México debería ayudar a avanzar en la utilización respetuosa de otras plantas transgénicas en nuestro país, en beneficio de los campesinos, la sociedad, el medio ambiente y la biodiversidad. Como este libro explica, no hay ninguna razón para impedir la siembra de algodón y soya transgénicos en México; hay que aprovechar esta experiencia para eventualmente usarla en el cultivo de maíz. De lo contrario se seguirá bloqueando la prosperidad de los agricultores y esto abonará a la pobreza, la injusticia y la inequidad en el campo de nuestro país.

Oposición a los OGM y legislación

Mediante amparos y demandas —algunas presentadas ante el poder judicial— ciertos

grupos antagonistas y muy activos han bloqueado la siembra de maíz y soya transgénicas en México por supuestos daños a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad. Reiteramos que estas descalificaciones no tienen sustento científico sólido, se basan en argumentos parciales y sesgados, y en no pocos casos en mentiras, como el daño a la salud y al medio ambiente por los cultivos transgénicos y el glifosato. El mundo avanza utilizando biotecnología, y los cultivos transgénicos se expanden cada vez más debido a los amplios y diversos beneficios que conlleva su uso. Como en otras áreas, México está perdiendo la oportunidad de utilizar conocimientos científicos, biotecnología de frontera y la extraordinaria riqueza de su biodiversidad para ayudar a contender con problemas y necesidades en diferentes sectores, máxime que existe el marco jurídico adecuado para el uso responsable de los transgénicos.

Como se señala en los capítulos VI, VIII y X, es imperante que los integrantes de los poderes ejecutivo, legislativo y judicial y sus asesores estén bien informados de los amplios beneficios de los organismos transgénicos para no impedir o bloquear su siembra en detrimento de campesinos y agricultores. La falta de información y visión política de ciertos funcionarios y gobernantes debe ser atendida: es necesario que las decisiones de otorgar amparos en contra de los transgénicos, particularmente los cultivos, así como posibles modificaciones al marco jurídico se hagan con sustento científico, tomando en cuenta los beneficios reiteradamente señalados y no por presiones por supuestos daños de parte de grupos adversos,

cuyos argumentos son reaccionarios, muchos de ellos falsos y parciales. Es muy lamentable la reciente decisión del Gobierno de Yucatán de convertir por decreto a ese estado “libre de cultivos transgénicos”, con las grandes desventajas e injusticias que ello implica para los agricultores de Yucatán. Este decreto ha sido impugnado ante la Suprema Corte de Justicia de la Nación por la Oficina de la Presidencia de la República, y también podría ser impugnado por algún campesino o agricultor de Yucatán que pudiera pensar que tal decreto viola sus derechos.

Consumo actual de OGM en México

México adquiere semillas transgénicas para complementar la demanda de alimento que se consume por ganado y por humanos. Los mexicanos, al igual que cientos de millones de habitantes de Estados Unidos, nos alimentamos con maíz y soya transgénicos casi desde su aparición en el mercado. La Cofepris ha dado permisos para la importación y consumo de OGM por animales y por humanos, en particular maíz, que en el periodo 1995–2013 sumaron 116. Estos permisos permitieron la importación de productos, principalmente soya, algodón y maíz, conforme a la Ley General de Salud y a la LBOGM. De hecho, para satisfacer la demanda, más del 70% de maíz amarillo que se consume actualmente en el país se importa de Estados Unidos, y hay que recalcar que este maíz es de origen transgénico. La Cofepris, como se ha mencionado, no ha retirado del mercado ningún producto transgénico por problemas de inocuidad,

ni ha cambiado —al igual que otras agencias encargadas de la inocuidad y la seguridad alimentaria de otros países— sus instrucciones acerca del uso de glifosato, el cual se sigue utilizando en Europa y Estados Unidos para eliminar malezas, ya que utilizándolo responsable y adecuadamente es un herbicida de muy baja toxicidad.

La necesidad de divulgar el conocimiento científico en la sociedad

Es esencial que la sociedad esté bien informada acerca de estos temas, de modo que gobernantes y sociedad civil puedan tomar las mejores decisiones con base en el conocimiento científico, no en información que circula en medios e internet, mucha de ella sin sustento científico. Las propias redes sociales distribuyen información falsa en la red; las mentiras de tanto repetirse se convierten en verdad, como es el desafortunado caso del daño que supuestamente causan los transgénicos. Es fundamental avanzar hacia una sociedad del conocimiento, principalmente científico, en la cual la ciencia y la tecnología responsables tengan mayor presencia, jerarquía, reconocimiento y respeto. El objetivo es que las decisiones sobre el uso de transgénicos y sus productos estén sustentadas en el conocimiento científico y en la opinión de verdaderos expertos, como las que proveen los integrantes de las diversas academias de ciencias en el mundo y la declaración de 123 premios Nobel a favor de la biotecnología y las plantas transgénicas. Se requiere que en México jueces, legisladores y responsables de áreas administrativas de las Secretarías de Estado

cuenten con información actualizada y sustentada científicamente acerca de los organismos transgénicos, de sus amplios beneficios y de la ausencia de daño por su uso. Estos funcionarios deberían apoyarse, por lo demás, en asesorías impartidas por personal técnico y científico con conocimientos expertos en biotecnología para la toma de decisiones. No deberíamos volver a presenciar casos lamentables e injustos como los que lograron impedir la siembra de maíz y soya transgénicos a través de amparos y demandas colectivas, basados en argumentos de supuesto daño a la salud y al medio ambiente por los OGM, e ignorando la verdadera evidencia científica y los amplios beneficios.

El Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias cuenta con reconocidos expertos en varias disciplinas; sus semblanzas curriculares se incluyen en un anexo de este libro. Varios miembros del comité son profesores e investigadores eméritos en diferentes instituciones y siete de ellos han obtenido el Premio Nacional en Ciencia y Tecnología otorgado por el Gobierno de la República. En su momento, el comité fue requerido por el Senado de la República para asesorar a los legisladores en la elaboración de la iniciativa de la LBOGM. Los miembros del comité nos encontramos permanentemente en la mejor disposición para brindar asesoría —con base en la amplia evidencia científica acumulada a favor de los transgénicos— a los integrantes de los poderes de la Unión acerca de la ausencia de daño y los beneficios de los OGM, así como sobre las iniciativas de ley y otras acciones —como los amparos y decretos en contra de cultivos transgénicos— que obran en demérito

de la biotecnología y del campo mexicano. Por todo lo señalado, nos parece injusto e inmoral que a los agricultores y campesinos de México se les dificulte el acceso a la tecnología de OGM, y que en el país se prohíba la siembra del maíz transgénico a diferencia de lo que ocurre en otros países hermanos, semejantes y cercanos de Iberoamérica.

CONCLUSIÓN FINAL

Es importante insistir en que el objetivo de este libro es conjuntar, sistematizar y presentar a la opinión pública, a la sociedad mexicana, a los funcionarios y gobernantes de nuestro país, la valiosa información sobre los grandes beneficios y la ausencia de daño a la salud, el medio

ambiente y la biodiversidad por el uso de organismos transgénicos y sus productos derivados, sustentada en la amplia y contundente información científica que ha sido recopilada y analizada en estas páginas. Por ello, la versión electrónica de este libro y de otros documentos sobre biotecnología y organismos genéticamente modificados, elaborados previamente por el Comité de Biotecnología, se encuentran disponibles en los sitios electrónicos de la Academia Mexicana de Ciencias y de otras instituciones de educación superior e investigación científica del país, de modo que los funcionarios y miembros de la sociedad civil estén bien informados y sustenten sus decisiones en el amplio conocimiento científico que soporta estas consideraciones.





ANEXO 1

GLOSARIO

Después de la definición de cada término se indican, entre paréntesis, las figuras del libro y otras entradas del glosario relacionados con éste. El propósito es que el lector pueda enriquecer la información sobre cada término no sólo leyendo su definición, sino también acudiendo a las figuras señaladas y a otros términos.

Ácido desoxirribonucleico (ADN)

Es la molécula biológica en la que reside la información genética de todos los seres vivos. Forma parte de los llamados cromosomas que son, a su vez, estructuras que se localizan en el núcleo de células de organismos eucariotes, los cuales incluyen animales y vegetales superiores. En las células humanas hay 23 pares de cromosomas ya que somos organismos diploides; una de las copias viene del padre y la otra de la madre. Cada cromosoma humano está formado por una sola molécula de ADN que mide aproximadamente de dos a seis centímetros de largo. Si se alinearan todas las moléculas de ADN de nuestros cromosomas sumarían aproximadamente dos metros. Las moléculas de ADN, en eucariotes, están asociadas

a muchas moléculas de proteínas, principalmente a las histonas, cuya función es propiciar el empaquetamiento de los dos metros de ADN de los 23 pares de cromosomas en el interior del núcleo de la célula, la cual tiene un diámetro de 10 micrómetros.

Los genes son regiones o segmentos específicos de cada una de estas moléculas de ADN. Tenemos aproximadamente 21,000 genes en nuestros 23 pares de cromosomas: gracias al Proyecto Genoma Humano conocemos la posición y secuencia de los aproximadamente 3,300 millones de pares de nucleótidos que incluyen los 21,000 genes en los 23 cromosomas. Cada uno de estos genes, como fragmento específico del ADN, es en sí mismo la información genética que codifica para una o varias proteínas, las cuales son las herramientas más importantes que tiene la célula para funcionar. Si tenemos 21,000 genes diferentes significa que los seres humanos podemos sintetizar, al menos, 21,000 proteínas diferentes, cada una a partir de un gen específico. Sin embargo, muchos genes codifican para más de una proteína, por lo que el llamado proteoma humano está integrado por

alrededor de 100,000 proteínas. Hay muchos genes que no codifican para proteínas y sus productos, transcritos de ARN, y tienen otras funciones, entre ellas participar en los procesos de síntesis de proteínas mediante ARN ribosomales y ARN de transferencia. Existen muchos otros ARN que llevan a cabo funciones como la regulación de la expresión de los genes y la regulación epigenética del genoma. El conjunto de todas las moléculas de ARN de un organismo se denomina transcriptoma.

Las proteínas son polímeros (collares) biológicos integrados por 20 diferentes monómeros o cuentas, llamados aminoácidos. Para entender los mecanismos que permiten a la célula viva sintetizar proteínas a partir de los genes localizados en el ADN es necesario explicar las extraordinarias características y capacidades de la estructura de doble hélice de la molécula de ADN. En 1953, Watson y Crick realizaron una de las contribuciones fundamentales, si no es que la más fundamental en la biología: el descubrimiento o desciframiento de la estructura molecular del ADN. Podemos decir, por lo que conocemos sobre el ADN, que el descubrimiento de su estructura química y de sus funciones es hoy uno de los elementos unificadores en la biología moderna, ya que no sólo la estructura general del ADN es la misma en todos los seres vivos, sino que la organización y expresión en términos generales de los genes también tienen carácter universal en todos los organismos. Esta característica es lo que permitió el nacimiento de la ingeniería genética, metodología que posibilita la edición *in vitro* (en un tubo de ensayo) a nivel molecular, de este material. Podríamos decir, como analogía con las cintas de videocasete, que el material genético de todos los seres vivos tiene el mismo “formato” y que por ello se pueden “editar molecularmente” *in vitro*. La estruc-

tura general del ADN es exactamente la misma en todos los seres vivos, desde las bacterias hasta los humanos. Por lo anterior ha sido posible construir organismos transgénicos que llevan genes específicos o transgenes, provenientes de algún organismo vivo, como parte del genoma de la célula receptora, para proporcionar al transgénico una nueva función biológica ya presente en el organismo vivo donador (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ARN, ARN no codificante, estructura general del ADN, nucleótido, cromosoma, gen, núcleo, célula, ARN mensajero, transcripción, replicación, traducción, polímero biológico, proteína, organismo vivo, eucariote, procariote, planta, animal, bacteria, transgén, transgénico, organismo genéticamente modificado, planta transgénica, ingeniería genética, transcriptoma, proteoma, metaboloma, genoma, ciencias ómicas, genómica, transcriptómica, metabolómica, proteómica, mutación, edición fina de ADN, transferencia horizontal de ADN, reorganización del genoma, transposón, secuenciación de ADN, organismo vivo, cromatina, centrómero, telómero, histonas, epigenética, marcas epigenéticas, citosina, lisina, metilación, agricultura de precisión).

Ácido aspártico

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Es también un metabolito de la célula (ver figuras II.2, II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma).

Ácido glutámico

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Es también un metabolito de la célula (ver

figuras II.2, II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma).

Ácido graso

Moléculas naturales que conforman las grasas y aceites naturales.

Ácidos nucleicos

Moléculas biológicas informacionales en las que reside la información genética. Existen dos tipos: ADN y ARN (ver figuras II.2, II.6, II.7, ADN, ARN, proteína).

Ácido ribonucleico (ARN)

Polímero de ribonucleótido parecido al ADN pero que en lugar de timina contiene uracilo en sus ribonucleótidos y D-ribosa en lugar de 2-desoxirribosa. Es un polímero de hélice sencilla en lugar de doble, a diferencia del ADN. Se forma o sintetiza a partir de la transcripción o copia de regiones específicas de ADN. Existen varios tipos de ARN involucrados en diferentes funciones en la célula. Entre ellos están los involucrados en la síntesis de proteínas, los ARN mensajeros (ARNm) involucrados en funciones de transmisión de información genética a partir de los genes del ADN, los ARN de transferencia (ARNt) involucrados en funciones de acoplamiento de los aminoácidos y los ARN ribosomales (ARNr) de dos tipos, los cuales están involucrados en la estructuración y función de los ribosomas, organelos en los cuales se sintetizan las proteínas.

Algunos ARN no codifican para proteínas como los ARN ribosomales y los ARN de transferencia. Existen además muchos otros tipos de moléculas de ARN pequeños en la célula que no codifican tampoco para proteínas, es decir ARN no codificantes, los cuales llevan a cabo varias

funciones, entre ellas la regulación de la expresión del material genético y la regulación epigenética del genoma. Ciertos tipos de ARN pueden llevar a cabo o catalizar reacciones químicas como lo hacen las proteínas con actividad enzimática. Aparentemente los ARN ribosomales también tienen capacidad catalítica involucrada en la síntesis de proteínas. El conjunto de todas las moléculas de ARN de la célula se llama transcriptoma, en congruencia a que las moléculas de ARN se generan de la transcripción de ADN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, II.8, II.11, II.12, II.13, II.14, ADN, ARN mensajero, ARN de transferencia, ARN no codificante, ribonucleótido, ribosoma, síntesis de proteínas, transcriptoma, genoma, proteoma, organismo vivo, ausencia de daño, epigenética, histonas, centrómero, cromatina, marcas epigenéticas, metilación, citosina, lisina, telómero, transposón, planta de maíz, transgénico). Existen virus que contienen ARN como material genético. Mediante la enzima transcriptasa reversa algunos de ellos, como los retrovirus, pueden transformar el ARN viral en ADN, el cual puede incorporarse luego en el genoma de la célula infectada (ver figuras II.3, IX.6, IX.7).

Adenina

Una de las cuatro bases nitrogenadas que conforman los nucleótidos que integran el ADN y el ARN (ver figuras II.2, II.4, II.5, II.6, II.7, ADN, ARN).

ADN

Ver ácido desoxirribonucleico.

ADN complementario

ADN obtenido enzimáticamente a partir de copiar un ARN mensajero específico (ver figura II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, IX.7, ADN, ARN, ARN mensajero, virus, transcripción reversa, PCR).

ADN heterólogo

ADN que proviene de una especie diferente al del organismo receptor. Los transgenes son ADN heterólogos. También se le llama ADN foráneo (ver figuras II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.16, ADN, transgén, transgénico, ingeniería genética, transferencia horizontal de ADN, biobalística, plásmido, pasajero).

ADN recombinante

Sinónimo de ingeniería genética. Técnicas usadas para la construcción de organismos transgénicos mediante el uso de transgenes (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, IX.17, ingeniería genética, ADN, transgén, transgénico, planta transgénica, *Agrobacterium tumefaciens*, plásmido, transferencia horizontal de ADN, síntesis química de ADN).

Agricultura de precisión

Término utilizado en la declaración de premios Nobel 2016 de apoyo a los transgénicos y a la biotecnología. Se entiende como el uso de tecnología de precisión, mediciones satelitales y de otros tipos para un manejo más eficiente y preciso de cosechas. Se sustenta en la observación, medición y respuesta a la variabilidad de éstas. El uso de cultivos transgénicos está englobado en este concepto, ya que la modificación del genoma en plantas transgénicas es más precisa, con sólo un gen, que las variedades convencionales donde ocurren muchos más rearrreglos en el genoma. Las tecnologías tipo CRISPR-Cas9, de edición fina del genoma, permiten una mayor precisión al diseño de organismos transgénicos de tercera y cuarta generación (ver figuras II.1, II.2, II.3, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, III.1, III.2, III.8, III.9, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.8, ADN, cultivos convencionales, genoma, gen, transgénico, transgén, plan-

ta transgénica, planta de maíz, ciencias ómicas, CRISPR-Cas9, biotecnología moderna, beneficios de los transgénicos, ausencia de daño, plagas, biodiversidad, *Bacillus thuringiensis*, *Agrobacterium tumefaciens*).

Agrobacterium tumefaciens

Bacteria que puede ser patógena para ciertas plantas. Es capaz de incorporar partes de su ADN en las células de las plantas que infecta. Cepas modificadas han sido utilizadas para apoyar la construcción de plantas transgénicas por transferencia horizontal de ADN, con técnicas de ingeniería genética o ADN recombinante (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.20, IX.19, IX.21, ADN, bacteria, transferencia horizontal de ADN, reorganización del genoma, planta, planta transgénica, transgénico, transgén, ingeniería genética, síntesis química de ADN, ADN recombinante, organismo vivo, plagas, plásmido).

Aislar genes

Capacidad de poder separar del conjunto del genoma un segmento específico que lleva uno o más genes. Muchas veces se requiere un oligonucleótido iniciador que permita amplificar al ADN por técnicas de PCR. Los genes también pueden sintetizarse químicamente (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, ADN, gen, genoma, oligonucleótido, síntesis química de ADN, PCR, iniciador).

Alanina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos que tiene la célula para sintetizar proteínas (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, metabolito, metaboloma, ARN de transferencia).

Alergenicidad

Posible efecto de generar cuadros alérgicos en el usuario (ver inmunógeno).

Alimentos genéticamente modificados

Ver alimentos transgénicos.

Alimentos transgénicos

Alimentos que son, contienen o provienen de organismos genéticamente modificados o transgénicos. La Organización Mundial de la Salud y muchas otras fuentes señalan que hasta la fecha no se ha detectado daño a la salud humana o animal por el consumo de este tipo de alimentos, en particular plantas transgénicas y sus productos derivados, los cuales son inocuos (ver figuras II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.23, III.1, III.2, III.7, III.8, III.9, IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.9, IV.10, IV.11, IV.12, IV.13, IV.14, IV.15, ADN, transgén, transgénico, planta transgénica, inocuidad, ausencia de daño, quimosina, evidencia sustentada científicamente, riesgo biológico, amilasa, lipasa, salud, organismo vivo, agricultura de precisión, beneficios de los transgénicos, plagas).

Amilasa

Proteína con capacidades enzimáticas que se utiliza en la elaboración de jarabes. Se produce también en organismos transgénicos por ingeniería genética (ver figura II.20, proteína, enzima, ingeniería genética, alimentos transgénicos, salud, ausencia de daño, inocuidad).

Aminoácido

Monómero de las proteínas. Existen 20 diferentes aminoácidos en las proteínas de los seres vivos. Los aminoácidos son metabolitos que tiene la célula viva para llevar a cabo la síntesis de protei-

nas y funcionar conforme a su metabolismo (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, transcripción, traducción, metabolito, metaboloma, síntesis de proteínas, ribosoma).

Amplificación de ADN

Metodología que permite que fragmentos de ADN puedan ser copiados y multiplicados a través de técnicas de PCR o clonación molecular en organismos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.12, II.13, II.14, II.15, ADN, iniciador, PCR, oligonucleótido, ingeniería genética, transgénico).

Animal

Miembro de uno de los cinco reinos en que se clasifica a los organismos vivos (reino *Animalia*). Las células de los animales son eucariotes porque tienen un núcleo en donde se localizan cromosomas. Los animales se desarrollan por la fertilización de un huevo por un espermatozoide. El huevo fertilizado o cigoto se desarrolla y se diferencia a nivel celular y forma diferentes tejidos (ver figuras IX.11, IX.12, ADN, célula, eucariote, núcleo, cigoto, gameto, organismo vivo).

Antibiótico

Moléculas que se utilizan para inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos, bacterias y hongos (ver organismo patógeno, bacteria, hongo, organismo vivo).

Anticodón

Es la secuencia de tres nucleótidos presentes en los ARN de transferencia mediante los cuales se unen a los codones, integrados por tres nucleótidos, determinados por la secuencia del ARN mensajero. La síntesis de proteínas se lleva a cabo leyendo secuencialmente y asociando los ARN de transferencia a través de sus anticodones a los co-

dones o tripletes complementarios de ARN mensajero (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, ARN mensajero, codón, código genético, ARN de transferencia, ribosoma, proteína, aminoácido).

Anticuerpo

Proteína producida por el sistema inmunológico de los mamíferos con el objetivo de unirse a un antígeno específico, el cual puede ser un agente invasor (virus, bacteria, hongo) o moléculas pequeñas no presentes en el organismo (ver inmunógeno, patógeno, antígeno, vacuna).

Antígeno

Sustancia extraña a un organismo, blanco de los anticuerpos y en general de la respuesta inmune de animales superiores (ver inmunógeno, anticuerpo).

Arabidopsis thaliana

Planta con genoma pequeño que se usa como modelo para el estudio de vegetales superiores (ver figuras II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, IX.13, IX.14, célula, planta, planta de maíz, planta transgénica, organismo vivo).

Arginina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, metabolito, metaboloma, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia).

Arma biológica

Posibilidad de utilizar un organismo vivo que exista en la naturaleza o que sea modificado genéticamente para generar daño o muerte en otros organismos (ver bioseguridad, riesgo biológico, transgénico).

ARN

Ver ácido ribonucleico.

ARN mensajero

El primer paso en la síntesis de proteínas es la formación de una molécula de ARN, denominada ARN mensajero (ARNm), que usa como molde una de las dos hebras o cadenas de ADN. El ARN mensajero es una molécula que codifica para una o más proteínas, químicamente muy parecida al ADN. Forma cadenas lineales sin ramificaciones, por lo que la información genética contenida en el ADN, es decir, el orden de desoxirribonucleótidos del ADN se transfiere a una secuencia de ribonucleótidos complementaria durante la síntesis del ARNm. La transcripción es un proceso enzimático mediado por la enzima ARN polimerasa y otras proteínas y se rige por dos reglas: siempre ocurre, al igual que la replicación del ADN, en la dirección 5'→3', y normalmente sólo una de las cadenas del ADN es transcrita o copiada en una molécula de ARNm. La información genética contenida en cada molécula de ARNm es posteriormente traducida en moléculas de proteínas en un proceso catalítico que se realiza en los organelos celulares conocidos como ribosomas. En este mecanismo biosintético participan tres tipos distintos de ARN: el ARN ribosomal (ARNr), que junto con varias proteínas forman los ribosomas; el ARNm, que acarrea la información genética contenida en el ADN, y finalmente los ARN llamados de transferencia (ARNt), que sirven como adaptadores para el ordenamiento lineal de aminoácidos específicos, conforme la secuencia del ARNm.

La síntesis de proteínas, que de facto es la traducción del mensaje del ARN, se lleva a cabo también en dirección 5'→3' mediante la polimerización de aminoácidos en ribosomas para sintetizar proteínas leyendo el ARN mensajero por tripletes, confor-

me al código genético. Este proceso es similar al que ocurre en la cinta de un casete, donde la información de cada canción que está contenida en un segmento de cinta es traducida en melodía cuando tal segmento de cinta pasa a través de las cabezas de una grabadora. En el caso de la célula viva, la cinta corresponde al ARN mensajero que lleva la información y los ribosomas a las cabezas de la grabadora que leen la cinta y transforman la información en proteínas, las cuales serían, por analogía, las melodías o canciones biológicas (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, ADN, ARN, transcripción, traducción, ribosoma, proteína, anticodón, codón, ARN de transferencia, código genético, aminoácido, síntesis de proteínas, ribonucleótido, ribosoma, transcriptoma, genoma, proteoma, epigenética, organismo vivo, histonas, centrómero, cromatina, marcas epigenéticas, metilación, citosina, lisina, telómero, transposón, planta de maíz).

ARN no codificante

Además de los ARN ribosomales y los ARN de transferencia que no codifican para proteínas, el ARN no codificante es un tipo de ARN que tampoco codifica para proteínas y no está involucrado en la síntesis de proteínas. Desempeñan una función a nivel de ARN de carácter estructural o regulatorio. Los ARN no codificantes se clasifican en ARN no codificantes largos (ARNncl) y ARN no codificantes pequeños (ARNncp). Los ARNncl son mayores a 200 nucleótidos, no poseen marcos de lectura abiertos (en algunos casos tienen el potencial para codificar proteínas pequeñas de menos de 100 aminoácidos) y regulan la expresión genética a nivel transcripcional, postranscripcional y durante el tráfico intracelular. Los ARNncp representan los ARN no codificantes más abundantes en los organismos eucariotes. En plantas, el grupo de ARNncp denominados ARN interferentes pequeños (ARNip) de 24 nucleótidos de longitud

constituyen un componente fundamental en la regulación epigenética conocida como “vía de metilación del ADN dependiente del ARN” (*RNA-dependent DNA methylation pathway* o RdDM, por sus siglas en inglés). Los ARNip de 24 nucleótidos actúan como guía para establecer y perpetuar los patrones de metilación del ADN en contextos asimétricos 5'-CHH-3' (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, II.11, ADN, ARN, epigenética, histonas, metilación, cromosoma, cromatina, eucariote, planta, animal, planta de maíz, ARN mensajero, ARN de transferencia, ARN ribosomal, proteína).

ARN de transferencia

Tipo de ARN que une los diferentes aminoácidos en el proceso de síntesis de proteínas. Éstas son moléculas biológicas que se sintetizan en los ribosomas utilizando ARN mensajero cuya secuencia de nucleótidos es leída de tres en tres, conforme al código genético. La lectura de nucleótidos de tres en tres, en forma de tripletes, se lleva a cabo por los ARN de transferencia usando sus secuencias de anticodones y permitiendo así la incorporación de aminoácidos al asociar los anticodones con los tripletes (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, ADN, ARN, ARN mensajero, ARN ribosomal, codón, anticodón, código genético, aminoácido, síntesis de proteínas, proteína).

ARN polimerasa

Proteína o enzima principal que utiliza la célula conjuntamente con otras proteínas (algunas con capacidades enzimáticas) para sintetizar ARN tomando como molde una de las dos hebras de ADN que contiene el gen o cualquier región de ADN que se pueda transcribir o copiar (ver figuras II.6, II.7, II.8, ADN, ARN, ARN mensajero, transcripción, proteómica, síntesis de proteínas, proteína, ribosoma).

ARN ribosomal

Tipo de ARN que forma parte de los ribosomas y que está involucrado en la síntesis de proteínas a partir de la lectura de ARN mensajero, el cual se sintetiza o transcribe a partir de genes. Los ARN ribosomales son de dos tipos y están codificados por dos genes específicos, uno que codifica para la subunidad mayor y otro para la menor de los ribosomas. Los ARN ribosomales también están involucrados directamente en la catálisis de la síntesis de las proteínas (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, ARN, ARN mensajero, ARN de transferencia, código genético, aminoácido, transcripción, traducción, anticodón, codón, síntesis de proteínas).

Asparagina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, metaboloma, metabolito, ARN de transferencia).

ATP

Adenosín trifosfato, molécula utilizada universalmente por todos los seres vivos para almacenar energía biológica. Es también uno de los metabolitos de la célula. En los animales y vegetales se sintetiza primariamente en las mitocondrias (ver figuras IX.11, IX.12, IX.13, metabolismo, metabolito, metaboloma, célula, mitocondria, organismo vivo).

Ausencia de daño

En el contexto de este libro se señala que no hay evidencia científica sustentada de daño a la salud, al medio ambiente o la biodiversidad por el uso de organismos transgénicos construidos por ingeniería genética, en particular plantas y sus pro-

ductos. Al contrario, hay más de 1,800 artículos científicos publicados en revistas arbitradas que señalan que no existe daño a la salud humana o animal por consumir alimentos transgénicos. La información señala de manera contundente que son inocuos a la salud. Además, no existe daño al sembrar conjuntamente plantas o cultivos transgénicos con los cultivos llamados convencionales o tradicionales que muchos agricultores utilizan, pues existe coexistencia.

La utilización de plantas transgénicas ha tenido grandes beneficios, entre ellos reducir el uso de insecticidas químicos que se utilizan para eliminar plagas de insectos, pues muchos de éstos compuestos son contaminantes y carcinogénicos. Tampoco existe daño por el uso de cerca de 100 medicamentos transgénicos que nos ayudan a enfrentar problemáticas clínicas y de organismos patógenos (ver figuras II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, II.23, III.1, III.2, III.8, III.9, IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, VI.2, IX.20, ADN, bioseguridad, alimentos transgénicos, evidencia sustentada científicamente, producto recombinante, transgénico, transgén, planta transgénica, planta de maíz, cultivos convencionales, ingeniería genética, inocuidad, insecticida químico, plagas, bioinsecticida, recalcitrante, beneficios de los transgénicos, salud, medicamento transgénico, organismo vivo, agricultura de precisión).

Autótrofo

Organismos capaces de producir su propia comida (ver bacteria, hongo, planta transgénica, organismo vivo).

Bacillus thuringensis

Microorganismo bacteriano que habita en la tierra del campo y produce proteínas que tienen

funciones insecticidas. De este organismo se han aislado genes que se convierten en transgenes y que producen tales proteínas para la construcción de plantas transgénicas resistentes a plagas de insectos. Gracias a la utilización de los cultivos transgénicos, además de controlar plagas de insectos, se ha reducido sustantivamente el uso de insecticidas químicos, muchos de los cuales contaminan el medio ambiente y dañan la biodiversidad (ver figuras II.2, II.4, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.20, II.21, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, V.2, V.3, VI.2, IX.16, ADN, ingeniería genética, insecticida químico, biodiversidad, medio ambiente, bacteria, planta transgénica, transgén, organismo vivo, beneficios de los transgénicos, ausencia de daño, plagas, agricultura de precisión).

Bacteria

Miembro de uno de los cinco reinos en que se clasifica a los organismos vivos (reino *Bacteriae*). Microorganismo autótrofo de una sola célula (unicelular) en la mayoría de los casos, aunque existen también en asociaciones de varias células. Las bacterias son responsables de muchas funciones biológicas como la fijación biológica de nitrógeno y la biodegradación de compuestos. Son organismos procariones por no tener un núcleo donde se localiza el ADN, el cual es el caso de los eucariotes (animales y plantas). Una más reciente clasificación de las bacterias las separó en archaebacteria (archaea) y eubacteria (bacteria); este último es el organismo que se menciona en este libro como bacterias y sinónimo de procariones (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.18, II.19, II.20, IX.8, IX.9, IX.10, ADN, microorganismo, eucariote, procarione, núcleo, organismo vivo, biología sintética, salud).

Banco de secuencias

Bases de datos que contienen las secuencias iden-

tificadas de ADN, ARN, proteínas, transcriptomas y metabolomas (ver bioinformática, genoma, metaboloma, transcriptoma, proteoma).

Beneficios de los transgénicos

En este libro se señalan las ventajas y efectos benéficos de los transgénicos para los usuarios, resultado del uso de la biotecnología que construye organismos transgénicos y productos derivados mediante ingeniería genética. Entre los beneficios destaca primordialmente la ausencia de daño a la salud por el consumo de alimentos transgénicos, en particular plantas y sus productos derivados. Existen asimismo ventajas económicas al usar plantas transgénicas y dejar de emplear insecticidas químicos para eliminar plagas de insectos, beneficios a la salud de agricultores y animales que dejan de ser fumigados con estos productos y beneficios al medio ambiente y la biodiversidad, ya que muchos insecticidas son contaminantes, carcinogénicos, recalcitrantes y matan insectos sin distinción, dada su inespecificidad. Actualmente contamos con cerca de 100 medicamentos de origen transgénico que han ayudado a contener con diferentes problemáticas clínicas y con organismos patógenos.

En un futuro cercano se esperan beneficios adicionales, incluyendo el hecho de que las patentes de plantas transgénicas de primera generación, las cuales otorgan resistencia a plagas de insectos, están expirando pues empezaron a usarse hace 20 años. Poder usar plantas transgénicas de primera generación como genéricos representa una muy buena oportunidad para desarrollar y potenciar variedades transgénicas mexicanas, entre las que se encuentran un ejemplo extraordinario de maíz resistente a heladas y sequías y un maíz transgénico con la capacidad de crecer en fosfito en lugar de fosfato como fertilizante, lo cual implica dejar de

usar herbicidas como el glifosato que se utiliza para eliminar malezas (ver figuras II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, II.23, III.1, III.2, III.8, III.9, IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, VI.2, VIII.1, VIII.2, VIII.3, ADN, medicamento transgénico, riesgo biológico, bioseguridad, alimentos transgénicos, evidencia sustentada científicamente, producto recombinante, transgénico, transgén, ingeniería genética, planta transgénica, *Bacillus thuringensis*, inocuidad, insecticida químico, ausencia de daño, bioinsecticida, glifosato, recalcitrante, insulina, interferón, salud, organismo vivo, patente, agricultura de precisión, plagas).

Biobalística

Método utilizado para construir plantas transgénicas que utiliza microproyectiles de oro que se recubren con el ADN que se quiere incorporar al genoma de una célula. Es un método usado, además de la ingeniería genética, en la construcción de plantas transgénicas. La biobalística también implica transferencia horizontal de ADN y recombinación genética del ADN del transgén con el ADN del genoma de la célula receptora (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.20, IX.17, IX.18, IX.19, ingeniería genética, transgénico, transgén, transferencia horizontal de ADN, gen, recombinación genética del ADN, organismo vivo, planta transgénica, ausencia de daño).

Biocatálisis

Proceso biológico en el que participan una o más enzimas, fuera del contexto celular, para acelerar de manera catalítica el proceso mismo. Los procesos comprenden el tipo de síntesis y la modificación o degradación de compuestos biológicos y orgánicos, entre ellos los alimentos (ver figura II.20, proteína, aminoácido, alimentos transgénicos, transgénico).

Biodegradable

Que se degrada por procesos que ocurren en la naturaleza mediante organismos vivos (ver recalcitrante, bioinsecticida, organismo vivo).

Biodiversidad

Conjunto de todos los organismos vivos del planeta. Sinónimo de biota y de biosfera. Se encuentran en diferentes ecosistemas (ver figuras II.20, IX.5, IX.10, IX.24, planta, animal, *Bacillus thuringensis*, bacteria, organismo vivo, planta de maíz, agricultura de precisión).

Bioética

Rama de la ética que se dedica a proveer los principios para la correcta conducta humana respecto a la vida, tanto humana como no humana (animal y vegetal), así como del ambiente en el que pueden darse las condiciones aceptables para aquella. En su sentido más amplio, la bioética no se limita al ámbito médico sino que incluye todos los problemas éticos que tienen que ver con la vida en general, extendiendo de esta manera su campo a cuestiones relacionadas con el medio ambiente y al trato debido a los animales. Considera también varios aspectos relacionados con la vida, tales como la información biológica y su patentabilidad, la privacidad biológica del individuo y las consideraciones que sustentan la inmoralidad de la clonación de seres humanos, entre otros.

Biofármaco

Fármaco o medicamento producido por biotecnología molecular, algunos mediante técnicas de ingeniería genética y transgenes (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, transgén, transgénico, ingeniería genética, fármaco, medicamento transgénico, medicamento, organismo vivo, salud, ausencia de daño).

Bioinformática

Disciplina que estudia de manera comparativa la información existente en las secuencias de moléculas biológicas informacionales. Está sustentada en el desarrollo de software para el análisis de secuencias e información generadas por las ciencias ómicas (ver ADN, ARN, ciencias ómicas, genómica, transcriptómica, proteómica, metabolómica, proteoma, genoma, metaboloma, transcriptoma, gen, proteína, metabolito, organismo vivo).

Bioinsecticida

Producto de origen biológico que se utiliza para el combate de plagas de insectos. Los bioinsecticidas o insecticidas biológicos son productos biodegradables. En las plantas transgénicas se incorporan transgenes con capacidades bioinsecticidas provenientes de bacterias que viven en la tierra, como el *Bacillus thuringensis*, y así generar plantas transgénicas que producen sus propios insecticidas contra plagas específicas de insectos y no requieren insecticidas químicos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.20, II.21, II.22, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, VI.2, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, *Bacillus thuringensis*, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, pesticida, biodegradable, planta transgénica, transgén, insecticida químico, plagas, contaminación, ausencia de daño, organismo vivo).

Biología

Ciencia que estudia los organismos vivos que conforman la biodiversidad del planeta.

Biología molecular

Disciplina mediante la cual se estudian los organismos vivos a nivel de sus moléculas. Esta rama de la biología surge con la identificación del ADN en 1953. Es una de las disciplinas en que se sus-

tenta la biotecnología moderna para contribuir al estudio de los organismos vivos (ver figuras II.1, II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.18, II.19, II.21, II.23, ADN, estructura general del ADN, ingeniería genética, bioquímica, biotecnología, biodiversidad, ingeniería bioquímica, organismo vivo).

Biología sintética

Conjunto de metodologías orientadas al diseño y construcción de organismos vivos, inicialmente bacterias, en los que se puedan eliminar el mayor número de genes no esenciales en una célula para garantizarle viabilidad, avanzando hacia la llamada "célula mínima". Posteriormente se pretende sustituir algunos de estos genes por otros sintetizados por química orgánica, o de otros orígenes, que codifiquen para proteínas que permitan varias y diferentes ventajas a la célula mínima. También se ha avanzado hacia el diseño de genomas mínimos completa o parcialmente sintéticos que puedan ser introducidos a una célula depleta de genoma original, buscando regresarle las capacidades de vida mediante genomas sintéticos. El primer ejemplo de uso de genes sintetizados por química orgánica funcionales se dio en las primeras bacterias transgénicas que produjeron somatostatina e insulina idénticas a las humanas. Gracias al uso de ADN sintetizado químicamente se han podido aislar, caracterizar y utilizar millones de genes de diferentes orígenes. Los organismos construidos mediante esta metodología pueden ser caracterizados a nivel molecular y con gran profundidad mediante las ciencias ómicas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.12, II.13, II.14, II.15, ADN, gen, bacteria, célula, oligonucleótido, síntesis química de ADN, cromosoma, genoma, metaboloma, ciencias ómicas, transgénico, insulina, medicamento transgénico, organismo vivo, ausencia de daño).

Biomasa

Es la masa celular que se genera en procesos fermentativos. En la biodiversidad, es la cantidad de materia celular viva presente en el planeta (ver figura II.20, organismo vivo, bacteria, biodiversidad).

Biomedicamento

Sustancia producida por procesos sustentados en la biotecnología molecular, algunos por ingeniería genética a través de organismos transgénicos y sus transgenes, la cual tiene efectos terapéuticos, preventivos o de rehabilitación. Usualmente tiene una presentación farmacéutica y se identifica como tal por su actividad farmacológica y sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Entre los biomedicamentos se encuentran la insulina, el interferón y la hormona humana del crecimiento de origen transgénico (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.16, II.17, II.18, II.19, fármaco, biofármaco, medicamento transgénico, transgén, ingeniería genética, organismo vivo, salud, ausencia de daño, insulina, interferón).

Biopesticida

Producto de origen biológico que se utiliza para matar insectos y malezas que integran las plagas. Es sinónimo de bioinsecticida para fines de este libro. Se refiere a la capacidad que una planta transgénica puede adquirir a través de transgenes para eliminar plagas de insectos a través de la incorporación de un gen foráneo que le confiera resistencia a la plaga. La resistencia se debe a los productos proteicos de los transgenes que codifican para proteínas que eliminan sólo insectos plaga y no otros (ver figuras II.21, II.22, II.24, III.1, III.2, III.8, III.9, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, V.7, VI.2, VI.4. ADN, bioinsecticida, plagas, planta transgénica, transgén, organismo vivo, beneficios de los transgénicos, ausencia de daño).

Biopolímero

Cadenas, collares o polímeros formados por monómeros o cuentas biológicas. Entre estos polímeros se encuentran las proteínas y los ácidos nucleicos ADN y ARN (ver ADN, ARN, monómero, polímero biológico, ácidos nucleicos, proteína, organismo vivo).

Bioprospección

Actividad cuyo objetivo es identificar productos biológicos útiles a partir de la biodiversidad. Se puede tratar de compuestos orgánicos, genes, proteínas u organismos completos (ver microorganismo, planta, animal, biodiversidad).

Bioquímica

Disciplina que estudia procesos químicos a nivel de los organismos vivos. Es una de las disciplinas en que se sustenta la biotecnología moderna para contribuir al estudio de los organismos vivos (ver figuras II.1, II.2, II.3, II.11, II.12, II.18, II.19, II.20, biotecnología, biología molecular, biodiversidad, célula, organismo vivo).

Biorremediación

Utilización de técnicas que implican el uso de organismos vivos o sus productos para la remediación biológica de un hábitat contaminado por uno o varios compuestos, como hidrocarburos o insecticidas químicos (ver figuras II.24, V.2, V.6, V.7, VI.4, bacteria, biodegradable, biopesticida, planta, hongo, recalcitrante, organismo vivo).

Bioseguridad

En el contexto de la biotecnología moderna es el marco jurídico, procedimientos, normas e instancias que garantizan el uso adecuado, responsable y con el menor riesgo posible para la salud humana, animal, vegetal y el medio ambiente de ciertos

tipos de productos y procesos de la biotecnología moderna, incluidos los organismos transgénicos y sus transgenes (ver figura X.2, riesgo biológico, inocuidad, ausencia de daño, transgénico, transgén, planta transgénica, seguridad de la biotecnología, monitoreo, beneficios de los transgénicos, organismo vivo, biotecnología moderna, plagas, Convenio sobre la Diversidad Biológica, Protocolo de Cartagena, LBOGM).

Biosfera

Conjunto de los seres vivos del planeta. Sinónimo de biota y biodiversidad.

Biota

Conjunto de animales y plantas del planeta. Sinónimo de biosfera y biodiversidad (ver biodiversidad, planta, animal, bacteria, organismo vivo).

Biotecnología

Toda aplicación tecnológica que utilice responsablemente recursos biológicos, organismos vivos y sus partes o productos para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos.

Biotecnología agroecológica

Área de la biotecnología que se encuentra en la interfase de disciplinas de tipo ecológico, ambiental, agrícola y evolutivo.

Biotecnología moderna

Actividad multidisciplinaria que busca contribuir al estudio de los organismos vivos mediante el conocimiento científico de frontera generado en diferentes disciplinas (biología molecular, ingeniería bioquímica, microbiología, inmunología, epigenética y ciencias ómicas, entre otras). Comprende un estudio profundo e integral y, a través de los cono-

cimientos generados, la manipulación responsable de los sistemas biológicos que componen la biota. La biotecnología moderna busca hacer un uso inteligente, respetuoso y sustentable de la biodiversidad mediante el desarrollo de tecnología biológica eficiente, limpia y competitiva para facilitar la solución de problemas en sectores tales como el de la salud, el agropecuario, el industrial y del medio ambiente. Los organismos transgénicos construidos por ingeniería genética son parte de la biotecnología moderna, diseñados para atender una serie de problemas y demandas que este libro trata en detalle (ver figuras II.1, II.2, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, II.23, III.1, III.2, III.8, III.9, IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, VI.2, VIII.1, VIII.2, VIII.3, ADN, ARN, ingeniería genética, beneficios de los transgénicos, medicamento transgénico, tecnología biológica, alimentos transgénicos, ausencia de daño, bioquímica, biología molecular, ciencias ómicas, epigenética, evidencia sustentada científicamente, producto recombinante, transgénico, transgén, planta transgénica, bacteria, procarote, planta, inocuidad, insecticida químico, bioinsecticida, plagas, biodiversidad, recalcitrante, carcinogénico, salud, insulina, interferón, organismo vivo, conocimiento científico, agricultura de precisión).

Bornavirus

Virus con ARN como material genético. Se ha detectado la presencia de su material genético en células animales (ver figuras IX.5, IX.6, IX.7, ARN, virus).

Botulismo

Enfermedad que causa una toxina de la bacteria *Clostridium botulinum* y que puede causar la muerte al hombre y a animales (ver figuras IX.8, IX.9, IX.10, bacteria, organismo patógeno).

Cáncer

Término genérico utilizado para nombrar el conjunto de enfermedades que pueden ocurrir prácticamente en cualquier tipo de tejido celular de organismos eucariotes y que se caracteriza por el crecimiento tumoral no controlado de células de ese tejido. Muchos insecticidas químicos son carcinogénicos y dañan la salud y el medio ambiente (ver figuras II.24, V.2, V.6, V.7, VI.4, célula, salud, organismo vivo, animal, eucariote).

Carbohidrato

Molécula de diferentes azúcares y sus polímeros, entre las que se encuentran la glucosa, fructosa, sacarosa, celulosa y almidón. Los organismos vivos lo utilizan como alimento (ver figuras IX.8, IX.9, IX.10, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, bacteria, planta, animal, organismo vivo, glucosa).

Carcinogénico

Sustancia o agente productor de cáncer. Los pesticidas son sustancias que se utilizan para eliminar plagas y varios de ellos son carcinogénicos y recalcitrantes; entre ellos, muchos insecticidas químicos que se utilizan para eliminar plagas de insectos. El uso de plantas transgénicas ha reducido notablemente el uso en el campo de insecticidas químicos con amplios beneficios, entre ellos la salud de los agricultores que ya no los emplean (ver figuras II.24, V.3, V.5, V.6, V.7, VI.4, cáncer, pesticida, insecticida químico, plagas, planta transgénica, recalcitrante, ausencia de daño, organismo vivo, salud).

Catabolismo

Capacidad celular mediante la cual es posible generar fuentes de energía biológica y precursores celulares a partir de cierto tipo de nutrientes como la glucosa y los carbohidratos (ver metabolismo, me-

taboloma, metabolómica, genoma, organismo vivo, transcriptoma, proteoma, carbohidrato, glucosa).

Catalítico

Proceso en el que un componente (catalizador) acelera la transformación de compuestos químicos en otros. El catalizador no se altera al final de la reacción, por lo que puede usarse repetidamente (ver figuras II.9, II.15, II.18, II.19, II.20, ARN, ribosoma, enzima, proteína).

Cas9

Proteína. Endonucleasa utilizada en técnicas de edición fina de ADN tipo CRISPR-Cas9 (ver figuras II.9, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, CRISPR-Cas9, ADN, edición fina de ADN, proteína).

Célula

Unidad fundamental de los organismos vivos que integran la biodiversidad. Las bacterias son organismos en su mayoría unicelulares mientras que plantas y animales, incluyendo humanos, tienen billones de células diferentes en sus organismos. Todas las células tienen ADN y ARN como moléculas en las que reside la información genética y codifican para las proteínas y los ARN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, IX.8, IX.9, IX.10, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, ADN, ARN, organismo vivo, bacteria, planta, animal, biodiversidad, biología sintética, proteína, glucosa).

Células competentes

Células que pueden incorporar material genético de otro origen (ver transformación, ADN, material genético).

Centro de origen

Se refiere al lugar o país donde se origina una determinada especie. México es centro de origen del

maíz y de otros vegetales (ver figura IX.21, planta, planta nativa, planta de maíz, planta transgénica, cultivares convencionales, organismo vivo).

Centrómero

Estructura que se encuentra aproximadamente en el centro de cada cromosoma de las células eucariotes, incluyendo animales y plantas que tienen núcleos en sus células (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.11, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN no codificante, cromosoma, gen, núcleo, telómero, proteína, célula, pares de cromosomas, organismo vivo, histonas, nucleosoma, epigenética, cromatina, marcas epigenéticas, metilación, lisina, citosina).

Cepa silvestre

Variación natural de un organismo vivo determinado. Su contraparte es una cepa mutante que contiene cambios particulares en su genoma (ver mutante, genoma, organismo vivo).

Ciencias ómicas

Conjunto de ciencias que caracterizan a detalle a los organismos vivos y sus componentes celulares a nivel molecular: genómica, proteómica, metabolómica y transcriptómica. La información resultante se analiza con el apoyo de la bioinformática. Las plantas transgénicas y sus padres convencionales han sido caracterizados utilizando ciencias ómicas sin haberse encontrado diferencias importantes entre ellas (ver figuras III.1, III.2, III.3, III.4, III.7, III.8, III.9, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, ADN, ARN, proteína, metabolito, genómica, proteómica, metabolómica, transcriptómica, biología sintética, bioinformática, organismo vivo, agricultura de precisión).

Cigoto

Huevo fertilizado por la fusión de dos células se-

xuales haploides. En el caso del humano, espermatozoide y óvulo. Después de la fusión de los gametos, el cigoto es ya una célula diploide por contener dos copias de cada gen, una proveniente del padre y otra de la madre (ver gameto, haploide, diploide, célula, organismo vivo).

Cisteína

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Es también un metabolito de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, metaboloma, metabolito, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia).

Citosina

Una de las cuatro bases nitrogenadas que conforman los nucleótidos que integran el ADN y el ARN. Uno de los metabolitos celulares. Ciertos residuos de citosina se pueden metilar en procesos epigenéticos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, metabolito, metaboloma, epigenética, metilación).

Clon

Conjunto de células, virus o moléculas de ADN genéticamente idénticas y que se originan de un solo padre (ver ADN, clonación molecular de ADN, colonia, célula, organismo vivo).

Clonación molecular de ADN

Conjunto de métodos que permite la incorporación y eventual amplificación, a través de su replicación repetida, de un fragmento específico (un transgén) de ADN en un organismo y su eventual transferencia a su progenie. Esta técnica permite obtener una población o clona de organismos en la cual todos

llevan una copia de la molécula original de ADN. Constituye uno de los procedimientos centrales de la ingeniería genética (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, ADN, ARN, cromosoma, gen, transgén, núcleo, ARN mensajero, transcripción, ingeniería genética, organismo genéticamente modificado, transgénico, planta transgénica, ausencia de daño).

Cloroplasto

Organelo intracelular de los vegetales en el que ocurre la fotosíntesis. Contiene clorofila. Tiene material genético propio y su estructura mantiene elementos que existen en las bacterias; por ello se considera que originalmente eran procariotes tipo bacteria (ver figura IX.14, organelo, mitocondria, célula, endosimbiosis, simbiogénesis, evolución de las especies, planta, bacteria, organismo vivo).

Codifica, codificar

Se refiere a la capacidad que tienen los genes para almacenar información que puede ser utilizada por la célula viva para sintetizar proteínas y ARN. Un gen almacena la información (codifica) para sintetizar una proteína o un ARN específico (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, ADN, ARN, gen, proteína, transcripción).

Código genético

El código genético es universal, es decir, es utilizado de la misma manera por todos los seres vivos. Este código es el que permite a la célula de cualquier organismo traducir en proteínas la información genética almacenada en los genes que se localizan en el ADN. Las proteínas son polímeros en los cuales cada aminoácido es un monómero. Hay 20 diferentes aminoácidos para integrar cerca de 100,000 proteínas del cuerpo humano. Se puede hacer una analogía entre las letras del alfabeto, que serían los

aminoácidos, y las palabras, que serían las proteínas: el orden de las letras es responsable del significado de las palabras de la misma manera que el orden de los aminoácidos en la proteína es responsable de su significado o función biológica. Cada uno de los 20 aminoácidos, a su vez, está codificado por un triplete o codón, de tres nucleótidos, en el ARN mensajero (o en el gen que dio origen a éste).

En un código de cuatro letras genéticas (A, G, C, y T) organizado en tripletes puede haber 64 tripletes distintos. De esta manera, en nuestro código genético hay aminoácidos que están codificados hasta por seis diferentes tripletes, como la leucina (Leu). Hay aminoácidos como el triptófano (Trp) que sólo está codificado por un solo triplete (en este caso TGG). Existen tres codones, TGA, TAA y TAG, que son tripletes que al leerse en los ribosomas son responsables de que se termine el proceso de traducción, es decir, en ese punto la síntesis de una molécula de proteína se finaliza y ésta se libera de los ribosomas para ser utilizada por la célula, de acuerdo con su función biológica (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, traducción, ARN de transferencia, codón, ribosoma, síntesis de proteína, proteína, organismo vivo).

Codón

Secuencia de tres nucleótidos presentes en el ADN o en el ARN y que codifica para un aminoácido específico durante la traducción del ARN mensajero en proteínas; también se le conoce como triplete y es exactamente el mismo en todos los seres vivos, desde bacterias hasta humanos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, ADN, ARN, cromosoma, gen, código genético, ARN mensajero, traducción, síntesis de proteínas, proteína, ARN de transferencia, ribosoma).

Coexistencia

Dicho para cultivos vegetales, existencia simultánea de cultivos transgénicos con cultivares convencionales. La evidencia señala que las plantas transgénicas coexisten con cultivares convencionales y no los dañan. De hecho, existe una agricultura de coexistencia entre cultivos transgénicos y los convencionales (ver figuras II.2, II.21, II.22, III.1, III.2, III.7, III.8, III.9, VI.2, planta transgénica, planta de maíz, bioseguridad, riesgo biológico, transgénico, organismo vivo, ausencia de daño).

Colágeno

Proteína que integra varios de los tejidos, en particular los de la piel de animales (ver figura II.9, proteína).

Cólera

Enfermedad gastrointestinal que puede ser mortal y es causada por la bacteria *Vibrio cholerae*. Puede ser tratada con antibióticos (ver figuras IX.9, IX.10, bacteria, organismo patógeno, antibiótico, organismo vivo, salud).

Colinearidad

Aplicado entre gen y producto proteico, se afirma que el orden de los nucleótidos en el gen, específicamente el orden de cada tres nucleótidos, es responsable del orden de los aminoácidos en la proteína para la que codifican el conjunto de nucleótidos que integran un gen en particular. La estructura final de las proteínas depende del orden a nivel primario, es decir, de la secuencia de los aminoácidos que la integran. Si este orden se altera la función de la proteína puede alterarse también. Asimismo, el orden de las mutaciones o cambios que ocurren en un gen da lugar estrictamente al mismo orden de cambios en los aminoácidos en la proteína que se obtiene a partir de dicho gen, es decir, hay colinearidad entre el

gen y su producto proteico (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.21, II.22, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, ADN, ARN, cromosoma, gen, proteína, núcleo, ARN mensajero, código genético, transcripción, traducción).

Colonia

Estructura que se genera por el crecimiento mediante duplicación o multiplicación de células microbianas. En una colonia todas las células (del orden de mil millones) son idénticas entre sí y a la célula que le dio origen (ver figuras IX.8, IX.9, IX.10, IX.11, bacteria, planta, animal, célula, bacteria, clon, organismo vivo).

Conformación

Arreglo tridimensional que adopta una molécula, incluyendo las de origen biológico como proteínas y ácidos nucleicos, en virtud de los diferentes ángulos de rotación que pueden adquirir sus enlaces químicos (ver figuras II.2, II.4, II.5, II.7, II.9, ADN, ARN, estructura general del ADN, proteína).

Conocimiento científico

Conocimiento que se genera a través del proceso de la investigación científica. Este conocimiento ha permitido comprender a detalle el funcionamiento del universo, la naturaleza y la vida misma, así como diferentes problemáticas científicas. La publicación del conocimiento científico en revistas debe garantizar las condiciones para que pueda ser repetido y así validarlo por otros grupos independientes. El conocimiento generado por los científicos debe publicarse en revistas arbitradas por expertos para validarlo. Es responsable de sustentar y desarrollar tecnologías, como la biotecnología, que han generado avances tecnológicos (ver evidencia sustentada científicamente, evaluación de riesgo, biotecnología).

Contaminación, contaminar

Proceso mediante el cual se puede hacer daño, alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales del medio ambiente o algunos de sus componentes, entre ellos los organismos vivos que conforman la biota. Muchos de los insecticidas químicos usados para eliminar plagas de insectos contaminan porque son recalcitrantes, no se descomponen ni son biodegradables y permanecen mucho tiempo en el medio ambiente. Algunos causan daño a la salud humana porque también son carcinogénicos. Asimismo, causan daño a animales, incluyendo insectos benéficos (en particular los polinizadores) ya que durante los procesos de fumigación éstos son eliminados de manera indiscriminada. Las plantas transgénicas, gracias al uso de genes bioinsecticidas que confieren resistencia a plagas de insectos, contribuyen a reducir el uso de insecticidas químicos. Es importante resaltar que los cultivares transgénicos *per se* no contaminan al medio ambiente, ni a las variedades de plantas nativas ni los cultivos convencionales que se utilizan actualmente en el campo mexicano y de muchos otros países. La evidencia indica que las plantas transgénicas coexisten sin causar daño o contaminación a las variedades comerciales que hoy se cultivan en varios países, en particular nueve iberoamericanos (ver figuras II.24, III.1, III.2, III.7, III.8, III.9, V.2, V.6, V.7, VI.2, VI.4, IX.20, IX.21, insecticida químico, fumigar, planta transgénica, plagas, bioinsecticida, transgénico, inocuidad, beneficios de los transgénicos, organismo vivo, medio ambiente, *Bacillus thuringensis*, ausencia de daño, salud).

Control genético

Elementos y mecanismos que participan en la regulación de la expresión de los genes (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, II.13, ADN,

ARN, expresión genética, promotor, gen, cromosoma, núcleo, cromatina, epigenética).

Convenio sobre la Diversidad Biológica

Acuerdo internacional sobre la diversidad biológica de la Organización de las Naciones Unidas, firmado por México, que norma el uso de organismos transgénicos, en particular el de las plantas transgénicas y sus productos derivados. Entró en vigor en 1993. Este convenio establece un acuerdo sobre la seguridad en torno a la biotecnología, o bioseguridad, entre los países que lo han firmado. Con base en lo anterior, en 2000 se estableció el Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología, el cual fue ratificado por México y entró en vigor en septiembre de 2003. Muchos países han firmado el Convenio sobre la Diversidad Biológica y el Protocolo de Cartagena y han desarrollado una legislación adecuada para el manejo de transgénicos (ver figura X.2, bioseguridad, beneficios de los transgénicos, seguridad de la biotecnología, riesgo biológico, plagas, inocuidad, ausencia de daño, Protocolo de Cartagena, Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur, LBOGM).

CRISPR-Cas9

CRISPR es un acrónimo del inglés de secuencias de ADN: *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeat*. Es un conjunto de técnicas desarrolladas recientemente que permiten la edición fina del ADN del genoma de los organismos vivos. En estas técnicas participan endonucleasas tipo Cas9 que tienen la capacidad de reconocer moléculas de doble hélice de ADN usando moléculas de ARN de hélice sencilla como guía que se asocia con el fragmento del ADN que se desea editar. Gracias a esta innovadora capacidad de enorme valor, Cas9 es capaz de romper las dos hebras del ADN en la región que hibridiza el ARN

de hélice sencilla que sirve como guía. Mediante este rompimiento del ADN en sus dos hebras la célula es capaz de reparar el ADN roto y en algunos casos generar mutaciones por eliminación o deleción de uno o más pares de bases del ADN roto. Lo anterior implica la inactivación del gen roto. Simultáneamente (si así se diseña) es posible insertar en el gen inactivado material genético de cualquier origen (transgén) con las características y funciones adecuadas en la célula blanco. De esta manera se atiende una de las preocupaciones de los grupos antitransgénicos, ya que a partir del uso de Cas9 u otra endonucleasa se construirán nuevos organismos genéticamente modificados, inactivando específicamente un gen o *locus* blanco, y la integración del transgén no se hará al azar. Algunos ejemplos de plantas en las que se han eliminado genes obtenidas con esta metodología se presentan en este libro. Estas nuevas plantas presentan ventajas de diferentes tipos (ver figuras II.2, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, transgén, transgénico, organismo vivo, edición fina de ADN, planta transgénica, agricultura de precisión, organismo genéticamente mejorado).

Cromatina (heterocromatina y eucromatina)

El primer grado de compactación o empaquetamiento del ADN en las células de eucariotes comprende la unión del ADN con un núcleo de ocho histonas: dos histonas de cada una de las siguientes familias: H3, H4, H2A y H2B. De manera similar a un carrete de hilo, aproximadamente 146 pares de bases de ADN se enrollan a un octámero de histonas. El complejo formado por el ADN y las histonas a lo largo de todo el genoma se denomina cromatina. El nucleosoma (ADN y un octámero de histonas) es la unidad básica, estructural y funcional de la cromatina. La histona H1, por otro lado, se une a la región de ADN comprendida

entre dos nucleosomas (ADN enlazador) y ayuda a estabilizar fibras de cromatina de orden superior. Cada cromosoma se encuentra formado por cientos de miles de nucleosomas. Los cromosomas poseen territorios formados por dos tipos de cromatina funcional y estructuralmente distintas: eucromatina y heterocromatina. La heterocromatina representa regiones tan densamente empaquetadas que resultan inaccesibles a los factores transcripcionales, por lo que se consideran transcripcionalmente inactivas o silenciadas. El estado silenciado de la heterocromatina se establece y perpetúa, generación tras generación, en regiones específicas como los centrómeros (regiones muy importantes para la división celular generalmente localizados en la región central de los cromosomas) y en los telómeros (extremos de los cromosomas que son regiones importantes para su integridad) durante cada ciclo celular. La eucromatina, por su parte, se encuentra mucho menos condensada (empaquetada), es muy accesible a los factores transcripcionales y es transcripcionalmente activa. La presencia de modificaciones en el nucleosoma permite distinguir químicamente a la heterocromatina de la eucromatina. Dichas modificaciones se establecen mediante la actividad de enzimas que modifican al ADN y las histonas. Las modificaciones o marcas epigenéticas incluyen la metilación del ADN (adición de grupos metilo en algunos nucleótidos que llevan las bases citosinas o adenina), modificaciones en residuos específicos de aminoácidos de las histonas (conocidos como modificaciones de la cromatina) e incorporación de variantes de histonas que están presentes durante un tiempo o en algún tejido específico y conforman nucleosomas más o menos propensos a la compactación. La deposición o establecimiento de las marcas en la cromatina, en algunos casos, requiere de la actividad de molé-

culas de ARN no codificantes largos y cortos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.11, II.14, IX.20, ADN, ARN, ARN no codificante, histonas, epigenética, marcas epigenéticas, cromosoma, gen, núcleo, telómero, control genético, nucleosoma, centrómero, metilación, citosina, lisina, eucariote, planta de maíz, planta transgénica, transgénico).

Cromosoma

Estructura celular localizada en el núcleo de las células en el caso de los organismos eucariotes. Está conformada por una sola molécula de ADN y proteínas asociadas como las histonas. Su tamaño y número varía según la especie. Puede tener desde medio millón de nucleótidos hasta varios cientos de millones. En ella se encuentran los genes como segmentos específicos que codifican para proteínas y ARN. Los humanos tenemos 23 pares de cromosomas mientras que los procariotes, como la bacteria *Escherichia coli*, tienen un solo cromosoma. Los extremos de los cromosomas de los organismos eucariotes se denominan telómeros; el centrómero es la estructura localizada aproximadamente en el centro del cromosoma. Las histonas participan en el empaquetamiento de las moléculas de ADN en cromosomas eucariotes; en el humano suman dos metros que deben ser empaquetados en el núcleo de una célula que tiene un diámetro de 10 micrómetros (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, IX.20, ADN, ARN, ARN no codificante, gen, procariote, núcleo, eucariote, ARN mensajero, transcripción, proteína, célula, pares de cromosomas, gameto, organismo vivo, histonas, centrómero, telómero, cromatina, nucleosoma, epigenética, marcas epigenéticas, metilación, lisina, citosina).

Cromosoma X

Tipo de cromosoma que está presente en dos copias en las células de organismos de género femenino y en una sola copia en organismos de género masculino (ver ADN, cromosoma, gameto).

Cromosoma Y

Tipo de cromosoma que está presente solamente en una sola copia en las células de organismos de género masculino (ver ADN, cromosoma, gameto).

Cultivares convencionales

Cultivos o sembradíos de plantas. Los cultivos de plantas tradicionales o convencionales han sido generados por diferentes técnicas que buscan incrementar la productividad o incorporar alguna otra propiedad interesante o importante. Las llamadas variedades de plantas nativas son aquellas originarias de algún lugar; México es centro de origen de algunas, como el maíz (ver figura II.21, planta, planta de maíz, planta transgénica, centro de origen, herbicida, insecticida químico, semilla híbrida, organismo vivo, ausencia de daño, agricultura de precisión, biotecnología moderna).

Delección

Fenómeno mediante el cual se pierde o se elimina un fragmento, o al menos un nucleótido, en secuencias de ADN. Este cambio genera una mutación (ver figura II.11, ADN, mutación, nucleótido, genotipo).

Desoxirribosa

Azúcar que forma parte de los desoxirribonucleótidos en los monómeros de la doble cadena del ADN. Uno de los metabolitos de la célula. Cada cadena de la doble hélice del ADN está unida covalentemente por desoxirribonucleótidos en la misma hebra. La cadena complementaria está unida por uniones de

puentes de hidrógenos entre nucleótidos que tienen bases complementarias: adenina (A) frente a timina (T) y guanina (G) frente a citosina (C). Esta estructura general es universal y compartida entre todos los seres vivos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, adenina, guanina, citosina, timina, doble hélice del ADN, nucleótido, metabolito, metabolito, cromosoma).

Diabetes

Enfermedad en la cual no se controla adecuadamente el nivel de azúcar en la sangre. En algunos casos se debe a una baja producción de insulina secretada por las células del páncreas. Ciertos tipos de diabetes se pueden tratar con insulina de origen transgénico que es idéntica a la humana (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, ADN, insulina, ingeniería genética, medicamento transgénico, biofármaco, enfermedad genética, salud).

Diagnóstico

También llamado detección, es el proceso de identificación de sustancias mediante el uso de anticuerpos o sondas (fragmentos específicos de ADN) que detectan proteínas o genes específicos (ver figura II.15, ADN, gen, PCR, oligonucleótido, monitoreo).

Diagnóstico genético

Metodología que permite detectar secuencias específicas de ADN entre millones de ellas mediante el uso de sondas o detectores de ácidos nucleicos específicos (ver figura II.15, ADN, gen, PCR, oligonucleótido).

Diferenciación celular

Proceso por el que se generan millones o trillones de células y luego tejidos y órganos con funciones

diferentes a partir del cigoto, según cada organismo (ver célula, cigoto, gameto, organismo vivo).

Diploide

Las células de la mayoría de los eucariotes contienen en sus organismos adultos dos copias de cada cromosoma y por ello son diploides. Cada una de estas copias proviene de una de las células sexuales (gametos), uno femenino y otro masculino, que se fusionan para integrar al cigoto (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.15, ADN, pares de cromosomas, célula, cromosoma, cigoto, gameto, haploide, histonas, eucariote, organismo vivo).

Diversidad biológica

Ver biodiversidad.

Doble hélice del ADN

El ADN es una molécula formada por dos hélices complementarias y antiparalelas. Esta estructura general está presente en todos los seres vivos. Cada hélice o hebra es a su vez un polímero de muchos nucleótidos. El ADN forma parte de los cromosomas y en los organismos eucariotes se compacta en los cromosomas en los núcleos, con el apoyo de las histonas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, histonas, ARN mensajero, transcripción, replicación, estructura general del ADN).

Duplicación

La duplicación de material genético en los genomas de organismos actuales es un evento que se presume ha ocurrido en precursores de los organismos actuales como la levadura y la planta *Arabidopsis thaliana*. Este evento ha permitido duplicar la cantidad de material genético original y, a

través del cambio por mutación en algunos genes, generar nuevas funciones (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, II.11, ADN, replicación, planta, gen, proteína).

Ébola

Virus también llamado del Ébola cuyo material genético está constituido por ARN. Se ha detectado la presencia de su material genético en células animales (ver figuras IX.5, IX.6, IX.7, ADN, ARN, influenza, virus).

Ecología

Ciencia que estudia las relaciones de los seres vivos entre sí y con su entorno (ver figura I.1, biodiversidad, biotecnología, organismo vivo, célula).

Ecosistema

Comunidad de seres vivos cuyos procesos vitales se encuentran relacionados entre sí y se desarrollan en función de los factores fisicoquímicos de un mismo ambiente (ver ecología, biodiversidad, organismo vivo).

Edición fina de ADN

Técnicas tipo CRISPR-Cas9 que permiten la edición fina del ADN de cualquier organismo, con la posibilidad de eliminar o deletar genes y/o construir genomas con transgenes insertados en sitios específicos. Al eliminar ciertos genes se pueden ganar o perder funciones. Hay ejemplos presentados en el libro que muestran que la eliminación de ciertos genes otorgó ganancias a las plantas tratadas (ver figuras II.2, II.4, II.5, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, ADN, cromosoma, gen, mutación, delección, transgén, ingeniería genética, organismo genéticamente mejorado, recombinación genética del ADN, organismo vivo, CRISPR-Cas9, agricultura de precisión).

Electroporación de ADN

Método para construir células de animales transgénicos. En este método la membrana celular es permeabilizada por un pulso eléctrico, lo cual permite la entrada de ADN heterólogo y posteriormente a su núcleo, generándose así la célula transformada genéticamente que incluye un transgén. Este método es posible gracias al fenómeno de transferencia horizontal de ADN y posterior reorganización del genoma del organismo receptor (ver figuras II.11, II.12, II.13, II.14, IX.19, ADN, gen, núcleo, transgén, transgénico, transferencia horizontal de ADN, organismo vivo).

Endosimbiosis

Relación en la cual un miembro de una especie vive muy cerca o incluso en el interior de otro miembro de otra especie en la así llamada relación endosimbiótica. Conjuntamente integran el simbiote. Este tipo de proceso desempeña un papel relevante en la evolución de las especies involucrando algunos de los actuales organelos de las células, como las mitocondrias y los cloroplastos (ver figuras IX.8, IX.9, IX.10, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, ADN, bacteria, planta, animal, mitocondria, cloroplasto, organelo, planta, simbiogénesis, evolución de las especies, teoría de la evolución de las especies, transferencia horizontal de ADN, transgénesis, organismo vivo).

Enfermedad genética

Resultado de alteraciones, normalmente por mutación, en uno o más genes que tiene como consecuencia una disfunción de los productos de estos genes. Algunas de estas enfermedades se pueden tratar con medicamentos de origen transgénico (ver figuras II.19, II.20, ADN, gen, insulina, diabetes, biofármaco, salud, medicamento transgénico).

Enzima

Proteína con actividad catalítica capaz de acelerar una reacción bioquímica para lograr la síntesis o modificación de compuestos biológicos en tiempos más cortos. Las moléculas que utilizan las enzimas se denominan sustratos. Muchas enzimas de origen transgénico se usan hoy en día en la industria alimentaria (ver figuras II.9, II.20, II.21, proteína, catalítico, lactasa, amilasa, sustrato).

Epigenética

Proviene de la combinación entre genética y epigenesis, esta última es la teoría que postula que un organismo adulto se desarrolla gradualmente a través del tiempo desde el cigoto (y no un organismo preformado contenido únicamente en él). Estudia los mecanismos que producen alteraciones en la expresión de los genes y los cambios en el fenotipo de organismos eucariotes mediante la modificación química del ADN (o adición de marcas epigenéticas) sin modificar la secuencia nucleotídica del genoma del organismo. La adición de marcas epigenéticas puede ocurrir en el ADN y en las proteínas llamadas histonas.

Las histonas desempeñan un papel muy importante en el proceso de empaquetamiento del ADN presente en los cromosomas de eucariotes para permitir la formación de nucleosomas, cromatina, heterocromatina y eucromatina. La adición de marcas epigenéticas en el ADN y en ciertos residuos de aminoácidos de las histonas modulan la formación de la eucromatina y la heterocromatina, y con ello la transcripción de ciertos genes.

La metilación del ADN es una marca epigenética evolutivamente conservada en animales y plantas que se asocia con el silenciamiento de genes y es esencial para el adecuado desarrollo de los organismos eucariotes. En los mamíferos la metilación de ADN ocurre casi exclusivamente

en los residuos de citosinas (C) del dinucleótido 5-CpG-3' (CpG es la forma de abreviar a la citosina (C) y guanina (G) unidas mediante un grupo fosfato como existen en el ADN). Se estima que entre el 70% y 80% de los dinucleótidos CpG presentes en el genoma humano se encuentran metilados (5-CmepG-3'). El dinucleótido CpG tiene un contexto simétrico, es decir, considerando que el ADN es una doble hélice, si una de las cadenas contiene 5-CpG-3', la hebra complementaria contiene a su contraparte inversa complementaria, 5-CpG-3'. La metilación de citosina en contextos no CG es muy rara en mamíferos. En contraste, en las plantas ocurre frecuentemente en ambos contextos simétricos (5-CpG-3' y 5-CpHpG-3') y en el contexto asimétrico (5-CpHpH-3'), donde H es cualquier nucleótido. En plantas y animales la metilación ocurre de manera secuencial. La metilación inicial de una secuencia de ADN (metilación de novo) requiere la actividad de las enzimas conocidas como "de novo ADN metiltransferasas". El patrón de metilación establecido por éstas puede ser mantenido o perpetuado por otra familia de ADN metiltransferasas, conocidas como ADN metiltransferasas de mantenimiento.

Durante la perpetuación de patrones de metilación en el contexto simétrico (5-CmepG-3' y 5-CmepHpG-3') la información posicional de la citosina metilada (Cme) se puede usar como molde para metilar las nuevas cadenas durante el proceso de replicación de ADN, ya que las cadenas complementarias contienen a su contraparte inversa complementaria (3-GpmeC-5' y 3-GpHpmeC-5', a manera de palíndromo). Mientras que nuestro entendimiento sobre los mecanismos de metilación y su perpetuación en el contexto asimétrico 5-CpHpH-3' en mamíferos es muy escaso, en las plantas se ha caracterizado a detalle la vía

de metilación de novo del ADN denominada “vía de metilación del ADN dependiente del ARN” (*RNA-dependent DNA methylation pathway* o RdDM, por sus siglas en inglés). Esta vía RdDM es la principal vía de regulación epigenética en plantas y emplea moléculas de ARN pequeños no codificantes (ARNpnc), generados a partir de secuencias repetidas y transposones presentes en el genoma como guías que proveen especificidad para establecer y perpetuar los patrones de metilación, inducir modificaciones de la cromatina y finalmente la formación de heterocromatina.

Las alteraciones epigenéticas pueden darse de manera natural. Existe un ejemplo muy conocido: el caso de la planta *Linaria vulgaris* de la que se describió una variedad epigenética (o epialelo) que cambia no sólo el fenotipo, sino la morfología con diferentes componentes estructurales, debido a la metilación del gen *Lyc C* sin cambiar la secuencia nucleotídica de este gen. Ésta es una de las primeras epivariantes o epialelos con cambios morfológicos importantes.

El maíz ha sido uno de los mejores sistemas para estudiar los mecanismos de regulación epigenéticos que operan en las plantas. El genoma del maíz se encuentra repleto de elementos móviles llamados transposones. Éstos son secuencias de ADN que poseen la capacidad de moverse o de brincar de lugar en el genoma. Existen diversas clases de transposones y cada uno de ellos utiliza estrategias diferentes para replicarse e incrementar su número en el genoma. Se dividen en dos grandes clases: los de clase I utilizan un intermediario de ARN y usan un mecanismo llamado “copia y pega”; los de clase II utilizan el proceso denominado “corte y pega” mediante el cual el transposón se mueve a otro lugar sin dejar copia. Los transposones activos son altamente mutagénicos y peligrosos para las plantas, puesto

que al brincar a una nueva posición en el genoma pueden inhabilitar o modificar la función de genes insertando su ADN en los genes (o cerca de ellos) y cambiando la secuencia nucleotídica del ADN después de la recombinación de los dos materiales genéticos. Pueden causar también rompimiento de los cromosomas, recombinación ilegítima y alteraciones en los procesos de expresión de ciertos genes cuando actúan como nuevos promotores.

Los transposones representan más del 83% del genoma del maíz y participan cotidianamente en la generación de nuevas variedades intraespecie. El maíz, al igual que otros vegetales y animales, posee sistemas para reconocer y mantener la gran mayoría de transposones en un estado de reposo transcripcional y de no movilización. Estos sistemas de silenciamiento se basan en la formación de heterocromatina en las regiones genómicas que poseen transposones y otros elementos genéticos repetidos mediante mecanismos de regulación epigenética (metilación de ADN y modificaciones de la cromatina). Las cruces entre cultivos tradicionales de maíz conllevan la confrontación de genomas con epigenomas distintos donde las nuevas plantas no han representado problemas para los agricultores ni para la alimentación humana o animal.

De la misma manera que los genes de un organismo silvestre o de una variedad convencional son regulados epigenéticamente, los transgenes integrados en organismos genéticamente modificados también pueden ser sujetos de regulación epigenética. El empleo de transgenes como herramientas moleculares ha sido esencial para entender la función y las bases moleculares de diversos mecanismos de regulación epigenética, incluyendo el descubrimiento del fenómeno de silenciamiento de genes en plantas (cosupresión) y el

descubrimiento de las bases moleculares del ARN interferente (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.21, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, IX.20, ADN, ARN, ARN no codificante, epialelo, nucleosoma, centrómero, telómero, cromatina, marcas epigenéticas, lisina, citosina, histonas, metilación, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, nucleótido, gen, fenotipo, metilación, expresión genética, transposón, transgénico, planta, planta de maíz, planta transgénica).

Epialelo

Alelo de un gen que muestra diferencias de expresión en individuos genéticamente idénticos debido a la adición de modificaciones químicas o marcas epigenéticas en el genoma. También se le conoce como epivariante (ver figura II.11, ADN, epigenética, histonas, marcas epigenéticas, cromosoma, cromatina, eucariote, genoma, planta).

Equivalencia sustancial

Concepto propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos que establece que un producto de origen transgénico comparte características nutricionales sustantivas y metabólicas similares a su contraparte convencional. La evidencia científica sustenta la equivalencia sustancial entre organismos transgénicos y convencionales. Las plantas transgénicas han sido caracterizadas a profundidad mediante ciencias ómicas y no se encuentran diferencias composicionales ni metabólicas entre cultivos tradicionales y transgénicos, por ello se afirma que son sustancialmente equivalentes (ver figuras III.1, III.2, III.3, III.4, III.7, III.8, III.9, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, riesgo biológico, transgénico, planta transgénica, ciencias ómicas, metabolismo, planta de maíz, inocuidad, beneficios de los transgénicos,

organismo vivo, alimentos transgénicos, ausencia de daño, salud, inocuidad).

Escherichia coli (*E. coli*)

Bacteria que ha sido ampliamente estudiada y que se utiliza como modelo de procarionte en laboratorios e industria para la producción de medicamentos de origen transgénico como la insulina, el interferón y otros productos de interés comercial. Se ha determinado la secuencia nucleotídica de su único cromosoma, el cual consta de 4,225 genes (ver figuras II.12, II.13, II.14, IX.8, IX.9, IX.10, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, ADN, gen, insulina, interferón, medicamento transgénico, transgénico, transgén, bacteria, procarionte, planta, animal, producto recombinante, organismo vivo).

Estructura general del ADN

Conformación tridimensional de la molécula de ADN que es la misma en todos los seres vivos. El ADN está conformado por dos polímeros complementarios (dos hélices antiparalelas) donde cada uno de ellos está integrado a su vez por cuatro tipos de nucleótidos, que son monómeros que integran las dos hélices. Al asociarse en el espacio y debido a las características de su estructura, se conforman tridimensionalmente y forman una doble hélice cuya estructura general es exactamente la misma en todos los seres vivos, desde bacterias hasta humanos. Esta característica ha permitido la construcción de organismos transgénicos por transferencia horizontal de ADN, ya que permite la incorporación de material genético del transgén, el cual tiene la misma estructura general, en el genoma de la célula receptora mediante la recombinación de material genético de diferentes orígenes (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, polímero biológico, cro-

mosoma, gen, núcleo, ingeniería genética, transferencia horizontal de ADN, transgénico, planta transgénica, transgén, transcripción, replicación, doble hélice del ADN, conformación, nucleótido).

Estructura proteica

Conformación tridimensional que tiene una proteína en ciertas condiciones fisiológicas en la célula. La estructura le permite funcionar en algunos casos como enzima (ver figuras II.9, II.20, proteína, enzima, célula).

Eucariote

Organismo vivo, como plantas y animales, que a diferencia de los procariotes (que incluyen las bacterias) tiene núcleos en sus células donde se encuentran sus genes en el ADN en varios cromosomas. Son organismos que pueden estar conformados por una sola célula, como la levadura, o por varias células, como las plantas y los animales (ver figuras II.2, II.4, II.5, II.11, II.13, II.14, II.15, IX.10, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, ADN, cromosoma, histonas, gen, procariote, núcleo, bacteria, planta, animal, organismo vivo, glucosa, epigenética, agricultura de precisión).

Evaluación caso por caso

En el contexto de la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados, indica que la evaluación de los OGM debe hacerse de manera individual. No es adecuado generalizar la evaluación de un transgénico para otros (ver bioseguridad, riesgo biológico, transgénico, planta transgénica, LBOGM).

Evaluación paso por paso

Se refiere a la evaluación que contempla Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados, la cual determina que en los procesos

de posible liberación de un OGM se debe realizar la evaluación en diferentes niveles o pasos: 1. invernadero, 2. sembradíos pequeños con liberación experimental, y 3. sembradíos a mayor escala (ver figura X.2, liberación al medio ambiente, riesgo biológico, bioseguridad, transgénico, planta transgénica, plagas, LBOGM).

Evaluación de riesgo

Estrategias y protocolos que permiten valorar, conforme a la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados y el Protocolo de Cartagena, procedimientos sustentados en conocimiento científico sólido sobre la evidencia de posibles riesgos por uso de OGM (ver figura X.2, Convenio sobre la Diversidad Biológica, Protocolo de Cartagena, LBOGM, riesgo biológico, bioseguridad, plagas, conocimiento científico, transgénico, planta transgénica).

Evidencia sustentada científicamente

Conjunto de datos sustentados científicamente a través de su publicación en revistas arbitradas de circulación internacional. Los datos publicados en revistas deben poder ser repetidos por grupos independientes para ser validados, en particular en los casos de riesgo e inocuidad. Posteriormente los datos de la investigación pueden ser incorporados en libros y otros documentos elaborados por academias de ciencias y otras instancias como la Organización Mundial de la Salud y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, entre otras (ver figuras III.1, III.2, III.3, III.4, III.5, III.6, III.7, III.8, III.9, IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.9, IV.10, IV.11, VI.2, bioseguridad, riesgo biológico, beneficios de los transgénicos, ausencia de daño, inocuidad, coexistencia, biotecnología, conocimiento científico).

Evolución de las especies

Proceso biológico mediante el cual las células y los organismos adquieren nuevas funciones por cambios genéticos (mutación), adquisición de material genético por transferencia horizontal, reorganización del genoma o endosimbiosis. Como resultado de estas nuevas funciones los organismos pueden estar mejor capacitados para llevar a cabo sus funciones biológicas y prevalecer en un medio en el cual se compite entre muchos otros organismos. La teoría de la evolución de Darwin señala que todos los organismos existentes tenemos un precursor común y que a través de la evolución se ha desarrollado la biodiversidad del planeta, incluida la especie humana. La información científica presentada en este libro sustenta que la transferencia horizontal de ADN ha desempeñado un papel relevante en la evolución de las especies, permitiendo que funciones como la fotosíntesis se hayan transferido de bacterias a plantas en algún momento de la evolución. La endosimbiosis también ha desempeñado su parte en el proceso vía la transferencia horizontal de precursores de organelos como mitocondrias y cloroplastos a precursores de las plantas y animales actuales. El proceso de transferencia horizontal que ocurre en la biota es independiente de los organismos transgénicos, pero se utiliza en su construcción (ver figuras II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, ADN, teoría de la evolución de las especies, biodiversidad, transferencia horizontal de ADN, mutación, reorganización del genoma, endosimbiosis, cloroplasto, bacteria, gen, fotosíntesis, transgénico, planta transgénica, organismo vivo).

Expresión genética

Sensores y mecanismos mediante los cuales las células vivas deciden expresar (o no) un gen para

transcribir o sintetizar el ARN mensajero y, a partir de éste, sintetizar la proteína en particular codificada por ese gen. Los mecanismos que regulan la expresión de la información genética de un organismo le permiten adaptarse con rapidez a los cambios del medio ambiente. En principio, los genes funcionan (o se expresan) únicamente cuando el organismo lo requiere y así proporcionan el producto proteico para el cual codifican y sólo en aquellas células que lo requieren. Existen también marcas epigenéticas que modulan la expresión de los genes (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, promotor, operador, epigenética, estructura general del ADN, genoma, proteoma, eucariote, organismo vivo, histonas, marcas epigenéticas, metilación, lisina).

Exón

Parte de los genes de organismos eucariotes que codifican para un segmento de la proteína cuya información está almacenada en ese fragmento de ese gen. Los genes en las células con núcleos están formados por exones (que codifican para partes de proteína) e intrones o regiones que no codifican para proteína (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.9, II.10, II.11, ADN, eucariote, núcleo, gen, intrón, proteína, transcripción, ARN mensajero).

Fármaco

Sustancia con actividad biológica que se identifica por sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y que reúne las condiciones para ser empleada como principio activo de un medicamento (ver figuras II.18, II.19, II.20, biofármaco, medicamento, medicamento transgénico, salud, biomedicamento, insulina, interferón, hormona humana del crecimiento).

Fenilalanina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma).

Fenotipo

Se refiere a la manifestación observable de un determinado genotipo. A un genotipo corresponde un fenotipo. Por ejemplo, a la presencia de un gen productor de melanina en grandes cantidades (genotipo), corresponde una coloración oscura de la piel (fenotipo) (ver gen, genotipo, mutación, ADN, organismo vivo, eucariote, histonas, epigenética, marcas epigenéticas, metilación).

Fermentación

Término utilizado para explicar el proceso mediante el cual las células bacterianas o eucariotes son capaces de multiplicarse en un medio de cultivo sintético o semisintético adecuado y producir sustancias (muchas de ellas de valor comercial) como cerveza, pan, antibióticos y más recientemente proteínas recombinantes como la insulina idéntica a la humana. Materia de la ingeniería bioquímica (ver figuras II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.23, ADN, bacteria, transgénico, inocuidad, ausencia de daño, quimosina, evidencia sustentada científicamente, riesgo biológico, amilasa, lipasa, planta transgénica, biomasa, antibiótico, insulina, producto recombinante, organismo vivo).

Flujo génico

También llamado flujo genético, proceso mediante el cual un gen o conjunto de genes se transfiere de una población a otra. En los vegetales, el polen

constituye un vehículo principal de movilidad de genes de unas plantas a otras. No hay evidencia de daño por el flujo génico mediado por el polen transgénico (ver figura VI.2, riesgo biológico, ecología, bioseguridad, planta, transgénico, organismo vivo).

Fotosíntesis

Proceso mediante el cual las plantas y ciertas bacterias son capaces de sintetizar compuestos biológicos y biomasa utilizando luz solar como fuente de energía (ver figuras IX.11, IX.12, IX.14, planta, cloroplasto, organelo, organismo vivo).

Fumigar

Procesos que se utilizan en el campo y en otros entornos para eliminar plagas de insectos o de malezas que crecen en cultivos mediante dispositivos que dispersan insecticidas y herbicidas. Muchos insecticidas químicos dañan a la salud y son carcinogénicos. En la búsqueda de mayor sustentabilidad es necesario reducir los procesos de fumigación, ya que muchos insecticidas químicos contaminan el medio ambiente en diferentes nichos del planeta y son carcinogénicos. Los cultivos transgénicos han permitido reducir la fumigación y el uso de insecticidas químicos, siendo éste uno de sus grandes beneficios (ver figuras II.21, II.24, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, VI.4, insecticida químico, herbicida, plagas, planta, planta nativa, planta transgénica, cultivos convencionales, contaminación, organismo vivo, beneficios de los transgénicos).

Función biológica

El papel que lleva a cabo una molécula biológica, como las proteínas o los ácidos nucleicos, para que la célula pueda llevar a cabo su metabolismo (ver ADN, ARN, proteína, síntesis de proteínas,

metabolismo, metaboloma, célula, organismo vivo).

Gameto

Células haploides (que contienen una sola copia de cada gen) de animales y plantas capaces de fusionarse y formar un cigoto o huevo del cual surge el descendiente. En animales superiores el gameto masculino es el espermatozoide y el óvulo es el gameto femenino (ver célula, replicación de ADN, ADN, cigoto, organismo vivo).

Gen

Segmento de ADN en los cromosomas de los organismos vivos en el cual reside la información para sintetizar una o varias moléculas de proteínas a partir del tipo de ARN transcrito. En los organismos eucariotes, además de las secuencias codificadoras llamadas exones, muchos genes contienen secuencias no codificadoras como los intrones y las regiones reguladoras. Los genes son secuencias de cuatro tipos de nucleótidos que integran el ADN. El orden o la secuencia de los nucleótidos, de tres en tres (tripletes o codones), es responsable del orden de los aminoácidos en las proteínas. Este orden de los nucleótidos se “transcribe” en una molécula de ARN mensajero y es “traducida” en una proteína en los ribosomas de la célula. Existen también muchos genes que codifican para moléculas de ARN que no se traducen en proteínas, entre estos los ARN que forman parte de los ribosomas y los ARN de transferencia que se utilizan en la síntesis de proteínas. Otros segmentos de ADN codifican para otras moléculas de ARN de diferentes tamaños y funciones, algunos están involucrados en la regulación epigenética del genoma. El conjunto de genes que contiene un organismo vivo se denomina genoma y su estudio, genómica. Todos los organismos transgénicos

tienen genes de otros orígenes que se denominan transgenes (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, cromosoma, genoma, genómica, núcleo, ARN mensajero, transcripción, colinearidad, nucleótido, transcripción, exón, intrón, proteína, célula, estructura general del ADN, transgénico, eucariote, núcleo, transgénico, planta transgénica, organismo vivo, histonas, marcas epigenéticas, metilación, epigenética, epialelo).

Gen estructural

Fragmento específico de material genético donde reside la información para una proteína. La regulación de los genes se logra a través de secuencias específicas de ADN que están en las regiones previas a los genes, conocidas como regiones 5' (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, exón, intrón, promotor, operador, gen regulador, procesamiento de ARN).

Genes terminadores

Genes que pueden impedir la germinación de las semillas de un cultivo que los tenga como parte de su genoma. El Comité de Biotecnología de la AMC ha condenado su uso por considerarlos un arma biológica contra las plantas y están prohibidos por la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (ver figuras X.2, X.4, riesgo biológico, LBOGM, bioseguridad).

Genética

Disciplina que inicia formalmente en 1860 con los experimentos de Gregor Mendel, orientados al estudio de la manera en que funcionan y están

organizados los genes en la célula viva y de cómo se transmiten las características de padre a hijo (ver figuras II.1, II.2, II.3, II.4, II.5, II.11, ADN, gen, cromosoma, transferencia vertical de ADN, gameto, cigoto, organismo vivo).

Gen regulador

Secuencia de ADN que lleva la información para una proteína que participa en los fenómenos de regulación de la expresión genética (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, gen estructural).

Genoma

Conjunto de material genético de ADN que tiene un organismo vivo en cada una de sus células, incluyendo los genes que son segmentos específicos de ADN. En el caso de las bacterias es el material genético presente en su único cromosoma. En el caso del ser humano es el material genético presente en nuestros 23 pares de cromosomas con más de 21,000 genes en todas las células del cuerpo, con excepción de los gametos (esperma y óvulo) que tienen sólo una copia de cada uno de los 23 cromosomas. El genoma incluye también los genes que se encuentran en mitocondrias en el caso de los animales, y en cloroplastos y mitocondrias en el caso de las plantas. El estudio de los genomas se lleva a cabo mediante la genómica; existe regulación epigenética del genoma (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, genómica, epigenética, ARN mensajero, transcripción, cromosoma, gen, gameto, haploide, pares de cromosomas, virus, histonas, epigenética, epialelo, organismo vivo).

Genómica

Una de las ciencias ómicas cuyo objetivo es caracterizar a nivel molecular el material genético de las células vivas. Análisis del conjunto de todos los genes y sus regiones reguladoras (promotores, terminadores, operadores y espaciadores) en un organismo vivo. El análisis incluye la determinación de la secuencia de los nucleótidos que integran el genoma del organismo. A la fecha, hay miles de organismos a los que se ha determinado la secuencia nucleotídica de todas sus moléculas de ADN residentes en cromosomas y organelos (mitocondrias y cloroplastos). La bacteria *Escherichia coli* tiene poco más de un millón de pares de nucleótidos en su genoma y poco más de 4,000 genes. La raza humana tiene alrededor de 3,300 millones de pares de nucleótidos en los 23 pares de cromosomas de su genoma que incluyen alrededor de 21,000 genes. El análisis de la expresión de los genes en diferentes condiciones metabólicas se lleva a cabo mediante las otras ciencias ómicas, transcriptómica, proteómica y metabolómica (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, ciencias ómicas, secuenciación de ADN, proteómica, metabolómica, transcriptómica, mitocondria, cloroplasto, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, genoma, *Escherichia coli*, pares de cromosomas, organismo vivo, epigenética).

Genómica comparada

Conjunto de métodos utilizados para analizar y comparar los genomas de diferentes organismos (ver bioinformática, genoma, genómica).

Genómica funcional

Estudio de la función de los genes de un organismo y de la organización y control de las diversas

redes genéticas que establecen su fisiología (ver genoma, genómica, bioinformática).

Genotipo

Denomina al componente genético de un determinado individuo o variedad. Se refiere, en última instancia, a la secuencia de su genoma. La expresión del genotipo es el fenotipo (ver ADN, fenotipo, genoma, organismo vivo).

Glicina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma).

Glifosato

Herbicida que se utiliza para eliminar plagas de malezas que aprovechan los nutrientes de los cultivos. Es un herbicida de muy baja toxicidad y por ello se sigue utilizando en muchos países, ya que las agencias reguladoras de la inocuidad y seguridad alimentaria no han cambiado las condiciones para su utilización. Ciertamente su uso irresponsable, por ejemplo, incrementando la frecuencia de su uso o la concentración aprobada, puede causar daño a la salud y al medio ambiente (ver figuras II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.24, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.9, V.1, V.2, V.3, V.7, V.9, VI.2, VI.4, herbicida, plagas, planta transgénica, insecticida químico).

Glucosa

Azúcar que forma parte de los carbohidratos presentes en los alimentos y que es utilizada por los seres vivos para producir energía biológica (ATP), precursores celulares y así crecer y reproducirse.

Uno de los metabolitos de la célula viva (ver carbohidrato, célula, ATP, metabolito, metaboloma, catabolismo, organismo vivo).

Glutamina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma).

Guanina

Una de las cuatro bases nitrogenadas que conforman los nucleótidos que integran el ADN y el ARN. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, metabolito, metaboloma).

Haploide

Los gametos de los organismos superiores (espermatozoide y óvulo) tienen sólo una copia de cada cromosoma y por ello son haploides. Al fusionarse generan un cigoto que tiene dos pares de cada cromosoma. El cigoto es diploide por estas razones y lleva dos copias de cada cromosoma. Las bacterias son haploides ya que sólo tienen una copia de cada gen y un solo cromosoma (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.11 cromosoma, ADN, diploide, cigoto, genoma, bacteria, organismo vivo).

Herbicida

Sustancia química que se utiliza para eliminar las plagas de malezas que crecen conjuntamente con los cultivos convencionales y las plantas transgénicas. Las plantas transgénicas llevan un gen que confiere resistencia a herbicidas y por ello no se eliminan al ser fumigadas con herbicidas químicos

como el glifosato, el cual se utiliza extensamente en todo el planeta para eliminar malezas. Las plantas transgénicas tienen el beneficio de no requerir insecticidas químicos para eliminar las plagas de insectos, aunque los herbicidas de tipo químico para eliminar malezas se siguen usando (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.21, II.22, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, transgén, transgénico, planta transgénica, insecticida químico, bioinsecticida, glifosato, ingeniería genética, plagas, organismo vivo, ausencia de daño).

Herramientas moleculares

Conjunto de moléculas de tipo biológico que normalmente tiene la célula viva para llevar a cabo sus funciones para el manejo de sus propios ácidos nucleicos. Estas moléculas son utilizadas *in vitro* por el biólogo molecular para manipular el material genético de las células. Entre estas herramientas, así como entre las nuevas de la edición fina de ADN, están los plásmidos y enzimas que modifican y polimerizan los ácidos nucleicos (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, ADN, plásmido, ácidos nucleicos, ingeniería genética, clonación molecular de ADN, organismo vivo).

Heterólogo

Se refiere al material genético de un origen diferente al de la célula receptora. Se le llama también así al ADN pasajero o transgén que se incorpora a través de un vector en la célula mediante técnicas de transferencia horizontal de ADN, incluyendo aquellas de ingeniería genética (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, transgén, transgénico, planta transgénica, ingeniería genética, plásmido, herramientas moleculares, transferencia horizontal de ADN).

Heterótrofo

Organismo que no produce su propia comida (ver bacteria, planta, animal, organismo vivo).

Hibridación

Aplicado a los ácidos nucleicos, significa su capacidad de encontrar o asociarse a la hebra de ADN opuesta o complementaria. Se utiliza en las nuevas técnicas de edición de ADN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, ADN, ARN, replicación, ácidos nucleicos, edición fina de ADN, PCR).

Hidrólisis enzimática

Proceso mediante el cual las enzimas rompen uniones covalentes (unionen de tipo fuerte) de otras proteínas, carbohidratos, ácidos nucleicos y otras moléculas biológicas (ver figuras II.9, II.20, enzima, proteína, catalítico, quimosina, tripsina, lipasa, lactasa).

Histonas

Las histonas desempeñan un papel primordial en el compactamiento del ADN en los cromosomas de células de eucariotes y su modificación química, como parte de las señales epigenéticas para permitir o no la expresión de genes específicos. Son un tipo de proteínas pequeñas con carga positiva que se encuentran en los cromosomas, en núcleos de células eucariotes, incluyendo animales y plantas. En el caso de los humanos el ADN de los cromosomas suma aproximadamente dos metros en el interior del núcleo, que tiene un diámetro de 10 micrómetros. Las histonas H1, H2A, H2B, H3 y H4, por su carga positiva, se unen fuertemente al ADN que posee carga negativa. El primer grado de compactación o empaquetamiento del ADN comprende la unión del ADN con un núcleo de ocho histonas (dos histonas de cada una

de las siguientes familias: H3, H4, H2A y H2B). De manera similar a un carrete de hilo, aproximadamente 146 pares de bases de ADN se enrollan a un octámero de histonas. El complejo formado por el ADN y las histonas a lo largo de todo el genoma se denomina cromatina. El nucleosoma (ADN y un octámero de histonas) es la unidad básica, estructural y funcional de la cromatina. La histona H1, por otro lado, se une a la región de ADN comprendida entre dos nucleosomas (ADN enlazador) y ayuda a estabilizar fibras de cromatina de orden superior. Cada cromosoma se encuentra formado por cientos de miles de nucleosomas. Los cromosomas poseen territorios formados por dos tipos de cromatina funcional y estructuralmente distintas: la eucromatina y la heterocromatina. La heterocromatina representa regiones tan densamente empaquetadas que resultan inaccesibles a los factores transcripcionales, por lo que se consideran transcripcionalmente inactivas o silenciadas. El estado silenciado de la heterocromatina se establece y perpetúa, generación tras generación, en regiones específicas como los centrómeros (regiones muy importantes para la división celular, generalmente localizados en la región central de los cromosomas) y los telómeros (extremos de los cromosomas que son regiones muy importantes para su integridad), durante cada ciclo celular. Por otro lado, la eucromatina se encuentra mucho menos empaquetada y es muy accesible a los factores transcripcionales, por lo que es transcripcionalmente activa. La presencia de modificaciones químicas en el nucleosoma permite distinguir a la heterocromatina de la eucromatina. Dichas modificaciones se establecen mediante la actividad de enzimas que modifican al ADN y las histonas. Las modificaciones, o marcas epigenéticas, incluyen la metilación del ADN (adición de grupos metilos en algunos nucleótidos que llevan las bases cito-

sina o adenina), las modificaciones en residuos específicos de aminoácidos de las histonas (conocidos como modificaciones de la cromatina) y la incorporación de variantes de histonas que están presentes durante un tiempo o en algún tejido específico y conforman nucleosomas más o menos propensos a la compactación. La deposición o establecimiento de las marcas en la cromatina, en algunos casos, requiere de la actividad de moléculas de ARN no codificantes largos y cortos.

La transcripción de un gen requiere de la apertura y separación temporal de las dos hélices del ADN para permitir el acceso a factores transcripcionales, ARN polimerasas encargadas de copiar (transcribir) el ADN en ARN y otras proteínas, por lo que la presencia de nucleosomas junto con el plegamiento de la cromatina representa una barrera para la transcripción. El establecimiento de las marcas epigenéticas regula la formación de la heterocromatina y/o eucromatina a lo largo del cromosoma de una manera dinámica. Es decir, regulando epigenéticamente el grado de compactación del ADN se puede modular el acceso al genoma y por ende a la expresión de los genes. Los principales sitios de modificación en las histonas corresponden a residuos específicos de lisina (K) en las histonas H3 y H4. Mientras que la acetilación de la lisina en estas histonas generalmente correlaciona con un estado de activación transcripcional temporal, la metilación de lisinas específicas correlaciona con la activación o represión transcripcional, dependiendo de la ubicación de la lisina que se haya metilado. Por ejemplo, la acetilación de la lisina 9 de la histona H3 (H3K9ac) y la metilación de la lisina 4 de la histona H3 (H3K4me) son modificaciones características de regiones transcripcionalmente activas o eucromatina, mientras que la metilación del residuo de lisina 9 de la histona H3 (H3K9me)

es característico de regiones transcripcionalmente silenciadas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, ARN no codificante, nucleosoma, centrómero, telómero, cromatina, epigenética, marcas epigenéticas, lisina, citosina, metilación, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, nucleótido, eucariote, fenotipo, metilación, expresión genética, transposón, transgénico, planta, planta de maíz, planta transgénica, epialelo).

Histidina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia).

Hongo

Grupo de organismos saprófitos, eucariotes, responsables de muchos de los procesos de biodegradación de compuestos y moléculas provenientes de otros organismos (ver biodiversidad, bioinsecticida, pesticida, recalcitrante, biodegradable, eucariote, organismo vivo).

Hormona humana de crecimiento

Proteína producida en la glándula pituitaria que regula el crecimiento de diferentes tejidos. Actualmente se produce como medicamento transgénico idéntica a la humana por medio de técnicas de ingeniería genética, usando los transgenes correspondientes. Se utiliza en el tratamiento clínico del enanismo (ver figuras II.12, II.13, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, ADN, fármaco, biofármaco, medicamento, insulina, interferón, transgénico, medicamento transgénico, transgén, ausencia de daño, producto recombinante, organismo vivo, salud).

In vitro

Se refiere a condiciones experimentales en las que no existen células ni organismos vivos. Son las condiciones dadas en un tubo de ensayo (ver ingeniería genética, ADN recombinante).

In vivo

Se refiere a condiciones experimentales que utilizan células u organismos vivos (ver célula, organismo vivo).

Infección

Mecanismo que utilizan los microbios patógenos (virus, bacterias, hongos) para invadir y multiplicarse en el organismo infectado. En algunos casos la infección puede causar la muerte (ver figuras IX.5, IX.6, IX.7, IX.8, IX.9, bacteria, virus, organismo patógeno, organismo vivo, salud).

Influenza

Virus patógeno causante de la enfermedad respiratoria conocida con el mismo nombre. Existen diferentes variedades de este virus. Recientemente apareció el virus de la influenza AH1N1 que generó una pandemia en el año 2009. El genoma de ARN de este virus está formado por segmentos derivados de tres variedades de virus, típicamente de humanos, cerdos y aves, producto de recombinación genética (ver figuras IX.5, IX.6, IX.7, ARN, virus, salud, patógeno, infección, zoonosis, recombinación genética del ADN).

Ingeniería bioquímica

Disciplina que utiliza el conocimiento en ingeniería y en bioquímica con fines de producción industrial de bienes y servicios basados en seres vivos y sus partes. Es una de las disciplinas en las que se sustenta la biotecnología moderna para contribuir al estudio y aprovechamiento respon-

sable de la biodiversidad (ver figuras II.1, II.2, II.18, II.19, II.20, biotecnología moderna, ADN, transgénico, alimentos transgénicos, medicamento transgénico, beneficios de los transgénicos, bioquímica, organismo vivo, salud)

Ingeniería celular

Conjunto de metodologías que permiten la manipulación de la información genética, así como de las vías metabólicas de un organismo vivo, para redireccionar la maquinaria celular con miras a producir o incrementar la síntesis de moléculas biológicas específicas de interés comercial, como los biomedicamentos insulina y hormona humana del crecimiento (ver célula, vía metabólica, macromolécula biológica, biotecnología, organismo vivo).

Ingeniería genética

Conjunto de métodos y herramientas moleculares que se utilizan para manipular *in vitro* el material genético (ADN y ARN) de los organismos vivos y construir organismos transgénicos mediante transgenes. La ingeniería genética es sinónimo de metodología de ADN recombinante, con la que se han creado organismos transgénicos mediante el proceso de transferencia horizontal de ADN y su posterior reorganización con el genoma de la célula receptora. El término "biogenética" es erróneo y no debe utilizarse. La ingeniería genética ha potenciado decisivamente la biotecnología moderna, ya que gracias a ella es posible transferir transgenes con características importantes a las células receptoras para contender con demandas, necesidades y problemas (ver figuras I.1, II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, IX.17, IX.18, IX.19, IX.20, ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero,

transcripción, reorganización del genoma, infección, integración de ADN heterólogo, transformación, influenza, clonación molecular de ADN, ADN recombinante, herramientas moleculares, plásmido, *Agrobacterium tumefaciens*, biobalística, transgénico, transgén, planta transgénica, organismo genéticamente modificado, biotecnología moderna, beneficios de los transgénicos, organismo vivo, ausencia de daño, biología sintética, síntesis química de ADN, transferencia horizontal de ADN, plagas).

Ingeniería de vías metabólicas

Conjunto de metodologías que permite la modificación dirigida de las vías metabólicas de biosíntesis y degradación de compuestos biológicos en los organismos vivos, buscando optimizar la utilización de las fuentes alimentarias y su conversión dirigida a moléculas de origen biológico importantes económicamente (ver ADN, ingeniería genética, ciencias ómicas, metabolismo, metaboloma, genómica, transcriptómica, proteómica, célula, organismo vivo).

Inmunógeno

Sustancia extraña a un organismo capaz de desencadenar una respuesta inmune en animales superiores.

Iniciador

Molécula de ADN de hélice sencilla (oligonucleótido), de bajo peso molecular con pocos nucleótidos, que se utiliza como elemento iniciador para comenzar la síntesis de ADN complementario en procesos de replicación o amplificación de ADN. Muchas moléculas iniciadoras son ADN sintetizados por química orgánica (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, síntesis química

de ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, oligonucleótido, diagnóstico, PCR).

Inocuidad

Ausencia de daño a la salud, al medio ambiente o a la biodiversidad; en este contexto, por el uso de organismos genéticamente modificados o sus productos. La evidencia científica es contundente y señala que no hay daño a la salud, al medio ambiente o a la biodiversidad por el uso y consumo de organismos transgénicos como alimentos, en particular plantas y sus productos derivados (ver figuras II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, II.23, III.1, III.2, III.8, III.9, IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, VI.2, ADN, ingeniería genética, bioseguridad, alimentos transgénicos, evidencia sustentada científicamente, beneficios de los transgénicos, medicamento transgénico, producto recombinante, salud, quimosina, transgénico, planta transgénica, ausencia de daño, organismo vivo).

Insecticida químico

Los insecticidas químicos sintéticos se usan para eliminar plagas de insectos. Muchos de ellos contaminan al medio ambiente. Las plantas transgénicas que llevan un gen que confiere resistencia a plagas de insectos se diseñaron para eliminar o reducir el uso de insecticidas químicos, ya que muchos son inespecíficos (eliminan a todos los insectos sin distinción) y algunos como el DDT y el *malation* pueden ser carcinogénicos (ver figuras II.2, II.12, II.13, II.14, II.15, II.19, II.20, II.21, II.22, II.24, III.1, III.2, III.7, III.8, IV.8, V.1, V.2, V.3, V.4, V.6, V.7, VI.2, VI.4, IX.11, IX.16, IX.17, ADN, ingeniería genética, transgén, planta transgénica, *Bacillus thuringensis*, reorganización del genoma, fumigar, plagas, contaminación, medio ambiente, beneficios de los transgénicos, salud, ADN heterólogo, organismo vivo).

Insulina

Proteína de 51 aminoácidos que regula el nivel de azúcar en la sangre. Fue la primera proteína idéntica a la humana producida en bacterias mediante técnicas de ingeniería genética. Hay individuos que por mutación en el gen de la insulina no son capaces de producir insulina funcional y por ello presentan la enfermedad genética *Diabetes mellitus* y requieren de insulina (como medicamento) para controlar el nivel del azúcar en sangre (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.16, II.17, II.18, II.19, ADN, medicamento transgénico, salud, ausencia de daño, fármaco, biofármaco, medicamento, interferón, proteína, enfermedad genética, diabetes, mutación, inocuidad, biomedicamento, *Escherichia coli*, transgén, producto recombinante, síntesis química de ADN, organismo vivo, biología sintética).

Integración de ADN heterólogo

La integración del ADN heterólogo (o transgén) es un fenómeno mediante el cual ADN de otro origen (transgenes) es transferido de manera horizontal para incorporarse posteriormente al genoma de la célula receptora a través de uniones covalentes, por lo cual queda como un segmento constitutivo del nuevo genoma rearrreglado. Se rearrregla el genoma y la secuencia de nucleótidos cambia (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, transgén, planta transgénica, cromosoma, gen, núcleo, mutación, ARN mensajero, transcripción, transformación, infección, virus, recombinación genética del ADN, reorganización del genoma, ADN heterólogo, organismo vivo, transferencia horizontal de ADN).

Interferón

Proteína humana que forma parte del sistema inmune innato de vertebrados. Existe una variedad

de proteínas con secuencias diversas comprendidas dentro de los interferones. Se produce como medicamento transgénico idéntico al humano, por ingeniería genética (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.16, II.17, II.18, II.19, fármaco, biofármaco, medicamento transgénico, salud, insulina, proteína, fármaco, *Escherichia coli*, biomedicamento, ausencia de daño, insulina, levadura, organismo vivo).

Intrón

Fragmentos de ADN que se encuentran en muchos de los genes de eucariotes. Normalmente no codifican para la proteína que codifica ese gen. Los genes están compuestos por exones que sí codifican para la proteína e intrones que no codifican. Al ser transcritos los genes en ARN mensajero los intrones permiten un procesamiento diferencial de estos mensajeros que los llevan; de esta forma, a partir de un transcrito original, se pueden generar varios transcritos más pequeños que llevan combinaciones diferentes de intrones y exones. Ésta es la razón por la cual es posible generar más de una proteína a partir de un gen (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, estructura general del ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, exón, procesamiento de ARN).

Isoleucina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma).

Investigación científica y tecnología

Actividad humana, basada en el método científico,

encaminada a entender la organización y el funcionamiento de los sistemas y fenómenos naturales, entre ellos los biológicos. Esta actividad genera conocimientos novedosos que normalmente se publican en revistas y libros especializados arbitrados. Parte de estos conocimientos se utilizan para el desarrollo de tecnologías, como la biotecnología y los organismos transgénicos, para contender con demandas y problemas (ver, figuras III.1, III.6, III.7, III.8, IV.2, IV.3 y IV.4, conocimiento científico, biotecnología, transgénico, beneficios de los transgénicos).

Lactasa

Enzima utilizada en la hidrólisis o rompimiento de la lactosa, componente de la leche. Puede ser producida por ingeniería genética (ver figura II.9, II.19, II.20, proteína, enzima, salud, ingeniería genética, alimentos transgénicos, ausencia de daño, lactosa).

Lactosa

Carbohidrato presente en la leche (ver glucosa, carbohidrato).

Levadura

Organismo eucariote unicelular que se utiliza para la producción de alcohol y otros compuestos, incluidos productos recombinantes. Tiene 16 pares de cromosomas en su núcleo y se ha determinado la secuencia nucleotídica de su genoma, el cual contiene 6,241 genes (ver gen, cromosoma, microbio, eucariote, organismo vivo).

Leucina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma).

Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM)

Mediante una iniciativa del Senado de la República y en cumplimiento con compromisos internacionales adquiridos —en particular la firma del Protocolo de Cartagena—, en 2005 el Congreso de la Unión emitió la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM). La LBOGM, publicada en el Diario Oficial de la Federación en 2005, cuenta con un reglamento diseñado para instrumentarla, publicado en 2008 (RLBOGM, 2008). Otra herramienta jurídica con que cuenta nuestro país es la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SAG/BIO-2014: “Especificaciones generales para el etiquetado de organismos genéticamente modificados que sean semillas o material vegetativo destinado a siembra, cultivo y producción agrícola” (NOM, 2014).

La LBOGM incluye y establece las funciones de la Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (Cibiogem), comisión que ha trabajado en el registro de organismos transgénicos conforme a la LBOGM, apoyando a las secretarías de estado responsables: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Secretaría de Salud (SS), y a la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris). La Cibiogem en 2015 publicó el libro *Orden jurídico nacional e internacional en materia de bioseguridad de organismos genéticamente modificados*, el cual lista todos los ordenamientos jurídicos relacionados con los organismos transgénicos.

Por otro lado, en México también existe la Cofepris, instancia encargada de analizar los riesgos sanitarios y de apoyar a la Secretaría de Salud en la evaluación de la inocuidad por el consumo de ali-

mentos transgénicos conforme a la Ley General de Salud y a la LBOGM. Las semillas de plantas transgénicas que se utilizan actualmente para siembra y alimento en México, registradas ante la Cofepris, no han sido retiradas del registro (ver figuras X.2, X.4, bioseguridad, beneficios de los transgénicos, seguridad de la biotecnología, riesgo biológico, inocuidad, ausencia de daño, plagas, Convenio sobre la Diversidad Biológica, Protocolo de Cartagena, Protocolo de Nagoya Kuala-Lumpur).

Liberación al medio ambiente

Se refiere al proceso mediante el cual se pueden colocar o liberar organismos transgénicos en el medio ambiente. Generalmente se refiere a cultivos y/o al uso de microorganismos para la biorremediación de hábitats (tierra, aire, agua) contaminados (ver evaluación paso por paso, bioseguridad, LBOGM, riesgo biológico, transgénico, planta transgénica, insecticida químico, plagas, organismo vivo).

Lipasa

Enzima que se utiliza en la producción de aceites. Se produce también por medio de técnicas de ingeniería genética (ver figuras II.9, II.19, II.20, proteína, enzima, ingeniería genética, alimentos transgénicos, ausencia de daño).

Lisina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Unos de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma, metilación).

Locus genético

Región específica del ADN de un cromosoma en el

cual se localiza un gen (ver figuras II.3, II.4, II.5, ADN, gen, estructura general del ADN).

Macromolécula biológica

Polímeros de los organismos vivos como las proteínas y los ácidos nucleicos. Están constituidos por millones de átomos enlazados en largas cadenas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, ADN, ARN, proteína, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, organismo vivo).

Mapa genético

Orden o posición en que los genes están localizados en los cromosomas con respecto a los demás genes (ver ADN, gen, cromosoma).

Marcas epigenéticas

Modificaciones químicas que ocurren en el ADN o en las histonas de organismos eucariotes que pueden cambiar el fenotipo sin alterar la secuencia de nucleótidos de un organismo eucariote. Las modificaciones son la metilación (incorporación de un grupo metilo) de ciertos nucleótidos primariamente en la citosina y en otros nucleótidos con diferentes bases en el ADN. La acetilación (incorporación de un grupo acetilo), la metilación y otras modificaciones químicas de ciertos residuos de lisina ocurren en varias histonas que participan en el empaquetamiento de ADN en los cromosomas para así permitir la formación de nucleosomas y de cromatina. Mediante estas modificaciones químicas de acetilación y metilación de ciertos residuos de lisina de diferentes histonas se modula la formación de eucromatina y heterocromatina, y con ello la transcripción diferenciada del ADN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.9, II.10, II.11, II.12, II.14, ADN, ARN, ARN no codificante, histonas,

epigenética, epialelo, nucleosoma, centrómero, telómero, cromatina, cromosoma, gen, núcleo, eucariote, citosina, lisina, metilación, nucleótido, fenotipo, expresión genética, planta, planta de maíz).

Material genético

Todo material de origen vegetal, animal, microbiano o viral compuesto de ácidos nucleicos. La estructura general del ADN y del ARN es exactamente la misma en todos los seres vivos, (incluyendo los virus que no son organismos vivos) desde las bacterias hasta los humanos. Los genes residen en los cromosomas y contienen la información para codificar para el ARN y las proteínas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, gen, proteína, cromosoma, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, organismo vivo).

Medicamento

Toda sustancia que tenga efecto terapéutico, preventivo o de rehabilitación que se presenta en forma farmacéutica y se identifica como tal por su actividad farmacológica y sus propiedades físicas, químicas y biológicas (ver figuras II.19, II.20, fármaco, biomedicamento, insulina, interferón).

Medicamento transgénico

Medicinas de origen transgénico que se obtienen mediante el uso de organismos transgénicos que llevan transgenes que codifican para estas medicinas, las cuales son proteínas idénticas a las humanas. Entre los organismos que se usan para obtenerlas se encuentran bacterias y células de animales y plantas. Existen más de 100 medicamentos de origen transgénico en farmacias que no se podrían haber producido comercialmente

sin los transgénicos. Se utilizan para contender con problemas clínicos y de infección por organismos patógenos. Son uno de los grandes beneficios de los organismos transgénicos. No existe ninguna evidencia que indique daño por la utilización de medicamentos transgénicos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.12, II.13, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, ADN, ingeniería genética, transgénico, transgén, proteína, insulina, interferón, hormona humana de crecimiento, vacuna, beneficios de los transgénicos, salud, organismo vivo, síntesis química de ADN, ausencia de daño, fármaco).

Medicina genómica

Técnicas modernas de ciencia genómica y biología molecular que se utilizan en la medicina para la detección y el tratamiento de enfermedades genéticas e infecciosas, incluido el cáncer y las enfermedades neurodegenerativas (ver cáncer, diagnóstico genético, genómica, genoma).

Medicina molecular

Aplicación a la medicina de técnicas de biología molecular para la detección y el tratamiento de enfermedades hereditarias e infecciosas (ver biología molecular, diagnóstico genético, genómica, genoma).

Medio ambiente

Conjunto de todos los componentes físicos, químicos y biológicos, incluyendo seres humanos y la sociedad, que existen y viven en el planeta tierra. El medio ambiente se altera naturalmente por la interacción de sus componentes; la humanidad ha abusado de los diferentes entornos y recursos naturales a su alrededor y ha puesto en riesgo muchos elementos. Ejemplos de esto son el cambio climático debido en gran parte a la emisión de gases efecto invernadero y la contaminación

por insecticidas químicos usados para contender con plagas de insectos. Esta última afecta la salud humana y la biodiversidad, y causa daño a suelos, mantos freáticos y mares, ya que muchos insecticidas químicos son recalcitrantes, no biodegradables y permanecen por muchos años en los diferentes ecosistemas y entornos. Los cultivos transgénicos representan una muy importante herramienta para atenuar la contaminación por insecticidas químicos y contribuir hacia un mayor respeto y sustentabilidad de los componentes que integran este planeta (ver figuras II.24, V.2, V.6, V.7, VI.4, insecticida químico, plagas, transgénico, planta transgénica, *Bacillus thuringensis*, beneficios de los transgénicos, salud, inocuidad, ausencia de daño, biodiversidad, biotecnología, pesticida, organismo vivo).

Megadiverso

Poseedor de una gran diversidad.

Metabolismo

Conjunto de todos los procesos enzimáticos y de otros tipos con los que cuenta la célula viva para funcionar y que le permite la transformación de nutrientes en energía, nuevas moléculas biológicas y nuevas células. Produce macromoléculas biológicas de gran peso molecular, como las proteínas y los ácidos nucleicos, y moléculas pequeñas de bajo peso molecular llamados metabolitos, como los aminoácidos y el ATP (ver figuras IX.8, IX.9, IX.10, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, ADN, metabolito, metaboloma, metabolómica, ciencias ómicas, bacteria, planta, animal, glucosa, organismo vivo, biología sintética).

Metabolito

Molécula que sintetiza o degrada la célula viva para llevar a cabo sus diferentes funciones. Varios

metabolitos son también monómeros de polímeros biológicos, tal es el caso de los aminoácidos que son los monómeros de las proteínas (ver figuras II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, metabolismo, metaboloma, vía metabólica, proteína, aminoácido, organismo vivo).

Metaboloma

Conjunto de vías metabólicas y sus productos, los metabolitos, que posee un organismo vivo. Los metabolitos son moléculas biológicas pequeñas compuestas con números bajos de átomos comparados con ácidos nucleicos y proteínas, los cuales son polímeros biológicos de alto peso molecular compuestos por grandes números de monómeros como los nucleótidos y aminoácidos. En general los metabolitos (glucosa, ribosa, desoxirribosa, ATP y aminoácidos, entre otros) participan en el funcionamiento (metabolismo) de la célula, a diferencia del ADN que es una molécula donde reside la información (ver figuras II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, ADN, célula, metabolito, metabolómica, glucosa, ribosa, desoxirribosa, ATP, aminoácido, organismo vivo).

Metabolómica

Una de las ciencias ómicas para caracterizar la célula viva. Análisis global y sistémico de todos los metabolitos que tiene una célula, el cual incluye su identificación, cuantificación, caracterización, localización, síntesis, degradación y relación con otros metabolitos de la célula viva en cierta condición metabólica, gracias a las múltiples vías metabólicas que permiten la síntesis de todos los compuestos celulares (proteínas, ácidos nucleicos) incluyendo metabolitos (ver figuras II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, ciencias ómicas, proteómica, genómica, transcriptómica, metaboloma, ácidos nucleicos, metabolismo, vía metabólica,

metabolito, proteína, célula, organismo vivo, planta de maíz, planta transgénica, epigenética, biología sintética).

Metilación

Adición del grupo químico llamado metilo (-CH₃) a las proteínas y a los ácidos nucleicos. En el caso del ADN y el ARN la metilación ocurre principalmente en algunos residuos de los nucleótidos de citosina, aunque también ocurre en otros nucleótidos. Es una de las marcas epigenéticas que ocurre en las histonas de organismos eucariotes que están involucradas en el empaquetamiento de ADN en los cromosomas de las células de éstos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, ARN no codificante, histonas, centrómero, telómero, cromatina, marcas epigenéticas, cromosoma, gen, eucariote, núcleo, nucleótido, fenotipo, expresión genética, citosina).

Metionina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, metabolito, metaboloma, ARN de transferencia).

Microbio

Sinónimo de microorganismo. Organismo de una o pocas células invisibles al ojo humano; normalmente organismos unicelulares como bacterias o levaduras. Algunos pueden ser patógenos como el cólera (ver figuras IX.8, IX.9, IX.10, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, bacteria, planta, animal, levadura, organismo vivo, cólera, hongo).

Microbiología

Disciplina que estudia los microorganismos, los

cuales están constituidos, en general, por una o pocas células y que por ello no pueden observarse a simple vista (ver figura II.1, biotecnología, virus, bacteria, levadura, organismo vivo).

Microinyección

Introducción de ADN en una célula mediante el uso de jeringas muy delgadas (ver ADN, célula).

Microorganismo

Ver microbio, organismo vivo.

Mitocondria

Organelos intracelulares en los cuales se lleva a cabo la síntesis del ATP. Se considera que originalmente fueron bacterias en vida libre que fueron integradas por endosimbiosis para crear nuevas formas de vida más adaptadas y capaces. Existen en los humanos y en todos los animales y vegetales del planeta (ver figuras IX.11, IX.12, IX.13, organelo, endosimbiosis, ADN, cloroplasto, célula, simbiogénesis, evolución de las especies, transferencia horizontal de ADN, organismo vivo).

Mitos de los transgénicos

Conforme al diccionario de la Real Academia, datos o historias ficticias, imaginarias o falsas sobre los transgénicos (ver inocuidad, ausencia de daño, beneficios de los transgénicos, transgénicos, organismos genéticamente modificados).

Molécula biológica

Conjunto de átomos unidos covalentemente (enlaces químicos fuertes). Normalmente es sintetizada por un organismo vivo (ver célula, organismo vivo).

Molécula biológica informacional

Molécula en la que reside información de tipo biológico. Hay dos tipos de moléculas biológicas

informativas: las proteínas y los ácidos nucleicos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, proteína, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, organismo vivo).

Molécula de ADN recombinante

Molécula integrada por ADN de origen celular y de origen heterólogo o transgén. Estas moléculas se pueden generar en el laboratorio utilizando técnicas de ingeniería genética que permiten aislar y unir fragmentos de ADN de diferentes orígenes. Pueden incorporarse a una célula a través de transferencia horizontal de ADN e integrarse posteriormente en su genoma. Si una de las moléculas es un vector como un plásmido o un virus se permite la replicación del ADN recombinante y la estabilización de la molécula recombinante en el citoplasma de la célula a la que se incorporó (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.19, II.20, II.21, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, plásmido, vector, ingeniería genética, clonación molecular de ADN, célula, transgénico, transgén, planta transgénica, recombinación genética del ADN, organismo vivo, síntesis química de ADN).

Monitoreo

Se refiere a la capacidad de vigilar, detectar o diagnosticar la presencia de transgénicos en diferentes nichos y a lo largo del tiempo. Hoy se cuenta con técnicas muy precisas que implican la amplificación de ADN por técnicas de PCR y ciencias ómicas para detectar y caracterizar cultivos transgénicos y convencionales en tiempos cortos (ver figuras X.2, X.4, transgénico, planta transgénica, diagnóstico, bioseguridad, riesgo biológico, PCR, ciencias ómicas, evaluación caso por caso, agricultura de

precisión, LBOGM, Convenio sobre la Diversidad Biológica, Protocolo de Cartagena).

Monómero

Unidad constituyente de un polímero. Las proteínas son polímeros en los cuales los aminoácidos son los monómeros. Los ácidos nucleicos como el ADN y el ARN también son polímeros biológicos, siendo los nucleótidos sus monómeros constituyentes (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, polímero biológico, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, aminoácido, proteína).

Moratoria

Acciones para detener, por diferentes periodos de tiempo, el uso de una tecnología o un producto (ver figuras X.2, X.4, riesgo biológico, bioseguridad, LBOGM, Convenio sobre la Diversidad Biológica, Protocolo de Cartagena).

Movilización de ADN

Transferencia o translocación de material genético de un lugar a otro. Puede ocurrir dentro de una misma célula o entre diferentes células y puede propiciar la reorganización del genoma. En el caso de los transgénicos la movilización del ADN (transgén) ocurre de manera horizontal en una célula receptora donde se recibe el transgén que luego pasa a formar parte del genoma (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, transcripción, transposón, vector, evolución de las especies, organismo vivo, transgénico, transferencia horizontal de ADN, reorganización del genoma).

Mutación

La información genética contenida en el ADN es

susceptible de sufrir modificaciones que se denominan mutaciones. Las mutaciones son causa de variación hereditaria y, por ende, en parte también de la evolución. Todos los organismos experimentan mutaciones en su ADN debido a factores como radiaciones solares, interacción con productos químicos, infecciones virales o acciones de los transposones que puede sufrir el ADN por translocar su posición en el genoma. Los transposones pueden alterar desde un solo nucleótido hasta eliminar o causar la multiplicación de cromosomas completos. Las alteraciones en la secuencia de nucleótidos de un gen pueden ocasionar un cambio en la fase de lectura del gen en el ARN mensajero, y por ello generar una proteína con secuencia primaria alterada que ya no sea capaz de realizar su función original (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.15, IX.16, ADN, gen, nucleótido, mutágeno, evolución de las especies, recombinación genética del ADN, transgén, planta transgénica, transposón, organismo vivo).

Mutación puntual

Cambio de un solo nucleótido en un gen (ver figuras II.2, II.4, II.10, II.11, mutación, ADN, gen).

Mutagénesis

Proceso por el cual se inducen cambios en el material genético de un organismo. El proceso puede ser espontáneo o inducido (ver figuras II.2, II.4, II.10, II.11, ADN, cromosoma, gen, mutación, mutágeno, organismo vivo).

Mutágeno

Sustancias químicas, energía, tecnologías y material genético como los transposones que inducen cambios en la secuencia del genoma de un organismo vivo (ver figuras II.2, II.4, II.10, II.11, ADN,

gen, cromosoma, mutagénesis, mutación, organismo vivo, transposón).

Mutante

Organismo que tiene una modificación en la secuencia nucleotídica de su genoma con relación al organismo original. En plantas (en particular el maíz) los transposones son responsables de la aparición de muchos mutantes, incluyendo las variedades intraespecie (ver figuras II.2, II.3, II.10, II.11, ADN, gen, mutación, evolución de las especies, organismo vivo, transposón, planta de maíz).

Núcleo

Organelo presente en células eucariotes, entre éstas las de plantas y animales, en el que se localizan los cromosomas. El ADN de los cromosomas debe ser empacado por las histonas para lograr incorporarlos en un núcleo de 10 micrómetros, cuando las moléculas de ADN de los cromosomas, en la especie humana, miden dos metros (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.9, II.10, II.11, IX.10, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, ADN, cromosoma, gen, planta, animal, organismo vivo, eucariote, nucleosoma, cromatina, histonas, epigenética).

Nucleosoma

Como parte del proceso de empaquetamiento de ADN de células eucariotes, las histonas H1, H2A, H2B, H3 y H4, por su carga positiva, se unen fuertemente al ADN que posee carga negativa. El primer grado de compactación o empaquetamiento del ADN comprende la unión del ADN con un núcleo de ocho histonas (dos histonas de cada una de las siguientes familias: H3, H4, H2A y H2B). De manera similar a un carrete de hilo, aproximadamente 146 pares de bases de ADN se enrollan a un octámero de histonas. El complejo formado por el

ADN y las histonas, a lo largo de todo el genoma, se denomina cromatina. El nucleosoma (ADN y un octámero de histonas) es la unidad básica, estructural y funcional de la cromatina. La histona H1, por otro lado, se une a la región de ADN comprendida entre dos nucleosomas (ADN enlazador) y ayuda a estabilizar las fibras de cromatina (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.11, II.13, ADN, histonas, núcleo, epigenética, marcas epigenéticas, metilación, lisina, citosina, cromosoma, telómero, centrómero, cromatina, núcleo, eucariote).

Nucleótido

Monómero de los ácidos nucleicos ADN y ARN compuesto por una base, un azúcar y un fosfato. Existen cinco bases nitrogenadas en los ácidos nucleicos de los seres vivos, tres de ellas, guanina (G), citosina (C) y adenina (A) están presentes en el ADN y ARN. Además, en el ADN se halla la timina (T) y en el ARN hay uracilo (U) en lugar de timina (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, traducción, replicación).

OGM

Ver organismo genéticamente modificado.

Oligonucleótido

Molécula de ADN de bajo número (~ 5 a 200) de nucleótidos. Los oligonucleótidos se utilizan como sondas rastreadoras en sistemas de diagnóstico y como iniciadores en procesos de polimerización y amplificación de ADN con técnicas de PCR. Se sintetizan químicamente (ver figuras II.13, II.14, II.15, ADN, gen, PCR, iniciador, replicación, diagnóstico genético, amplificación de ADN, síntesis química de ADN, biología sintética).

Operador

Se refiere a una región regulatoria o presente en muchos genes que sirve para asociar moléculas reguladoras, normalmente proteínas (represores, activadores), para modular la expresión genética (ver expresión genética, genoma, ADN, gen).

Organelo

Estructura celular especializada en una función determinada, como el núcleo, las mitocondrias, los cloroplastos, los ribosomas (ver figuras IX.12, IX.13, célula, endosimbiosis, mitocondria, cloroplasto, organismo vivo, evolución de las especies).

Organismo genéticamente mejorado

Organismo que tiene ventajas o mejores características que el organismo del cual se derivó. Estas ventajas pueden provenir de uno o varios transgenes, en cuyo caso el organismo genéticamente mejorado sería sinónimo de transgénico, organismo genéticamente modificado o planta transgénica. Una variedad de maíz a la que se le han eliminado ciertos genes que le permiten sintetizar sólo almidón en el grano, generada a través de técnicas de edición CRISPR-Cas9, es un ejemplo de organismo genéticamente mejorado que no lleva transgenes (ver figuras II.13, VIII.1, CRISPR-C, edición fina de ADN, CRISPR-Cas9, transgénico, OGM, transgén, mutación, genoma, gen, planta transgénica).

Organismo genéticamente modificado (OGM)

Sinónimo de transgénico y de organismo transgénico. Organismo que ha sido alterado a través de modificar su material genético mediante la incorporación de material genético de otro origen, llamado transgén, por transferencia horizontal de ADN y posterior reorganización del ADN con el genoma de la célula receptora. Están diseñados para contener

con problemas, demandas y necesidades y son muchos sus beneficios (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, III.1, III.2, III.3, III.8, III.9, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, VIII.1, VIII.2, VIII.4, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, transferencia horizontal de ADN, cromosoma, gen, núcleo, transcripción, ingeniería genética, transgén, transgénico, organismo genéticamente mejorado, planta transgénica, organismo vivo, síntesis química de ADN, ausencia de daño, beneficios de los transgénicos, reorganización del genoma, clonación molecular de ADN, agricultura de precisión, plagas).

Organismo patógeno

Organismo capaz de causar infecciones en otro (ver botulismo, bacteria, *Streptococcus pneumoniae*, influenza, cólera, infección, organismo vivo, salud).

Organismo transgénico

Ver transgénico, organismo genéticamente modificado.

Organismo unicelular

Organismo integrado por una célula como las bacterias y la levadura (ver bacteria, organismo vivo).

Organismo vivo

Se refiere a los integrantes de la biota que son estudiados por la biología, la ecología y la bioquímica, entre otras ciencias, y más recientemente por las ciencias ómicas a nivel molecular. Son sistemas biológicos complejos que se clasifican en diferentes grupos. Están integrados por una o varias células, en las cuales se encuentran los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y otras moléculas biológicas que los integran, como las proteínas y los metabolitos celulares. Se clasifican en eucariotes (animales y plantas)

por tener núcleo donde se localizan los cromosomas y en procariotes (bacterias) que son organismos sin núcleo y en la mayoría de casos organismos unicelulares o asociaciones de varias células. Una más reciente clasificación de las bacterias las separó en archaeobacteria (archea) y eubacteria (bacteria); estos últimos son los organismos que se mencionan en este libro como bacterias y sinónimo de procariotes. Algunos son o pueden ser patógenos.

Todos los organismos vivos son complejos y tienen metabolismos para utilizar nutrientes, generar energía biológica y llevar a cabo sus múltiples funciones. Tienen la capacidad en el ADN de replicarse y transmitir el material genético a su progenie y de sintetizar moléculas y herramientas biológicas como los diversos ARN y las proteínas. Están integrados por varios componentes y sistemas que interactúan entre sí y con otros sistemas vivos de la biota. La biotecnología contribuye a su estudio, caracterización y utilización respetuosa, utilizando organismos transgénicos contruidos por transferencia horizontal de ADN para atender grandes demandas y problemas.

Existen muchos beneficios de los organismos transgénicos, incluyendo cerca de 100 medicamentos transgénicos para atender problemáticas clínicas e infecciosas, la inocuidad por el consumo de plantas transgénicas como alimentos y la reducción en el uso de insecticidas químicos, muchos de ellos contaminantes del medio ambiente y carcinogénicos (ver figuras II.11, II.12, II.13, II.15, II.16, II.21, IX.8, IX.9, IX.10, IX.11, IX.12, IX.13, IX.14, IX.16, ADN, ARN, ácidos nucleicos, ATP, proteína, biología, genética, ecología, bioquímica, biología molecular, microbiología, ingeniería bioquímica, genómica, genoma, proteómica, proteoma, transcriptoma, transcriptómica, metabolómica, metaboloma, bioinformática, ciencias ómicas, biotecnología moderna, organismo patógeno, plagas, biorremediación, bioseguridad,

biota, biodiversidad, catabolismo, mutante, código genético, expresión genética, centro de origen, contaminación, cólera, tripanosoma, eucariote, procariote, célula, núcleo, gen, mitocondria, cloroplasto, transferencia horizontal de ADN, transformación, transgénico, transgenosis, planta transgénica, planta nativa, planta de maíz, planta, animal, bacteria, levadura, hongo, herbicida, insecticida químico, pesticida, medio ambiente, *Escherichia coli*, colonia, clon, fotosíntesis, evolución de las especies, teoría de la evolución de las especies, material genético, diferenciación celular, electroporación de ADN, ingeniería genética, transgén, biobalística, biomasa, biopolímero, biomedicamento, biodegradable, bioinsecticida, cáncer, carcinogénico, mutágeno, carbohidrato, equivalencia sustancial, flujo génico, gameto, recombinación genética del ADN, haploide, diploide, recursos genéticos, recursos biológicos, macromolécula biológica, *in vivo*, autótrofo, reorganización del genoma, replicación, resistencia, riesgo biológico, sanidad, secuenciación de ADN, seguridad de la biotecnología, semilla híbrida, cultivares convencionales, simbiogénesis, síntesis biológica, sistema biológico, tecnología biológica, traducción, ribosoma, transcripción, liberación al medio ambiente, transcripción reversa, transferencia vertical de ADN, cigoto, beneficios de los transgénicos, inocuidad, alimentos transgénicos, ausencia de daño, antibiótico, medicamento transgénico, producto recombinante, proteína terapéutica, insulina, interferón, plasminógeno, hormona humana de crecimiento, integración de ADN heterólogo, edición fina de ADN, CRISPR-Cas9, biología sintética, epigenética, histonas, cromosoma, cromatina, marcas epigenéticas).

Pares de cromosomas

Los eucariontes superiores (como la especie humana) tienen la información genética duplicada,

es decir, son diploides. La mitad de la información proviene del padre y la otra mitad de la madre. Al fusionarse el esperma y el óvulo se forma el cigoto a partir del cual se desarrolla el individuo. Los gametos, esperma y óvulo, son haploides, es decir, sólo tienen 23 cromosomas en el caso de los humanos. Al fusionarse generan un cigoto con 23 pares de cromosomas de los que cada par proviene de los dos gametos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, beneficios de los transgénicos, inocuidad, ausencia de daño, transferencia horizontal de ADN, transgén, transgénico, planta transgénica, insecticida químico, bioinsecticida, herbicida, glifosato, plagas, ingeniería genética, biobalística, fumigar, organismo vivo, contaminación).

Pasajero

Se refiere al material genético de ADN, el transgén, que puede ser integrado en un vector como un plásmido para ser trasladado e incorporado en una célula por técnicas de ingeniería genética en la construcción de organismos transgénicos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, transgén, transgénico, planta transgénica, ingeniería genética, clonación molecular de ADN, plásmido, ADN heterólogo, herramientas moleculares).

Patente

En el contexto de este libro se refiere a las patentes de organismos transgénicos que pertenecen a varias compañías transnacionales. Las patentes de los primeros medicamentos de origen transgénico vencieron hace algunos años; por esa razón, algunos se pueden usar como genéricos, en México y otros países. Las patentes contra plagas de insectos que dieron lugar a las plantas transgénicas de primera generación están por vencer, ya que se otorgaron hace más de 20 años. Por ello, algunos genes protegidos por estas patentes, como los que confieren resistencia a insectos plaga, po-

drán usarse a partir de ahora como genéricos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, beneficios de los transgénicos, inocuidad, ausencia de daño, transferencia horizontal de ADN, transgén, transgénico, planta transgénica, insecticida químico, bioinsecticida, herbicida, glifosato, plagas, ingeniería genética, biobalística, fumigar, organismo vivo, contaminación).

Patógeno

Ver organismo patógeno.

PCR (*polymerase chain reaction* o *reacción en cadena de la polimerasa*)

Metodología que permite la amplificación específica de fragmentos de ADN a través de varios ciclos de síntesis de ADN, utilizando la enzima ADN polimerasa (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, ADN, ingeniería genética, aislar genes, oligonucleótido, replicación, diagnóstico).

Pectinasa

Enzima que se utiliza en la fabricación de jugos. Se produce mediante ingeniería genética (ver figuras II.9, II.11, II.12, II.15, II.16, II.17, II.20, enzima, proteína, ingeniería genética, transgénico, alimentos transgénicos, ausencia de daño).

Pesticida

Sustancia de origen químico utilizada para eliminar plagas de insectos, hierbas y malezas. Muchos pesticidas pueden generar problemas a la salud. Algunos insecticidas químicos incluso pueden causar cáncer y muchos de ellos son recalcitrantes y contaminan el medio ambiente. Ya que la mayoría de los pesticidas químicos no son específicos para un insecto o una plaga, al aplicarlos se elimi-

na no sólo la plaga sino muchos otros organismos. Los cultivares transgénicos han reducido drásticamente el uso de insecticidas químicos en beneficio de la salud, el medio ambiente y la biodiversidad (ver figuras II.24, III.1, III.2, III.7, III.8, III.9, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, VI.4, bioinsecticida, insecticida químico, herbicida, glifosato, planta transgénica, organismo vivo, contaminación, fumigar, medio ambiente, recalcitrante, carcinogénico, bioseguridad, beneficios de los transgénicos).

Plagas

Las plagas pueden ser de insectos o de malezas, mismas que son controladas con insecticidas químicos y herbicidas, respectivamente. El uso de plantas transgénicas de primera generación ha permitido controlar plagas de insectos; las de segunda generación controlan, además, plagas de malezas ya que son capaces de crecer en presencia del herbicida glifosato, eliminando así las malezas que compiten por nutrientes con los cultivares. Las plantas que proporcionan resistencia a insectos plaga han permitido reducir sustancialmente el uso de insecticidas químicos, muchos de ellos recalcitrantes y dañinos para la salud y el medio ambiente, con los amplios beneficios que esto conlleva (ver figuras II.12, II.13, II.15, II.16, II.17, II.21, III.1, III.2, III.4, III.7, III.8, III.9, IV.8, V.1, V.2, V.4, V.6, V.7, VI.2, VI.3, VI.4, ADN, planta transgénica, transgén, ingeniería genética, beneficios de los transgénicos, insecticida químico, herbicida, glifosato, planta de maíz).

Planta

Miembro de uno de los cinco reinos en los que se clasifican los seres vivos (reino *Plantae*). Las plantas son organismos eucariotes que tienen núcleo donde se localizan los cromosomas. Son multicelulares, usualmente con raíces en la tierra (ver

figuras II.20, II.21, IX.24, eucariote, organismo vivo, planta de maíz, *Arabidopsis thaliana*, epigenética, epialelo, ARN no codificante).

Planta de maíz

El maíz es uno de los cultivares nativos y México es centro de origen de él. Es indudablemente uno de los organismos mejor estudiados y conocidos desde tiempos de Darwin y Mendel. Recientemente se ha caracterizado a nivel molecular a detalle mediante ciencias ómicas. Se ha demostrado que las plantas de maíz transgénicas son similares a sus parentales y a las variedades comerciales o cultivos convencionales. No ha habido cambios importantes en los genomas, proteomas, metabolomas y transcriptomas de estos organismos cuando se comparan entre ellos. La regulación epigenética del genoma del maíz está muy estudiada, incluyendo el papel de diferentes moléculas de ARN y de los transposones que constituyen más del 80% de su genoma. Por el elevado contenido de transposones el genoma del maíz se reorganiza cotidianamente, dando lugar a variedades intraespecie. Al igual que otros vegetales y animales, el maíz posee sistemas para reconocer y mantener a la gran mayoría de los transposones en un estado de reposo transcripcional y de no movilización. Estos sistemas de silenciamiento se basan en la formación de heterocromatina en las regiones genómicas que poseen transposones y otros elementos genéticos repetidos mediante mecanismos de regulación epigenética (metilación del ADN y modificaciones de la cromatina). Las cruces entre cultivos tradicionales de maíz conllevan la confrontación de genomas con epigenomas distintos en las que las nuevas plantas no han presentado problemas para los agricultores, ni a la alimentación humana ni animal. La evidencia científica indica que las plantas conven-

cionales de maíz coexisten con variedades transgénicas; no existe daño ni contaminación, sino coexistencia (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.21, II.22, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, IX.20, ADN, beneficios de los transgénicos, inocuidad, transferencia horizontal de ADN, ciencias ómicas, genómica, metabolómica, proteómica, transcriptómica, proteoma, genoma, metaboloma, transcriptoma, cultivares convencionales, planta, planta nativa, planta transgénica, transgén, transgénico, ausencia de daño, insecticida químico, plagas, bioinsecticida, ingeniería genética, fumigar, organismo vivo, contaminación, transposón, epigenética, histonas, cromatina, marcas epigenéticas, metilación, epialelo, ARN no codificante, agricultura de precisión).

Planta nativa

Variedad de planta que se originó en algún país del cual es centro de origen. México es centro de origen del maíz y del algodón (ver figuras IX.21, IX.25, centro de origen, cultivares convencionales, planta, planta transgénica, organismo vivo, planta de maíz).

Planta transgénica

Planta a la cual se le incorpora material genético llamado transgén, o transgenes, por transferencia horizontal de ADN heterólogo, construida mediante técnicas de ingeniería genética o biobalística y posterior reorganización del genoma, normalmente con el propósito de producir proteína(s) para generar resistencia a un insecto plaga, a un herbicida o proporcionarle nuevas propiedades metabólicas. Las plantas transgénicas y sus productos (en particular el maíz y la soya) son inocuos a la salud humana y animal. Han generado grandes beneficios de diferentes tipos: reducir

el uso de insecticidas químicos, muchos de ellos contaminantes y carcinogénicos, el cual fue el motivo principal de su creación, además de contender con plagas de insectos. Las plantas transgénicas *per se* no contaminan al medio ambiente ni a las plantas de variedades comerciales que se utilizan en muchos países. La evidencia señala que las plantas transgénicas, particularmente el maíz transgénico, coexisten sin daño ni contaminación con variedades comerciales de maíz y soya. Las plantas transgénicas se han caracterizado a nivel molecular por ciencias ómicas; sus genomas, metabolomas, transcriptomas y proteomas no muestran diferencias importantes cuando se comparan con variedades paternas y convencionales. Las nuevas proteínas codificadas por el transgén o transgenes son parte del proteoma de la planta transgénica.

Las patentes de las plantas transgénicas de primera generación están por vencer ya que se otorgaron hace más de 20 años. Esto significa que algunos de los genes que confieren resistencia a insectos plaga podrán usarse como genéricos, lo cual representa una muy buena oportunidad para desarrollar y potenciar variedades transgénicas mexicanas. Entre éstas se encuentra un maíz resistente a heladas y sequías y ciertas plantas transgénicas que cuentan con la capacidad de crecer en fosfito en lugar de fosfato, lo cual representa una oportunidad para dejar de usar pesticidas químicos como el glifosato que se utiliza para eliminar malezas, ya que éstas no pueden crecer en fosfito como fuente de fosfato.

De la misma manera que los genes de un organismo silvestre o de una variedad convencional son regulados epigenéticamente, los transgenes integrados en plantas transgénicas también pueden ser sujetos de regulación epigenética. El empleo de transgenes como herramientas molecula-

res ha sido esencial para entender la función y las bases moleculares de diversos mecanismos de regulación epigenética, incluyendo el fenómeno de silenciamiento de genes en plantas (cosupresión) y el descubrimiento de las bases moleculares del ARN interferente. Existe una excepción de maíz transgénico que no lleva transgén. En esta planta las nuevas propiedades residen en fragmentos de ADN de otros orígenes (por eso es transgénica) que le permiten modificar la expresión de un gen de la propia planta que codifica para una proteína con la que adquiere resistencia a heladas y sequías (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.20, II.21, II.22, III.1, III.2, III.3, III.4, III.5, III.7, III.8, III.9, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.8, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, V.7, VI.1, VI.2, VI.3, VI.4, VIII.1, VIII.2, VIII.3, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, IX.17, IX.18, IX.20, X.2, ADN, beneficios de los transgénicos, inocuidad, alimentos transgénicos, ausencia de daño, salud, ciencias ómicas, genómica, transcriptómica, proteómica, metabolómica, genoma, proteoma, metaboloma, transcriptoma, transferencia horizontal de ADN, reorganización del genoma, ADN recombinante, *Agrobacterium tumefaciens*, síntesis química de ADN, transgén, transgénico, transgenosis, organismo genéticamente modificado, insecticida químico, bioinsecticida, herbicida, glifosato, plagas, ingeniería genética, biobalística, fumigar, organismo vivo, contaminación, patente, medio ambiente, planta de maíz, cultivos convencionales, histonas, epigenética, ARN no codificante, cromatina, marcas epigenéticas, metilación, citosina, lisina, transposón, agricultura de precisión).

Plásmido

Molécula circular de ADN que constituye material genético adicional al cromosoma bacteriano y que es capaz de replicarse de forma autónoma. Se uti-

liza como herramienta (vector) para clonar molecularmente el ADN (transgenes) mediante técnicas de ingeniería genética y transferirlo a otros organismos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, vector, transgén, transgénico, ingeniería genética, transferencia horizontal de ADN, herramientas moleculares, clonación molecular de ADN).

Plasminógeno

Proteína precursora que al ser activada por proteasas se convierte en plasmina, lo que constituye el inicio del proceso de disolución de coágulos en la sangre. Se produce por medio de técnicas de ingeniería genética (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, ADN, ingeniería genética, fármaco, proteína, medicamento transgénico, salud, organismo vivo, biomedicamento).

Polimerasa de ADN

Proteína con actividad enzimática que participa conjuntamente con otras proteínas en el proceso de replicación de ADN. Este mecanismo permite copiar cada una de las dos hebras del ADN y generar dos dobles hélices a partir de una doble hélice. En este proceso los desoxirribonucleótidos se añaden uno a la vez (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, cromosoma, gen, núcleo, ADN, replicación, estructura general del ADN).

Polimerasa de ARN

Proteína con actividad enzimática involucrada, conjuntamente con otras proteínas, en la síntesis del ARN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.11, ADN, ARN, ARN no codificante, transcripción, ARN mensajero, epigenética).

Polímero biológico

Molécula de origen biológico formada por varios monómeros. Por analogía, los monómeros serían las cuentas de un collar y el polímero sería el collar, como los nucleótidos en los ácidos nucleicos y los aminoácidos en las proteínas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, proteína, aminoácido, monómero).

Polipéptido

Cadena de pocos aminoácidos. Sinónimo de proteína pequeña (ver figuras II.2, II.4, II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, aminoácido).

Procesamiento de ARN

Procesos celulares que reducen el tamaño de los transcritos de ARN. Estas moléculas de ARN procesadas son normalmente las moléculas funcionales de la célula. Algunas se traducen en proteínas; otras moléculas de ARN tienen muchas otras funciones como la regulación epigenética del ADN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, II.10, II.13, II.15, ADN, epigenética, gen, ARN, ARN no codificante, transcripción, intrón, exón, proteína).

Procariote

Organismo vivo, unicelular en la mayor parte de los casos (como las bacterias), que tiene un solo cromosoma y sin membrana nuclear a diferencia de los eucariotes (como plantas y animales). Los procariotes pueden existir como células individuales o asociaciones de varias células. Una reciente clasificación de las bacterias las separó en archaeobacteria (archaea) y eubacteria (bacteria); estos últimos son los organismos que se mencionan en este libro como bacterias y sinónimo de procariotes (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.16, IX.8,

IX.9, IX.10, ADN, microorganismo, eucariote, núcleo, organismo vivo, biología sintética, bacteria, salud).

Procesos de verificación y seguimiento

Protocolos para detectar la presencia de organismos genéticamente modificados en diferentes instancias; procedimientos para asegurar el seguimiento de estos procesos de detección contenidos en ordenamientos jurídicos (ver figuras X.2, X.4, bioseguridad, riesgo biológico, monitoreo, transgénico, Protocolo de Cartagena, LBOGM).

Producto recombinante

Producto obtenido mediante el uso de técnicas de ADN recombinante, también conocidas como ingeniería genética (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, transcripción, replicación, transgén, transgénico, ingeniería genética, fármaco, biomedicamento, alimentos transgénicos, insulina, lactasa, ausencia de daño, quimosina, interferón, organismo vivo, salud).

Prolina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, metabolito, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito).

Promotor

Secuencia pequeña de ADN que permite el inicio de la transcripción del gen que controla y que se localiza normalmente en la región anterior del gen. El promotor es reconocido por la enzima ARN polimerasa para iniciar el proceso de transcripción

de genes (ver figuras II.3, II.4, II.5, II.6, gen, ADN, regulación genética, transcripción, ARN mensajero, estructura general del ADN).

Proteasa

Enzima o proteína que degrada o hidroliza las proteínas (ver figuras II.9, II.18, II.19, II.20, enzima, proteína).

Proteico o proteínico

Se dice de lo relacionado con las proteínas (ver figuras II.9, II.18, II.19, II.20, proteína, aminoácido, polímero biológico).

Proteína

Las proteínas son macromoléculas informacionales, pero a diferencia del ADN, que es la molécula donde reside la información genética para sintetizar proteínas, éstas son las herramientas más importantes que tienen las células para llevar a cabo la mayor parte de sus funciones; en otras palabras, en las proteínas reside la información funcional de la célula. Las proteínas están codificadas en los genes de los cromosomas. Ejemplos de proteínas son los siguientes: la insulina, que regula el nivel de azúcar en la sangre; la hemoglobina, que transporta en los glóbulos rojos el oxígeno de los pulmones a todas las células del organismo; y el colágeno, que forma parte de la piel. Como estas tres proteínas existen otras muchas en nuestro organismo (alrededor de 100,000); gracias a ellas y a su información funcional específica el organismo y sus diferentes órganos, tejidos y células llevan a cabo sus tareas. Las proteínas llamadas enzimas tienen la capacidad de romper o unir otras proteínas y otros metabolitos.

Las proteínas son polímeros biológicos (como collares) que están constituidos por veinte monómeros diferentes (las cuentas del collar) lla-

mados aminoácidos. Por esta razón no puede haber correspondencia de un aminoácido por cada uno de los nucleótidos que integran los genes. La consecuencia obvia es que cada uno de los aminoácidos de una proteína debe estar “codificado” por grupos de nucleótidos. Al descifrar el código genético se comprobó que cada aminoácido está codificado por un grupo de tres nucleótidos al que se denomina triplete o codón. Asimismo, se determinó que en algunos casos más de un triplete codifica para un mismo aminoácido y que algunos tripletes codifican señales de terminación o iniciación para la síntesis proteica. Este código genético es universal ya que es el mismo para todos los seres vivos.

Los organismos transgénicos producen proteínas transgénicas. Entre estas proteínas están las producidas en las plantas transgénicas, llamadas bioinsecticidas, provenientes del genoma de la bacteria *Bacillus thuringensis*. Diferentes organismos producen proteínas transgénicas que se usan en la industria de alimentos procesados; muchas proteínas transgénicas se utilizan además como medicamentos transgénicos para contender con problemáticas clínicas y enfermedades patógenas. El conjunto de todas las proteínas que tiene una célula viva se denomina proteoma y su estudio, proteómica (ver figuras II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, ADN, ARN, ARN mensajero, medicamento transgénico, alimentos transgénicos, beneficios de los transgénicos, bioinsecticida, *Bacillus thuringensis*, código genético, codón, anticodón, ARN de transferencia, ARN ribosomal, ribosoma, síntesis de proteínas, aminoácido, polímero biológico, macromolécula biológica, biología, organismo vivo, gen, cromosoma, insulina, colágeno, tripsina, proteoma, proteómica, proteína recombinante).

Proteína recombinante

Proteína obtenida mediante técnicas de ingeniería genética o ADN recombinante usando transgenes (ver figuras II.9, II.10, II.12, II.13, II.14, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, ADN, proteína, insulina, interferón, hormona humana de crecimiento, transgén, medicamento transgénico, organismo vivo).

Proteína terapéutica

Proteínas que se utilizan en el tratamiento de enfermedades o problemáticas clínicas. En la actualidad muchas de ellas se producen por medio de técnicas de ingeniería genética, para fines de este libro son sinónimo de medicamentos transgénicos (ver figuras II.9, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, ADN, ingeniería genética, medicamento transgénico, beneficios de los transgénicos, inocuidad, transgén, salud, fármaco, biomedicamento, insulina, interferón, organismo vivo).

Proteoma

Conjunto de todas las proteínas que tiene un organismo vivo. Las proteínas pueden ser procesadas o modificadas químicamente por diferentes mecanismos después de ser sintetizadas en los ribosomas para asegurar su funcionamiento y degradación; en estos procesos se cuenta con la proteómica para analizar este tipo de eventos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, replicación, traducción, proteína, proteómica, célula, organismo vivo).

Proteómica

Una de las ciencias ómicas para caracterizar las células vivas. Análisis de los componentes proteicos que integran la célula viva. Este análisis no sólo incluye la identificación y cuantificación de

las proteínas con las que cuenta una célula, sino también la síntesis, degradación, localización, modificación, interacción, actividad y funciones de ellas. En los organismos transgénicos la proteína o proteínas codificadas por el transgén forman parte del proteoma de la célula transgénica que se estudia por proteómica. Muchas proteínas están involucradas en funciones vitales de la célula, tales como la transcripción del ADN por la enzima ARN polimerasa y el empaquetamiento del ADN en los cromosomas de células eucariotes llevado a cabo por las histonas como parte de los mecanismos que permiten la expresión de los genes y la regulación epigenética del genoma, conjuntamente con ciertas moléculas de ARN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, IV.2, IV.3, IV.5, IV.6, IV.8, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, ciencias ómicas, metabolómica, genómica, gen, transcriptómica, cromosoma, núcleo, proteoma, ARN mensajero, transcripción, ARN polimerasa, proteína, célula, organismo vivo, biología sintética, transgén, epigenética).

Protocolo de Cartagena

El Convenio sobre la Diversidad Biológica de la Organización de las Naciones Unidas entró en vigor en 1993 y establece un acuerdo sobre la seguridad en torno a la biotecnología, o bioseguridad, entre los países que lo firman. Con base en él, en 2000 se promulgó el Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología, el cual fue ratificado por México y entró en vigor en septiembre de 2003. Muchos países han firmado ambos acuerdos y han desarrollado una legislación adecuada para el manejo de los transgénicos (ver figura X.2, bioseguridad, beneficios de los transgénicos, seguridad de la biotecnología, riesgo biológico, inocuidad, ausencia de daño, plagas, Convenio sobre la Diver-

sidad Biológica, Protocolo de Nagoya Kuala-Lumpur, LBOGM).

Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur

Subsecuentemente al Convenio sobre la Diversidad Biológica y al Protocolo de Cartagena, este documento adicional precisa ciertos nuevos apoyos a la bioseguridad. Se le conoce como Protocolo de Nagoya Kuala-Lumpur sobre Responsabilidad y Compensación Suplementario al Protocolo de Cartagena sobre Bioseguridad de la Biotecnología (PN-K RB). Fue firmado por México en 2011 (ver figura X.2, bioseguridad, beneficios de los transgénicos, seguridad de la biotecnología, riesgo biológico, inocuidad, ausencia de daño, plagas, Convenio sobre la Diversidad Biológica, Protocolo de Cartagena, LBOGM).

Provirus

ADN de un virus cuando se encuentra integrado en el genoma de la célula infectada (ver figuras IX.5, IX.6, IX.7, retrovirus, virus, genoma, ADN).

Pseudoviral

Partícula formada por proteínas virales que en su interior llevan material genético no viral proveniente de la célula infectada por el virus original.

Quimosina

Enzima originalmente obtenida del estómago de terneras para la elaboración de queso. Primera proteína de origen recombinante aceptada en alimentos (ver figuras II.9, II.19, II.20, proteína, enzima, ingeniería genética, alimentos transgénicos, inocuidad, beneficios de los transgénicos, producto recombinante, salud, ausencia de daño).

Reacción en cadena de la polimerasa

Ver PCR.

Recalcitrante

Compuestos normalmente producidos por el hombre, entre ellos algunos insecticidas y herbicidas químicos que no son degradables ni reciclables biológicamente. Muchos de ellos causan daño a la salud y contaminan el medio ambiente (ver figuras II.24, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, V.7, VI.4, pesticida, herbicida, insecticida químico, riesgo, salud, plagas, contaminación, medio ambiente).

Recombinación genética del ADN

Mecanismo mediante el cual la célula viva rearrregla fragmentos de material genético. Esto puede suceder por la translocación de material genético existente, como los transposones, a otro lugar del genoma. Puede también ocurrir por la infección de un virus o por la incorporación de material genético existente en el suelo por la muerte de los organismos vivos. Este fenómeno es responsable de la reorganización del genoma de los organismos vivos; debido a él los transgenes se incorporan en el ADN de la célula receptora. En muchos casos, después de un evento de transposición de ADN por transposones, la reorganización del genoma genera cambios profundos y mutaciones (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, transgén, transgénico, reorganización del genoma, infección, integración de ADN heterólogo, transformación, organismo vivo, transposón, mutación, influenza).

Recombinación in vitro

Técnica que permite el aislamiento de material genético (genes) de cierto origen y su unión en un tubo de ensayo, en el laboratorio, con ADN de otro origen. Sinónimo de ingeniería genética usando trans-

genes. Con estas técnicas se construyen organismos transgénicos (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, ingeniería genética, transgénico, transgén, recombinación genética del ADN, clonación molecular de ADN).

Recombinante

Ver producto recombinante, recombinación genética del ADN, *in vitro*, ingeniería genética.

Recursos biológicos

Recursos genéticos, organismos o partes de ellos, poblaciones o cualquier otro componente biótico de ecosistemas que integran la biodiversidad con valor o utilidad real o potencial para el ser humano (ver biodiversidad, biotecnología moderna, organismo vivo).

Recursos genéticos

Material genético de valor real o potencial que existe en los organismos que componen la biodiversidad del planeta (ver biodiversidad, ADN, organismo vivo, recursos biológicos).

Remediación

Conjunto de técnicas y herramientas que permiten limpiar o remediar un sistema o hábitat contaminado. Muchos de estos procesos utilizan organismos vivos, incluyendo transgénicos o sus partes, y por ello se consideran procesos biorremediantes (ver figuras II.24, V.2, V.6, VI.4, bacteria, planta transgénica, microorganismo, salud).

Reorganización del genoma

Fenómeno que tiene como resultado que segmentos del genoma cambien o reubiquen su posición. El genoma reorganizado implica que un fragmento de ADN de origen infeccioso (viral o bacteriano) se incorpore a una célula y que dé lugar, me-

dante recombinación genética, a la integración, translocación o reubicación de fragmentos de ADN. Normalmente las células reorganizan su genoma. Los transposones, secuencias de ADN que se mueven y reubican sus posiciones en el genoma, son los responsables de este fenómeno de translocación sin necesidad de un ADN proveniente de un virus o bacteria. En el maíz los transposones (que suman más del 80% de su genoma) son responsables de causar mutaciones, incluyendo la formación de variedades intraespecie. El ADN transferido horizontalmente, como es el caso de los transgenes en organismos transgénicos, debe recombinar con el ADN de la célula receptora dando lugar a la reorganización del genoma (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, recombinación genética del ADN, transposón, ingeniería genética, transgén, transgénico, planta transgénica, planta de maíz, genoma, evolución de las especies, transferencia horizontal de ADN, organismo vivo, agricultura de precisión).

Replicación

Proceso enzimático de la célula por el cual las moléculas de ADN se duplican y generan dos dobles hélices iguales a partir de una sola hélice doble. El proceso requiere la separación de las dos hélices de la molécula original. Mediante este proceso la célula viva puede replicar la información genética original y transferir de manera vertical (de padres a hijos, a través de la fusión de cigotos en el caso humano) la información a los descendientes. Gracias a este proceso el ADN, como parte de los cromosomas, transmite la vida entre generaciones (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, ADN, cromosoma, telómero, centrómero, gen,

núcleo, ARN mensajero, transcripción, polimerasa de ADN, PCR, doble hélice del ADN, organismo vivo, transferencia vertical de ADN, epigenética).

Resistencia

En biología molecular es un sistema que permite la selección de un organismo y que utiliza generalmente genes que codifican para proteínas que confieren resistencia a un antibiótico, a una plaga de insectos o de malezas mediante ingeniería genética o por transgénesis. La resistencia también ocurre de manera natural en los organismos vivos para proporcionarles ventajas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, II.23, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, ADN, cromosoma, gen, núcleo, transcripción, replicación, transgén, transgénico, planta transgénica, plagas, antibiótico, proteína, organismo vivo).

Retrovirus

Virus cuyo genoma es de ARN (como el virus de la inmunodeficiencia humana, VIH) e infecta a células de eucariotes. Se replica sintetizando una copia de ADN complementario a partir de su ARN (transcripción reversa). Este ADN complementario se inserta en el ADN cromosomal de la célula huésped. A partir de este ADN integrado (provirus) se sintetizan los ARN mensajeros virales, así como al ARN genómico que se incorpora en los nuevos virus. Este tipo de virus es responsable del proceso de transferencia horizontal de ADN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, IX.2, IX.3, IX.4, IX.5, IX.6, IX.7, IX.8, IX.9, IX.11, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, transcripción reversa, virus).

Ribonucleótido

El ARN es un polímero que está integrado por mo-

números llamados ribonucleótidos. Éstos a su vez están formados por un azúcar (ribosa), una base púrica (A o G) o pirimídica (U o C), unidos por grupos fosfatos (ver figuras II.5, II.6, II.7, ARN, ADN, ribosa, nucleótido, monómero, polímero biológico).

Ribosa

Es el azúcar que forma parte de los ribonucleótidos del ARN. En éste existen cuatro ribonucleótidos como en el ADN, pero a diferencia del ADN, en el ARN no existe el ribonucleótido con base timina (T) sino con base uracilo (U). En la síntesis de moléculas de ARN en procesos de transcripción los ribonucleótidos con base guanina (G) se aparean con nucleótidos con base citosina (C) y los ribonucleótidos con base adenina (A) se aparean con bases uracilo (U). Es un metabolito de la célula (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, ADN, ARN, transcripción, metabolito, metaboloma, ribonucleótido, cromosoma).

Ribosoma

Organelo en el que se sintetizan las proteínas en los seres vivos de acuerdo con las instrucciones presentes en el ARN mensajero. Es un agregado de proteínas y ARN. Los ribosomas están formados por dos subunidades diferentes de ARN que conjuntamente tienen capacidad catalítica en la síntesis de proteínas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, cromosoma, núcleo, ARN mensajero, organelo, transcripción, traducción, ARN de transferencia, ARN ribosomal, ARN no codificante, codón, anticodón, aminoácido, organismo vivo).

Riesgo

Probabilidad de que un peligro ocurra. Esta probabilidad de ocurrencia depende de varios factores:

la posibilidad de exposición y la posibilidad de que el peligro ocurra habiéndose dado la exposición. En el contexto de los transgénicos, es la posibilidad de que la presencia o utilización de organismos transgénicos o de sus productos pudieran causar daño a la salud humana, a la salud animal o a la biodiversidad presente en el planeta. A la fecha no hay evidencia científica que indique daño a la salud humana, ni al medio ambiente ni a la biodiversidad por el uso de OGM o sus productos, aunque toda tecnología tiene la posibilidad implícita de causar daño si se utiliza irresponsable e ilegalmente. Además de ser parte del Convenio sobre la Diversidad Biológica y el Protocolo de Cartagena, México cuenta con la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados y desarrolla normas para un manejo responsable de los OGM, lo que minimiza los posibles riesgos de su utilización (ver figuras X.2, X.4, bioseguridad, riesgo biológico, bioseguridad, seguridad de la biotecnología, transgénico, planta transgénica, inocuidad, ausencia de daño, beneficios de los transgénicos, Convenio sobre la Diversidad Biológica, Protocolo de Cartagena, LBOGM).

Riesgo biológico

Riesgo que existe sobre la salud humana, animal y vegetal y sobre el medio ambiente a causa de ciertos tipos de productos y procesos biotecnológicos, incluidos los organismos transgénicos, su consumo como alimento y su liberación al medio ambiente. A la fecha no hay evidencia científica que indique daño a la salud humana, ni al medio ambiente ni a la biodiversidad por el uso de transgénicos o sus productos, en particular por plantas transgénicas. México cuenta con un marco jurídico para el uso responsable de OGM y sus productos (ver figuras II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, II.23, III.1, III.2, III.8, III.9,

IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, X.2, X.4, bioseguridad, alimentos transgénicos, evidencia sustentada científicamente, beneficios de los transgénicos, inocuidad, ausencia de daño, salud, transgénico, seguridad de la biotecnología, planta transgénica, planta de maíz, organismo genéticamente modificado, organismo vivo, LBOGM, Protocolo de Cartagena, Protocolo de Nagoya-Kuala Lumpur, Convenio sobre la Diversidad Biológica).

Streptococcus pneumoniae

Bacteria patógena causante de infección en el aparato respiratorio de humanos y animales. Se combate y elimina con antibióticos (ver figuras II.12, II.13, II.14, IX.8, IV.9, bacteria, organismo patógeno, antibiótico, organismo vivo, salud).

Salud

Según la Organización Mundial de la Salud, es “un estado para el organismo de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de enfermedades”. En el contexto de este libro el uso y consumo de transgénicos, sus beneficios y su ausencia del daño, se refieren a su inocuidad y a que su consumo desde hace más de 20 años por cientos de millones de seres humanos y miles de millones de animales (en particular de plantas transgénicas y productos derivados) no ha generado daño a la salud humana ni animal. Gracias a los organismos genéticamente modificados hoy contamos con cerca de 100 medicamentos de origen transgénico para enfrentar diversas problemáticas de la salud, incluyendo biomedicamentos y vacunas para atender enfermedades metabólicas, clínicas y de tipo infeccioso. Asimismo, gracias a las plantas transgénicas se ha reducido notablemente el uso de insecticidas químicos en el campo, muchos de los cuales contaminan el

medio ambiente, pueden dañar la salud humana y animal y algunos son carcinogénicos. México cuenta con un marco jurídico adecuado para la vigilancia y consumo de OGM (ver figuras II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, II.23, III.1, III.2, III.8, III.9, IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, beneficios de los transgénicos, medicamento transgénico, biofármaco, fármaco, organismo patógeno, influenza, VIH, infección, biomedicamento, alimentos transgénicos, amilasa, lactasa, quimosina, insulina, interferón, proteína terapéutica, transgénico, planta transgénica, riesgo biológico, biotecnología, cáncer, enfermedad genética, inocuidad, ausencia de daño, insecticida químico, contaminación, medio ambiente, carcinogénico, sanidad, LBOGM).

Sanidad (animal o vegetal)

Medidas que deben adoptarse e implementarse para preservar, afrontar y limitar los riesgos de enfermedades o contaminación química o biológica que afectan a animales y vegetales. En el contexto de este libro, los riesgos incluyen aquellos que pudieran ocurrir por la presencia y el consumo de OGM y sus productos (ver riesgo biológico, bioseguridad, transgénico, salud, organismo vivo, LBOGM).

Secuenciación de ácidos nucleicos

Ver secuenciación de ADN.

Secuenciación de ADN (o de genomas)

Una de las ciencias ómicas que permita la caracterización de la célula viva. En apoyo a la genómica, metodologías que permiten determinar la posición (secuencia) que guardan los nucleótidos, uno inmediatamente después del anterior, en el polímero de la hebra de la molécula de ADN. Existen varias

técnicas para determinar la secuencia de los millones de nucleótidos en la molécula de ADN. La información generada se almacena en bancos de secuencias que permiten analizarlas y compararlas. El conjunto de todos los ADN de un organismo se llama genoma (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, ADN, ARN, ciencias ómicas, proteómica, transcriptómica, metabolómica, genoma, genómica, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, nucleótido, genómica comparada, bioinformática, organismo vivo).

Secuenciación de proteínas

Posición (secuencia) que guardan los aminoácidos, uno inmediatamente después del anterior, en el polímero de proteína. Como analogía, entiéndase la secuencia de las cuentas de un collar donde cada cuenta es un aminoácido y el collar es la proteína. Es una metodología que apoya la proteómica (ver figura II.9, proteoma, proteómica, ciencias ómicas, bioinformática, aminoácido, proteína).

Seguridad de la biotecnología

En el Convenio sobre la Diversidad Biológica se establece un acuerdo sobre la seguridad de la biotecnología. Conforme al Protocolo de Cartagena los países firmantes se comprometen a crear reglamentaciones y medidas para evaluar organismos transgénicos y para analizar sus posibles efectos adversos en la salud humana y la diversidad biológica. México cuenta además con la Ley General de Salud y la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados para el manejo responsable de los transgénicos. No hay evidencia de daño a la salud, al medio ambiente o la biodiversidad por el uso de organismos transgénicos y sus productos; cientos de

millones de personas y miles de millones de animales los consumen desde hace más de 20 años (ver figuras III.1, III.2, III.3, III.4, III.7, III.8, III.9, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.8, V.1, V.2, V.3, V.4, V.6, VI.2, VIII.1, VIII.2, VIII.3, X.2, X.4, LBOGM, Protocolo de Cartagena, Convenio sobre la Diversidad Biológica, bioseguridad, riesgo biológico, riesgo, salud, organismo vivo, ausencia de daño, planta transgénica, beneficios de los transgénicos, inocuidad, alimentos transgénicos, insecticida químico, bioinsecticida, biotecnología).

Semilla híbrida

Producto de una nueva variedad producida por el cruzamiento y selección de dos especies diferentes de una planta, como el maíz o el trigo (ver planta, organismo vivo, cultivares convencionales).

Serina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ADN de transferencia, metabolito).

Sida

Acrónimo de la enfermedad denominada Síndrome de Inmunodeficiencia Adquirida causada por el retrovirus de la inmunodeficiencia humana, VIH (ver figuras IX.5, IX.6, IX.7, virus, retrovirus, VIH, infección).

Simbiogénesis

Término que se refiere a la formación de nuevas formas de vida, órganos u organelos (como las mitocondrias) que se logran mediante la asociación permanente de formas de vida previamente establecidas. Se ha propuesto un papel relevante

de este tipo de proceso biológico, también llamado endosimbiosis, en la evolución de las especies (ver figuras IX.8, IX.10, IX.11, IX.12, ADN, endosimbiosis, transferencia horizontal de ADN, cloroplasto, mitocondria, organelo, célula, evolución de las especies, organismo vivo).

Síntesis biológica

Proceso mediante el cual las células producen moléculas biológicas. Algunas de éstas, como ácidos nucleicos, proteínas, metabolitos, antibióticos, vitaminas y medicamentos, tienen valor comercial (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.7, II.8, II.9, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.18, II.19, II.20, II.21, ADN, ARN, proteína, transgénico, beneficios de los transgénicos, medicamento transgénico, organismo vivo).

Síntesis química de ADN (y de proteínas)

Proceso de elaboración de moléculas complejas mediante reacciones químicas, incluyendo oligonucleótidos y proteínas. La síntesis química de ADN se utilizó para construir los primeros genes que codificaron para la insulina idéntica a la humana, la cual fue producida por ingeniería genética en bacterias utilizando genes sintéticos. Estrictamente hablando éste fue el primer ejemplo de la biología sintética (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.19, ADN, ADN recombinante, iniciador, ingeniería genética, insulina, amplificación de ADN, PCR, oligonucleótido, biología sintética, proteína).

Síntesis de proteínas

Proceso celular mediante el cual se sintetizan proteínas en los ribosomas. La célula utiliza la secuencia de nucleótidos presente en el ARN mensajero que es leída de tres en tres por los ARN de transferencia, dando lugar así a la síntesis de pro-

teínas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, cromosoma, gen, núcleo, ADN, ARN, ARN mensajero, ARN de transferencia, código genético, codón, proteína, anticodón, nucleótido, transcripción, traducción, organismo vivo).

Sistema biológico

Se refiere a los organismos vivos que incluyen microorganismos, plantas y animales (ver célula, planta, animal, microorganismo, organismo vivo).

Sonda

Fragmento pequeño y específico de ADN o ARN (oligonucleótido) que por su asociación con la secuencia complementaria se utiliza en métodos de diagnóstico (ver figuras II.12, II.13, II.14, II.15, PCR, diagnóstico, oligonucleótido, polímero biológico, ADN, ARN, replicación).

Sustentar

Soportar y defender con razones científicas (ver evidencia sustentada científicamente).

Sustrato

Sustancia o molécula con la que interacciona una enzima de manera específica y que luego se transforma en producto (ver figuras II.9, II.18, II.19, proteína, enzima).

Tecnología biológica

Conjunto de métodos sustentados en el conocimiento de los organismos vivos que al ser escalados al nivel adecuado permiten la producción a nivel industrial de moléculas biológicas de interés comercial. Alternativamente, la tecnología biológica puede ser también un conjunto de métodos utilizados para resolver un problema, por ejemplo, la contaminación de un hábitat ecológi-

co específico. Los transgénicos y sus transgenes son parte de la biotecnología moderna o tecnología biológica, diseñados para atender demandas y problemas específicos (ver figuras II.2, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, ADN, biotecnología moderna, transgén, transgénico, planta transgénica, beneficios de los transgénicos, ausencia de daño, organismo vivo, agricultura de precisión).

Telómero

Estructuras que se encuentran al final de los cromosomas de células de organismos eucariotes, entre ellos animales y plantas. Se componen de una misma secuencia repetida, en promedio 3,000 veces, y son importantes para la apropiada replicación del ADN en los cromosomas de eucariotes (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, ADN, cromosoma, centrómero, replicación, cromatina, núcleo, nucleosoma, gen, célula, pares de cromosomas, organismo vivo, eucariote, histonas, epigenética, marcas epigenéticas).

Teoría de la evolución de las especies

Propuesta por Darwin, señala que todos los seres vivos del planeta, incluidos los humanos, procedemos de un organismo común. La transgénesis ha sido responsable en parte del proceso de evolución de las especies (ver figuras IX.1, IX.2, IX.3, IX.4, IX.5, IX.6, IX.7, evolución de las especies, endosimbiosis, transgénesis, transferencia horizontal de ADN, reorganización del genoma, organelo, mitocondria, simbiogénesis, organismo vivo).

Timina

Una de las cuatro bases nitrogenadas que conforman los nucleótidos que integran el ADN. Es también uno de los metabolitos de la célula (ver

figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, transcripción, replicación, metabolito).

Tirosina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito).

Toxicidad

Se refiere al posible efecto de envenenamiento en el usuario.

Traducción

Proceso enzimático por el cual la célula reconoce y lee la secuencia de codones del ARN. Mediante este proceso se elabora una cadena de proteína conforme al código genético, leyendo de tres en tres los nucleótidos que conforman el ARN mensajero (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, organismo vivo).

Transcripción

Proceso celular mediante el cual se sintetiza ARN mensajero, ARN ribosomal, ARN de transferencia o de otro tipo a partir del ADN. El conjunto de todas las moléculas de ARN que tiene un organismo se conoce como transcriptoma (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, ARN no codificante, ribosoma, transcriptoma, cromosoma, gen, núcleo, traducción, ARN mensajero, proteína, organismo vivo).

Transcripción reversa

Proceso de sintetizar una copia de ADN a partir de un ARN. Ocurre en las células infectadas con retrovirus que tienen ARN como material genético. Al introducirse este material genético a la célula se generan copias de ADN a partir del ARN del virus. En el caso de los retrovirus este material de ADN copiado a partir de ARN se puede integrar en el genoma de la célula infectada y por ello ocurre transferencia horizontal de material genético (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcripción, retrovirus, reorganización del genoma, transferencia horizontal de ADN, ADN complementario, organismo vivo).

Transcriptoma

Conjunto de todos los transcritos de ARN que se pueden sintetizar a partir de las secuencias de ADN de una célula. Muchos de los transcritos de ARN se traducen en proteínas pero un gran número no; éstos llevan a cabo otras funciones en la célula, como los ARN involucrados en la síntesis de proteínas que forman parte de los ribosomas y los ARN de transferencia. Un número muy importante de moléculas de ARN pequeñas, de bajo peso molecular, están involucradas en muchas otras funciones, incluyendo la regulación epigenética del genoma. Además, se sabe de la existencia de otros ARN de los que se desconoce su función. El análisis de las funciones de los diferentes ARN se lleva a cabo mediante la transcriptómica con el apoyo de otras ciencias ómicas (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transcriptómica, ciencias ómicas, transcripción, replicación, organismo vivo, epigenética).

Transcriptómica

Una de las ciencias ómicas para caracterizar la célula viva. Análisis del conjunto de transcritos de ARN que se pueden generar en una célula en diferentes condiciones metabólicas. Este conjunto varía: implica qué genes se están expresando y dando lugar al conjunto de ARN mensajeros, ribosomales, de transferencia y muchos otros ARN pequeños que se generan a partir de la transcripción del genoma de una célula. El análisis incluye la cuantificación, caracterización, localización, modificación, degradación y otras funciones asociadas a los ARN. La transcripción de los genes del genoma en ARN ocurre gracias a la ARN polimerasa, enzima que en asociación con otras proteínas se vuelve parte de la maquinaria para transcribir (copiar) el ADN en ARN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, ciencias ómicas, proteómica, genómica, metabolómica, cromosoma, gen, ARN mensajero, transcripción, organismo vivo, transcriptoma, genoma, ARN polimerasa, biología sintética).

Transferencia horizontal de ADN

Mecanismo mediante el cual una célula viva puede recibir material genético de otros organismos (proveniente de un virus o una bacteria) o a través de incorporar material genético existente en el entorno por medio del fenómeno de la transformación u otro mecanismo. Este fenómeno, que ocurre de manera cotidiana en la biota, permite a la célula que lo recibe incorporar y utilizar material genético de otro origen. A través de este fenómeno el genoma se puede reorganizar o reorganizar cambiando su secuencia nucleotídica y por ello la célula adquiere nuevas funciones codificadas por el nuevo material genético. Este mecanismo ha sido responsable en parte de la evolución de las espe-

cies. Mediante él se construyen plantas transgénicas por ingeniería genética o biobalística, células de animales transgénicos por ingeniería genética o electroporación y células de procariontes (bacterias) transgénicas mediante ingeniería genética en las cuales se transfieren e incorporan transgenes a los nuevos organismos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.22, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, IX.17, IX.18, IX.19, IX.20, IX.21, ADN, cromosoma, ingeniería genética, plásmido, biobalística, electroporación de ADN, gen, núcleo, endosimbiosis, *Agrobacterium tumefaciens*, transgén, transgénico, organismo genéticamente modificado, planta transgénica, animal, bacteria, transcripción, reorganización del genoma, transformación, virus, evolución de las especies, organismo vivo, ausencia de daño).

Transferencia vertical de ADN

Fenómeno que transfiere la información contenida en el ADN de padres a hijos después de que el ADN se ha replicado. Dependiendo del organismo existen diferentes mecanismos y elementos; en el caso de los humanos se produce después de la fusión del esperma con el óvulo para formar el cigoto que lleva el ADN de ambos padres. A partir del cigoto se desarrolla el nuevo individuo (ver figuras II.2, II.4, II.5, II.11, ADN, replicación, organismo vivo, epigenética).

Transformación

Fenómeno que, en el contexto de este libro, permite introducir material genético a una célula mediante transferencia horizontal de ADN. Si el material genético es incorporado en el genoma de la célula receptora el ADN puede ser estabilizado y transferido a células hijas. El material genético también puede ser estabilizado por medio de téc-

nicas de ingeniería genética uniéndolo a un vector o plásmido (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, ARN, cromosoma, gen, ARN mensajero, transcripción, reorganización del genoma, transferencia horizontal de ADN, heterólogo, plásmido, ingeniería genética, transgén, planta transgénica, organismo vivo).

Transgén

Material genético de origen distinto (heterólogo) al de la célula que lo recibe, incorporado mediante transferencia horizontal de ADN por técnicas de ingeniería genética o de otro tipo (biobalística, electroporación). El organismo que resulta de este proceso se le llama organismo transgénico, transgénico u organismo modificado genéticamente (OGM). Los transgenes codifican para diferentes proteínas y cada transgén representa una nueva propiedad o característica ventajosa a la célula u organismo que lo recibe (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.22, II.23, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, transcripción, ingeniería genética, transgénico, planta transgénica, transferencia horizontal de ADN, organismo vivo, biobalística, electroporación de ADN, recombinación del genoma, ausencia de daño, agricultura de precisión).

Transgénesis

Es un fenómeno natural que ha ocurrido siempre y seguirá ocurriendo en la biota, independientemente de la existencia de organismos transgénicos. Implica la transferencia horizontal de ADN de cualquier origen y la reorganización del genoma de la célula receptora. Sinónimo de transferencia horizontal de ADN y reorganización del genoma en la biota. Ha sido responsable a lo lar-

go del tiempo de la adquisición de muchas funciones nuevas, en particular en precursores de plantas; por ejemplo: los genes responsables de la fotosíntesis que originalmente se hallaron en bacterias y los precursores de organelos celulares (mitocondrias y cloroplastos) por endosimbiosis. También existe material genético de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* en los camotes que se consumen actualmente, lo cual los vuelve naturalmente transgénicos desde hace cientos de años. En alguna medida la transgénesis ha sido responsable de la evolución de las especies. La razón más importante que sustenta esta capacidad es la que la estructura general del ADN es la misma en todos los organismos vivos y esto permite la recombinación del ADN de cualquier origen en la célula receptora. Los organismos transgénicos han sido construidos utilizando o copiando la capacidad de transgénesis que existe en la biota, la transferencia horizontal de ADN y la reorganización del genoma en la célula blanco. Es importante señalar que, sin embargo, los actuales organismos vivos hemos desarrollado mecanismos que nos permiten contender y eliminar ADN de origen foráneo o heterólogo que pudiera llegar a las células por transferencia horizontal de ADN, como el proveniente de infecciones virales. Debido a ello la transgénesis es hoy un fenómeno poco frecuente que, no obstante, sigue ocurriendo, particularmente por la infección de ciertos virus que pueden incorporar su material genético en los cromosomas de las células que infectan —como el retrovirus causante de la inmunodeficiencia humana (VIH)— y también mediado por ciertas bacterias, como la *Agrobacterium tumefaciens* que transfiere horizontalmente parte de su material genético a las plantas que infecta (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, IX.1, IX.2,

IX.3, IX.4, IX.5, IX.7, IX.8, IX.20, IX.21, IX.22, ADN, estructura general del ADN, evolución de las especies, endosimbiosis, infección, transgén, transgénico, organismo genéticamente modificado, organismo vivo, biodiversidad, transferencia horizontal de ADN, reorganización del genoma, genoma, cromosoma, eucariote, procarote, célula, fotosíntesis, planta, ingeniería genética, biota).

Transgénico

Sinónimo de organismo transgénico, OGM y organismo genéticamente modificado. Organismo biológico al que se le ha incorporado uno o varios transgenes provenientes de un organismo de otra especie mediante transferencia horizontal de ADN, usando principalmente técnicas de la ingeniería genética y otras (biobalística o electroporación). Los transgenes que codifican para diferentes proteínas otorgan nuevas e importantes ventajas al organismo que los porta, como la capacidad para eliminar plagas de insectos. Normalmente se estabilizan mediante recombinación genética con el material genético de la célula receptora. Mediante la multiplicación de estas células transformadas los transgenes pueden ser transmitidos a la progenie. Los transgénicos han generado grandes beneficios, entre ellos los medicamentos de origen transgénico y la reducción en el uso de insecticidas químicos, muchos de los cuales contaminan al medio ambiente y dañan a la salud. El consumo de organismos transgénicos como medicamentos o alimentos no causan daño a la salud humana ni animal.

De la misma manera en que los genes de un organismo silvestre o una variedad convencional son regulados epigenéticamente, los transgenes integrados en OGM, en particular en plantas de maíz, también pueden ser sujetos de regulación epigenética. El empleo de transgenes como he-

rramientas moleculares ha sido esencial para entender la función y las bases moleculares de diversos mecanismos de regulación epigenética, incluyendo el fenómeno de silenciamiento de genes en plantas (cosupresión) y el descubrimiento de las bases moleculares del ARN interferente. Los organismos transgénicos que adquieren nuevas funciones codificadas en los transgenes son también organismos genéticamente mejorados. Existe una excepción de maíz transgénico que no lleva transgén. En esta planta las nuevas propiedades residen en fragmentos de ADN de otros orígenes (por eso es transgénica) que le permiten modificar la expresión de un gen de la propia planta que codifica para una proteína con la que adquiere resistencia a heladas y sequías (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21, II.22, III.1, III.2, III.4, III.7, III.8, III.9, IV.2, IV.3, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.10, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6, VI.1, VI.2, VI.4, VIII.1, VIII.2, VIII.3, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, IX.17, IX.18, IX.19, IX.20, IX.21, X.2, X.4, ADN, ARN, ARN no codificante, beneficios de los transgénicos, medicamento transgénico, alimentos transgénicos, ausencia de daño, inocuidad, cromosoma, gen, núcleo, eucariote, procarote, transcripción, ingeniería genética, bioseguridad, clonación molecular de ADN, transgén, transgenosis, *Agrobacterium tumefaciens*, síntesis química de ADN, transferencia horizontal de ADN, electroporación de ADN, OGM, biobalística, medio ambiente, contaminación, insecticida químico, reorganización del genoma, organismo vivo, planta de maíz, planta transgénica, biología sintética, epigenética, histonas, marcas epigenéticas, regulación epigenética, cromatina, salud, ADN recombinante, agricultura de precisión, organismo genéticamente mejorado).

Transgenosis

Proceso mediante el cual se incorpora material genético (transgén) de un organismo a otro y se generan organismos transgénicos o genéticamente modificados en los que el donador y el receptor son diferentes. Sinónimo de ingeniería genética y de transgénesis. Es un término poco usado ya (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, II.15, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, transgén, cromosoma, gen, núcleo, transcripción, transgénico, planta transgénica, biobalística, ingeniería genética, transferencia horizontal de ADN, reorganización del genoma, organismo vivo, ausencia de daño, agricultura de precisión).

Transposasa

Enzima responsable del movimiento o reubicación de un transposón a otro lugar del genoma en una célula (ver figuras II.9, II.11, IX.9, IX.10, IX.11, IX.15, IX.16, transposón, reorganización del genoma, genoma, proteína, planta de maíz, epigenética).

Transposón

Elemento de ADN capaz de reubicarse (moverse o relocalizarse) de un lugar a otro del genoma en una misma célula, a través de la acción de transposasas. El caso del maíz es relevante dado que en él los transposones representan más del 80% de su genoma (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, transcripción, transposasa, planta de maíz, planta transgénica, reorganización del genoma, epigenética).

Treonina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de pro-

teínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma).

Tripanosoma

Animales parásitos de otros animales (ver organismo patógeno, organismo vivo, salud).

Triplete

Ver codón.

Tripsina

Enzima de los animales superiores usada para degradar, en su estómago, otras proteínas que forman parte de los alimentos (ver figuras II.9, II.18, II.19, II.20, proteína, enzima).

Triptofano

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia).

Uracilo

Una de las cuatro bases nitrogenadas que conforman los nucleótidos que integran el ARN. Existen millones de nucleótidos en una molécula de ARN (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, ADN, ARN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, replicación, transcripción, traducción).

Valina

Uno de los 20 aminoácidos que integran las proteínas. Uno de los metabolitos de la célula (ver figuras II.6, II.7, II.8, II.9, proteína, síntesis de proteínas, codón, código genético, polímero biológico, ARN mensajero, ARN de transferencia, metabolito, metaboloma).

Vacuna

Conjunto de moléculas biológicas que al ser introducido en un mamífero genera anticuerpos específicos y eventualmente confiere inmunidad contra el patógeno que contenga este conjunto particular de moléculas biológicas (ver inmunógeno, anticuerpo).

Vector

Tipo de ADN que puede replicar su material genético en el interior de ciertas células huéspedes (como plásmidos y virus) y que es capaz de transferir fragmentos de ADN entre diferentes organismos (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.7, IX.11, IX.15, IX.16, ADN, cromosoma, gen, núcleo, ARN mensajero, transgén, transcripción, ingeniería genética, herramientas moleculares, transgénico, planta transgénica, virus, plásmido).

Vía metabólica

Conjunto de reacciones enzimáticas que tiene la célula para llevar a cabo una función de síntesis o degradación de metabolitos celulares (ver célula, metabolismo, metabolito, metaboloma).

VIH

Virus de la inmunodeficiencia humana causante del sida. Es un retrovirus (ver figuras IX.6, IX.7, virus, salud, retrovirus, sida, transgenosis).

Virulencia

Medida del carácter patogénico (o patogenicidad) de un microorganismo. Está determinada por el conjunto de moléculas y mecanismos que los virus y las bacterias patógenas tienen para poder infectar y multiplicarse en un organismo (ver figuras IX.5, IX.6, IX.7, IX.8, IX.9, IX.10, IX.11, virus, organismo patógeno, retrovirus, salud, bacteria).

Virus

Partícula microscópica formada por una cubierta de proteínas que engloba el genoma del virus formado por una o varias moléculas de ácidos nucleicos (ADN o ARN). Los virus son parásitos intracelulares que sólo pueden multiplicarse al infectar células susceptibles para su replicación (ver figuras II.2, II.3, II.4, II.5, II.6, II.9, II.10, II.11, II.12, II.13, II.14, IX.2, IX.3, IX.5, IX.6, IX.7, IX.8, IX.11, IX.15, ADN, ARN, sida, cromosoma, gen, núcleo, transcripción, ácidos nucleicos, retrovirus, virulencia, célula).

Zoonosis

Enfermedades que son transmitidas de manera natural de animales a humanos. Ejemplos de zoonosis son las infecciones por el virus del ébola y en algunos casos por el de la influenza (ver figuras IX.5, IX.6, IX.7, virus, organismo vivo, ébola, influenza).

ANEXO 2

LISTADO DE EVENTOS RELEVANTES VINCULADOS CON LA BIOTECNOLOGÍA

A continuación se presenta un listado de hechos y eventos destacados relacionados con la biotecnología y con el uso de seres vivos para contender con necesidades principalmente en materia de alimento y salud. Se incluyen también algunos acontecimientos científicos notables relacionados con la célula viva y la biotecnología, así como con la creación de algunas instituciones en México y otras fechas relevantes para el marco jurídico de la biotecnología.

500 Se utiliza en China el primer antibiótico a base de emplastes de moho de soya en el tratamiento de quemaduras.

100 Se produce en China el primer insecticida a partir de polvos de crisantemo.

1761 E. Jensen desarrolla la primera vacuna contra la viruela.

1859 C. Darwin elabora y publica su teoría de la evolución de las especies.

1870 Se desarrollan los primeros cruzamientos genéticos en algodón para generar variedades de calidad superior.

Se produce el primer híbrido de maíz en laboratorio.

1871 Se describe el ácido desoxirribonucleico (ADN) en el esperma de la trucha.

1880 G. Mendel descubre que existen elementos genéticos discretos (a los que posteriormente se les denomina genes), en donde residen características específicas de los organismos vivos y que son heredados a la progenie.

1885 L. Pasteur desarrolla la vacuna contra la rabia.

1911 T. Morgan y colaboradores elaboran los primeros mapas genéticos con las posiciones de los genes en los cromosomas de la mosca de la fruta.

- 1922 A. Fleming descubre la penicilina. tiene la información y la capacidad para dirigir la incorporación de aminoácidos en la síntesis de las proteínas.
- 1933 Se comercializa el primer híbrido de maíz mejorado. M. Nirenberger y colaboradores, establecen con base en las propuestas de F. Crick el código genético universal.
- 1942 Se produce penicilina comercialmente mediante cultivos de hongos. F. Jacob y colaboradores aíslan el primer elemento que regula la expresión de los genes.
- 1944 O. Avery, C. MacLeod y M. McCarty demuestran que el ADN es la sustancia en donde reside la información genética. 1967 Se aísla la enzima ligasa del ADN, lo que permite unir fragmentos de ADN de diferentes orígenes.
- 1951 Se logra la primera inseminación artificial de ganado. 1970 H. Smith y colaboradores aíslan por primera la enzima nucleasa de restricción que corta en sitios específicos las moléculas de ADN.
- 1953 J. Watson y F. Crick describen la estructura conformacional de la doble hélice del ADN. 1973 S. Cohen y H. Boyer desarrollan el primer organismo transgénico mediante la inserción de un fragmento de ADN de rana en un plásmido bacteriano, introducido luego en la bacteria *Escherichia coli*.
- 1957 B. McClintock postula la existencia de los transposones para explicar el rearreglo del material genético que ocurre en los granos de diferentes colores en las mazorcas de maíz. 1977 R. Maxam y W. Gilbert, así como F. Sanger y colaboradores, desarrollan simultáneamente métodos para determinar la secuencia de los nucleótidos del ADN. Se descubren los intrones y los exones en los genes de los organismos superiores. K. Itakura y colaboradores, entre ellos, F. Bolívar, crean el primer organismo transgénico que permite la síntesis de una hormona idéntica a la humana en bacterias.
- 1958 M. Meselson y F. Stahl demuestran que la replicación del ADN ocurre a través de la separación de las dos hélices del ADN y del copiado *de novo* de sus dos hélices para formar dos dobles hélices idénticas a partir de la original. Se sintetiza químicamente ADN en un tubo de ensayo por primera vez. 1978 Se reporta la secuencia genómica completa de un virus: el ØX174. Se produce insulina idéntica a la humana por organismos transgénicos, reportada por D. Goeddel y colaboradores, entre ellos F. Bolívar.
- 1960 A. Kornberg aísla la enzima de ADN polimerasa que se utiliza en las técnicas de amplificación *in vitro* de genes. 1979 Se crea la primera compañía en ingeniería genética: Genentech, Inc., en Estados Unidos. Se produce hormona de crecimiento humana recombinante en organismos transgénicos. Se crea el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).
- 1961 S. Brenner y colaboradores descubren el ARN mensajero y demuestran que éste 1980 La Suprema Corte de Justicia de Estados Unidos aprueba el patentamiento de organismos vivos. 1981 Se reporta la secuencia del genoma de la mitocondria humana. Se produce el primer animal transgénico al incorporar genes de humano en un ratón. 1982 P. Valenzuela y colaboradores desarrollan el primer producto de origen transgénico que se utiliza como vacuna en humanos para inmunizar contra el virus de la hepatitis. Se produce insulina idéntica a la humana comercialmente como el primer medicamento de origen transgénico. Se crea el Centro de Investigación sobre Ingeniería Genética y Biotecnología de la UNAM, cuyo fundador y primer director fue F. Bolívar. En 1991 este centro se transforma en el Instituto de Biotecnología. El Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) transforma su misión y se orienta a atender las necesidades de la industria agroalimentaria, química y farmacéutica del país.
- 1983 M. Montagu y colaboradores, entre ellos, L. Herrera Estrella, diseñan y construyen las primeras plantas transgénicas. 1985 Se descubren marcadores genéticos para identificar enfermedades en humanos. 1987 K. Mullis y colaboradores desarrollan el sistema de reacción en cadena de polimerasa de ADN (PCR, por sus siglas en inglés) que permite amplificar millones de veces fragmentos específicos de ADN. 1988 Los institutos nacionales de salud de Estados Unidos, bajo la iniciativa de J. Watson, establecen la Oficina para la Investigación del Genoma Humano. Se produce interferón humano de origen recombinante como el primer medicamento biológico de origen transgénico para el tratamiento contra el cáncer. Se produce la primera planta transgénica de maíz (maíz *Bt*) resistente a las plagas de insectos. 1990 Tres grupos desarrollan simultáneamente el método de electroforesis capilar que permitió optimizar la automatización de los métodos para la secuenciación del ADN. 1992 La Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos aprobó el uso de la hormona de crecimiento de origen transgénico para incrementar la producción de leche bovina.

- 1993 Se aprueba el primer medicamento recombinante para el tratamiento de la esclerosis múltiple.
150 países firman el Convenio sobre la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas.
- 1994 Se descubre el primer gen relacionado con el cáncer de mama.
- 1995 Se reporta la secuencia nucleotídica del primer genoma de un organismo vivo, el de la bacteria *H. influenzae*.
Se incorporan los anticuerpos recombinantes de origen transgénico para el tratamiento contra el cáncer.
- 1996 Se reporta la secuencia nucleotídica del primer genoma de un eucariote, el de la levadura *S. cerevisiae*.
Se comercializa el primer cultivar de origen transgénico que confiere resistencia a plagas de insectos y a malezas.
Se incorpora al mercado el activador de plasminógeno idéntico al humano recombinante usado para la disolución de coágulos generados por infartos al miocardio.
- 1997 Se crea Dolly, el primer animal de establo clonado a partir de una célula de adulto.
- 1998 Se reporta la secuencia nucleotídica del primer genoma de un animal, el del gusano *C. elegans*.
Se aprueba en Estados Unidos el uso del primer medicamento recombinante para el tratamiento contra el cáncer de mama.
- 1999 Se reporta por primera vez la secuencia nucleotídica completa de un cromosoma humano (el número 22).
Se crea el Centro de Biotecnología Genómica del IPN, en Reynosa, Tamaulipas, siendo su director fundador H. Barrera.
- 2000 Se reporta por vez primera la secuencia nucleotídica del genoma de una planta, el de *Arabidopsis thaliana*.
Se aprueban en Kenia las pruebas de campo para la primera papa recombinante resistente a un virus.
Se aprueba el Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología, previsto en el Convenio sobre la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas.
- 2001 Los grupos de investigación de C. Venter y F. Collins reportan en forma simultánea el borrador de la secuencia nucleotídica del genoma humano.
- 2002 Se reportan las secuencias nucleotídicas de los genomas del ratón y del arroz.
Se aprueba en Estados Unidos la primera planta transgénica de maíz resistente al gusano de la raíz.
- 2003 Se completa la secuencia nucleotídica del genoma humano.
Entra en vigor el Protocolo de Cartagena.
- 2004 La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) señala que los cultivos transgénicos para la producción de alimentos son una herramienta importante para contender con las necesidades de alimentación global.
- El gobierno de México, a través de la Secretaría de Salud, funda el Instituto Nacional de Medicina Genómica.
- 2005 Se aprueba en México la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados.
Se crea en México el Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad (Langebio) del Cinvestav-Irapuato, siendo L. Herrera Estrella su director y fundador.
- 2006 Se aprueba en Estados Unidos la vacuna recombinante contra el virus del papiloma.
La Organización Mundial de la Salud de las Naciones Unidas publica el documento "20 preguntas sobre los alimentos genéticamente modificados" (anexo 3 de esta publicación), en el cual se señala que los alimentos de origen transgénico no han generado daño a la salud.
- 2007 Se aprueba en Estados Unidos la vacuna recombinante de origen transgénico contra el virus de la influenza H5N1.
- 2009 Se aprueba en Estados Unidos el uso del primer animal transgénico para la producción de la proteína humana antitrombina.
Se reportan mundialmente varias secuencias de genomas de diferentes plantas de maíz. México contribuye con la secuencia del maíz palomero, reportada por J.P. Vielle Calzada y colaboradores, entre ellos, L. Herrera Estrella, del Langebio.
- La Unión Europea aprueba el uso de papa transgénica y otras variedades de maíz transgénico tras un largo debate sobre la bioseguridad.
- 2011 En 27 países se siembran ocho diferentes cultivares de organismos transgénicos y, desde entonces, éstos se han consumido en 50 países por más de 300 millones de habitantes.
- 2012 Varios grupos, entre ellos los de E. Charpentier y J. Douma, reportan el uso de las técnicas de edición fina de ADN llamadas CRISPR-Cas9. Estas metodologías permiten editar finamente el ADN y, por ello, inactivar genes e incorporar nuevos transgenes en los sitios seleccionados del organismo blanco. Éstas serán las nuevas metodologías con las que se construirán los transgénicos de siguientes generaciones, ya que se conocerá de antemano el sitio de integración del nuevo material genético. También, con estas técnicas se han construido organismos genéticamente mejorados en los cuales se han inactivado genes, lo cual les proporciona ventajas.
- 2013 El grupo de L. Herrera Estrella, del Langebio, reporta en México las primeras plantas transgénicas que son capaces de crecer en fosfito en vez de en fosfato como fertilizante. Estas plantas no requieren de herbicidas químicos, como el glifosato, que hoy se utilizan en el campo para acabar con las malezas.
- 2015 Se siembran cultivos transgénicos en 28 países, aumentando el área de sembrado a casi 180 millones de hectáreas y empelanado a 18 millones de agricultores. Se consumen por más de 400 millones de personas y más de mil millones de animales.

ANEXO 3

20 PREGUNTAS SOBRE LOS ALIMENTOS GENÉTICAMENTE MODIFICADOS (GM) DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD



Estas preguntas y respuestas han sido preparadas por la OMS en respuesta a preguntas y preocupaciones de una cantidad de Gobiernos de Estados Miembro de la OMS con respecto a la naturaleza y la inocuidad de los alimentos genéticamente modificados.

P1. ¿Qué son los organismos genéticamente modificados (GM) y los alimentos GM?

Los organismos genéticamente modificados (OGM) pueden definirse como organismos en los cuales el material genético (ADN) ha sido alterado de un modo artificial. La tecnología generalmente se denomina “biotecnología moderna” o “tecnología genética”, en ocasiones también “tecnología de ADN recombinante” o “ingeniería genética”. Ésta permite transferir genes seleccionados individuales de un organismo a otro, también entre especies no relacionadas.

Dichos métodos se utilizan para crear vegetales GM – que luego se utilizan para desarrollar cultivos de alimentos GM.

P2. ¿Por qué se producen alimentos GM?

Los alimentos GM se desarrollan –y comercializan- porque se percibe cierta ventaja tanto para los productores como para los consumidores de estos alimentos. Esto tiene como objetivo traducirse en un producto con un menor precio, mayores beneficios (en términos de durabilidad o valor nutricional) o ambos. En un principio, los individuos que desarrollaban semillas GM deseaban que sus productos fueran aceptados por los

productores, por lo tanto, se concentraron en innovaciones que los agricultores (y la industria alimentaria en general) pudiera apreciar.

El objetivo inicial del desarrollo de vegetales sobre la base de organismos GM fue aumentar la protección de los cultivos. Los cultivos GM actualmente en el mercado tienen como objetivo principal aumentar el nivel de protección de los cultivos mediante la introducción de resistencia a enfermedades causadas por insectos o virus a los vegetales o mediante una mayor tolerancia a los herbicidas.

La resistencia a los insectos se logra incorporando a la planta alimenticia el gen productor de toxinas de la bacteria *Bacillus thuringiensis* (BT). Esta toxina se usa actualmente como un insecticida convencional en la agricultura y es inocua para el consumo humano. Se ha demostrado que los cultivos GM que producen esta toxina en forma permanente requieren menores cantidades de insecticidas en situaciones específicas, por ejemplo, donde la presión de plagas es elevada.

La resistencia viral se logra mediante la introducción de un gen de ciertos virus que causan enfermedad en los vegetales. La resistencia viral reduce la susceptibilidad de los vegetales a enfermedades causadas por dichos virus, lo que da como resultado un rendimiento mayor de los cultivos.

La tolerancia a herbicidas se logra mediante la introducción de un gen de una bacteria que le confiere resistencia a ciertos herbicidas. En situaciones donde la presión de la maleza es elevada, el uso de dichos cultivos ha producido una reducción en la cantidad de herbicidas utilizados.

P3. ¿Se evalúan los alimentos GM en forma diferente de los alimentos tradicionales?

En general, los consumidores consideran que los alimentos tradicionales (que usualmente se han consumido por miles de años) son inocuos.

Cuando se desarrollan alimentos nuevos por métodos naturales, se pueden alterar algunas de las características existentes en los alimentos, tanto en forma positiva como negativa. Se podría convocar a las autoridades nacionales de alimentos a examinar los alimentos tradicionales, pero esto no siempre ocurre. En realidad, puede ocurrir que los vegetales nuevos desarrollados mediante técnicas tradicionales de reproducción no se evalúen rigurosamente usando técnicas de evaluación de riesgos.

Con los alimentos GM, la mayoría de las autoridades nacionales consideran que son necesarias evaluaciones específicas. Se han establecido sistemas específicos para una evaluación rigurosa de organismos GM y alimentos GM relativos tanto a la salud humana como al medio ambiente. Por lo general, no se realizan evaluaciones similares para los alimentos tradicionales. Por lo tanto, hay una diferencia significativa en el proceso de evaluación antes de la comercialización para estos dos grupos de alimentos.

Uno de los objetivos del Programa de Inocuidad Alimentaria de la OMS es colaborar con las autoridades nacionales en la identificación de los alimentos que deben someterse a evaluaciones de riesgos, incluyendo alimentos GM, y recomendar las evaluaciones correctas

P4. ¿Cómo se determinan los riesgos potenciales para la salud humana?

La evaluación de inocuidad de los alimentos GM generalmente investiga: (a) los efectos directos sobre la salud (toxicidad), (b) las tendencias a provocar una reacción alérgica (alergenicidad); (c) los componentes específicos con sospecha de tener propiedades nutricionales o tóxicas; (d) la estabilidad del gen insertado; (e) los efectos nutricionales asociados con la modificación genética; y (f) cualquier efecto no deseado que podría producirse por la inserción genética.

P5. ¿Cuáles son los principales temas de preocupación para la salud humana?

Si bien las discusiones teóricas han abarcado una amplia gama de aspectos, los tres temas principales debatidos son las tendencias a provocar una reacción alérgica (alergenicidad), la transferencia de genes y el cruzamiento lejano (*outcrossing*).

Alergenicidad. Por una cuestión de principios, se desalienta la transferencia de genes de alimentos comúnmente alergénicos a menos que pueda demostrarse que el producto proteico del gen transferido no es alergénico. Si bien los alimentos desarrollados en forma tradicional no se evalúan generalmente en cuanto a alergenicidad, los protocolos para pruebas de alimentos GM han sido evaluados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la OMS. No se han hallado efectos alérgicos en relación con los alimentos GM que se encuentran actualmente en el mercado.

Transferencia genética. La transferencia genética de alimentos GM a células de organismo o a bacterias del tracto gastrointestinal causarían preocupación si el material genético transferido afectara en forma adversa a la salud humana. Esto sería particularmente relevante si fueran a transferirse genes de resistencia a antibióticos usados para crear OGM. Si bien la probabilidad de transferencia es baja, un panel de expertos reciente de FAO/OMS ha incentivado el uso de tecnología sin genes de resistencia a antibióticos.

Outcrossing. El desplazamiento de genes de vegetales GM a cultivos convencionales o especies silvestres relacionadas (llamado "outcrossing"), así como la combinación de cultivos provenientes de semillas convencionales con aquellos desarrollados usando cultivos GM, puede tener un efecto indirecto sobre la inocuidad y la seguridad de los alimentos. Este riesgo es real, como se demostró cuando aparecieron rastros de un tipo de maíz que sólo fue aprobado para alimentación animal en productos del maíz para consumo humano en los Estados Unidos de América. Muchos países han adoptado estrategias para reducir la combinación, incluyendo una clara separación de los campos dentro de los cuales se desarrollan cultivos GM y cultivos convencionales.

Se está discutiendo la factibilidad y los métodos para monitorear los productos alimentarios GM después de la comercialización, para la vigilancia continua de la inocuidad de los productos alimentarios GM.

P6. ¿Cómo se realiza una evaluación de riesgos para el medio ambiente?

Las evaluaciones de riesgos del medio ambiente abarcan tanto los OGM involucrados como el potencial medio ambiente receptor. El proceso de evaluación incluye una evaluación de las características del OGM y sus efectos y estabilidad en el medio ambiente, combinado con las características ecológicas del medio ambiente en el cual tendrá lugar la introducción. La evaluación también incluye los efectos no deseados que podrían surgir por la inserción del nuevo gen.

P7. ¿Cuáles son los temas de preocupación en cuanto al medio ambiente?

Los temas de preocupación incluyen: la capacidad de los OGM para dispersarse e introducir potencialmente los genes de ingeniería genética dentro de poblaciones silvestres; la persistencia del gen una vez que el OGM ha sido cosechado; la susceptibilidad de los organismos no objetivo (por ej., los insectos que no son plaga) al producto genético; la estabilidad del gen; la reducción del espectro de otros vegetales incluyendo pérdida de biodiversidad; y un mayor uso de sustancias químicas en la agricultura. Los aspectos de inocuidad del medio ambiente de los cultivos GM varían considerablemente de acuerdo con las condiciones locales.

Las investigaciones actuales se concentran en: el efecto potencialmente perjudicial sobre los insectos beneficiosos o una inducción más rápida de insectos resistentes; la generación potencial de nuevos patógenos vegetales; las potenciales consecuencias perjudiciales para la biodiversidad vegetal y la vida silvestre, y un menor uso de la práctica importante de rotación de cultivos en ciertas situaciones locales; y el desplazamiento de genes de resistencia a los herbicidas a otros vegetales.

P8. ¿Son inocuos los alimentos GM?

Los diferentes organismos GM incluyen genes diferentes insertados en formas diferentes. Esto significa que cada alimento GM y su inocuidad deben ser evaluados individualmente, y que no es posible hacer afirmaciones generales sobre la inocuidad de todos los alimentos GM.

Los alimentos GM actualmente disponibles en el mercado internacional han pasado las evaluaciones de riesgo y no es probable que presenten riesgos para la salud humana. Además, no se han demostrado efectos sobre la salud humana como resultado del consumo de dichos alimentos por la población general en los países donde fueron aprobados. El uso continuo de evaluaciones de riesgo en base a los principios del Codex y, donde corresponda, incluyendo el monitoreo post comercialización, debe formar la base para evaluar la inocuidad de los alimentos GM.

P9. ¿Cómo se reglamentan los alimentos GM a nivel nacional?

La forma en que los países han reglamentado los alimentos GM es variada. En algunos países, los alimentos GM no están reglamentados todavía. Los países que cuentan con legislación, se concentran principalmente en evaluaciones de riesgos para la salud de los consumidores. Los países que tienen disposiciones para los alimentos GM, usualmente también reglamentan los OGM en general, teniendo en cuenta los riesgos para la salud y el medio ambiente así como los temas relacionados con control y comercio (como los regímenes potenciales de prueba y etiquetado). Dada la dinámica del debate sobre alimentos GM, es probable que la legislación continúe evolucionando.

P10. ¿Qué tipos de alimentos GM se encuentran en el mercado internacional?

Todos los cultivos GM disponibles en el mercado internacional en la actualidad han sido diseñados usando una de tres características básicas: resistencia al daño causado por insectos, resistencia a las infecciones virales; y tolerancia a ciertos herbicidas. Todos los genes usados para modificar cultivos provienen de microorganismos.

<i>Cultivo</i>	<i>Característica</i>	<i>Áreas/países con aprobación</i>
Maíz	Resistencia a insectos	Argentina, Canadá, Sudáfrica, Estados Unidos, UE
	Tolerancia a herbicidas	Argentina, Canadá, Estados Unidos, UE
Soja	Tolerancia a herbicidas	Argentina, Canadá, Sudáfrica, Estados Unidos, UE (sólo para procesamiento)
Colza	Tolerancia a herbicidas	Canadá, Estados Unidos
Achicoria	Tolerancia a herbicidas	UE (sólo para reproducción)
Calabazas	Resistencia a virus	Canadá, Estados Unidos
Papa	Resistencia a insectos/ Tolerancia a herbicidas	Canadá, Estados Unidos

P11. ¿Qué ocurre cuando se comercializan internacionalmente alimentos GM?

No hay en la actualidad sistemas reglamentarios internacionales específicos. Sin embargo, muchas organizaciones internacionales están involucradas en el desarrollo de protocolos para OGM.

La Comisión del Codex Alimentarius (Codex) es el organismo conjunto de FAO/OMS responsable de compilar los estándares, los códigos de práctica, los lineamientos y las recomendaciones que componen el Codex Alimentarius: el código alimentario internacional. El Codex está desarrollando principios para el análisis de riesgos para la salud humana de los alimentos GM. La premisa de estos principios dicta una evaluación previa a la comercialización, realizada en forma individual y que incluya una evaluación tanto de los efectos directos (del gen insertado) como de los efectos no

deseados (que pueden surgir como consecuencia de la inserción del nuevo gen). Los principios están en una etapa avanzada de desarrollo y se espera que sean adoptados para julio de 2003. Los principios del Codex no tienen un efecto de obligatoriedad sobre la legislación nacional, pero son mencionados específicamente en el Acuerdo Sanitario y Fitosanitario (Acuerdo SPS) de la Organización Mundial de Comercio, y pueden usarse como referencia en el caso de disputas comerciales.

El Protocolo de Cartagena sobre Bioinocuidad (CPB, siglas en inglés), un tratado ambiental legalmente obligatorio para sus Partes, regula los movimientos transfronterizos de los organismos vivos modificados (LMO, siglas en inglés). Los alimentos GM entran en el ámbito del Protocolo sólo si contienen LMO capaces de transferir o replicar el material genético. La piedra angular del CPB es un requisito de que los exportadores soliciten el consentimiento de los importadores antes del primer envío de LMO con intenciones de ser liberados al medio ambiente. El Protocolo entrará en vigencia 90 días después de que el 50º país lo haya ratificado, lo que puede ocurrir a principios de 2003 en vista de las aceleradas declaraciones registradas desde junio de 2002.

P12. ¿Han pasado una evaluación de riesgos los productos GM en el mercado internacional?

Todos los productos GM actualmente en el mercado internacional han pasado las evaluaciones de riesgos desarrolladas por las autoridades nacionales. Estas evaluaciones diferentes por lo general siguen los mismos principios básicos, incluyendo una evaluación del riesgo para el medio ambiente y la salud humana. Estas evaluaciones son minuciosas - no han indicado ningún riesgo para la salud humana.

P13. ¿Por qué hubo preocupación entre algunos políticos, grupos de interés y consumidores, especialmente en Europa, sobre los alimentos GM?

Desde la primera introducción en el mercado a mediados de los '90 de un alimento GM importante (sojas resistentes a herbicidas), hubo cada vez más preocupación sobre dichos alimentos entre políticos, activistas y consumidores, especialmente en Europa. Hay muchos factores involucrados. A fines de los '80, principios de los '90, los resultados de décadas de investigación molecular alcanzaron dominio público. Hasta ese momento, los consumidores por lo general no estaban muy informados del potencial de esta investigación. En el caso de alimentos, los consumidores comenzaron a preguntarse sobre inocuidad porque perciben que la biotecnología moderna está originando la creación de nuevas especies.

Los consumidores se preguntan con frecuencia: "¿Cuál es la ventaja para mí?". En el campo de los medicamentos, muchos consumidores han aceptado más rápidamente la biotecnología como beneficiosa para su salud (por ej., los medicamentos con un mejor potencial de tratamiento). En el caso de los primeros alimentos GM introducidos en el mercado europeo, los productos no tenían un beneficio directo aparente para los consumidores (no eran más económicos, no aumentaban su fecha de vencimiento, no tenían mejor sabor). El potencial de las semillas GM para brindar mayor producción por

área cultivada debería resultar en precios más bajos. Sin embargo, la atención del público se ha concentrado en el aspecto de los riesgos de la ecuación riesgo-beneficio.

La confianza de los consumidores en la inocuidad de los suministros de alimentos en Europa ha disminuido significativamente como resultado de una cantidad de sobresaltos alimentarios que tuvieron lugar en la segunda mitad de los '90 que no están relacionados con los alimentos GM. Esto también tuvo un impacto sobre las discusiones sobre la aceptación de los alimentos GM. Los consumidores han cuestionado la validez de las evaluaciones de riesgos, tanto en relación los riesgos para la salud de los consumidores como para el medio ambiente, concentrándose principalmente en los efectos a largo plazo. Otros temas de debate de las organizaciones de consumidores incluyeron alergenicidad y resistencia antimicrobiana. Las preocupaciones de los consumidores desencadenaron una discusión sobre la conveniencia del etiquetado de los alimentos GM que permite una elección consciente. Al mismo tiempo, ha sido difícil detectar rastros de OGM en los alimentos: esto significa que las concentraciones muy bajas por lo general no pueden detectarse.

P14. ¿De qué forma ha afectado esta preocupación a la comercialización de alimentos GM en la Unión Europea?

Las preocupaciones de la población sobre los alimentos GM y los OGM en general han tenido un impacto significativo en la comercialización de los productos GM en la Unión Europea (UE). De hecho, han dado como resultado que se colocara en el mercado la denominada moratoria sobre aprobación de productos GM. Por lo general, la comercialización de alimentos GM y OGM es objeto de extensiva legislación. La legislación comunitaria ha existido desde principios de los '90.

El procedimiento de aprobación para la liberación de OMG al medio ambiente es un tanto complejo y básicamente requiere del acuerdo entre los Estados Miembro y la Comisión Europea. Entre 1991 y 1998, la comercialización de 18 OMG fue autorizada por una decisión de la Comisión en la UE.

A partir de octubre de 1998, no se concedieron más autorizaciones y en la actualidad hay 12 aplicaciones pendientes. Algunos Estados Miembro han invocado una cláusula de salvaguardia para prohibir temporalmente la colocación de maíz y productos de colza GM en el mercado de su país. Hay en la actualidad nueve casos en curso. Ocho de ellos han sido examinados por un Comité Científico sobre Vegetales, el cual en todos los casos consideró que la información presentada por los Estados Miembro no justificaba estas prohibiciones.

Durante la década de los '90, el marco regulador se extendió y perfeccionó más en respuesta a las preocupaciones legítimas de los ciudadanos, las organizaciones de consumidores y los operadores económicos (descrito en la *Pregunta 13*). En octubre de 2002 entra en vigencia una directiva revisada. La misma actualiza y refuerza las normas existentes respecto del proceso de evaluación de riesgos, gestión de riesgos, y toma de decisiones respecto de la liberación de OGM al medio ambiente. La nueva

directiva también prevé el monitoreo obligatorio de los efectos prolongados asociados con la interacción entre OGM y el medio ambiente.

En la UE, el etiquetado es obligatorio para los productos derivados de la biotecnología moderna o productos que contengan organismos GM. La legislación también considera el problema de la contaminación accidental de los alimentos convencionales con material GM. Introduce un umbral mínimo de un 1% para ADN o proteína proveniente de modificación genética, debajo del cual no se requiere etiquetado.

En el año 2001, la Comisión Europea adoptó dos nuevas propuestas legislativas sobre OGM respecto de la rastreabilidad, reforzando las normas actuales sobre etiquetado y racionalizando el procedimiento de autorización para los OGM en alimentos para humanos y animales y para su liberación deliberada al medio ambiente.

La Comisión Europea opina que estas nuevas propuestas, basadas en la legislación existente, tienen como objetivo encarar las preocupaciones de los Estados Miembro y crear la confianza de los consumidores en la autorización de productos GM. La Comisión espera que la adopción de estas propuestas allane el camino para reanudar la autorización de nuevos productos GM en la UE.

P15. ¿Cuál es el estado del debate público sobre alimentos GM en otras regiones del mundo?

La liberación de OGM al medio ambiente y la comercialización de alimentos GM han ocasionado un debate público en muchas partes del mundo. Es posible que este debate continúe, probablemente en el contexto más amplio de otros usos de la biotecnología (por ejemplo, en medicina humana) y sus consecuencias para las sociedades humanas. A pesar de que los temas que se están debatiendo son por lo general muy similares (costos y beneficios, temas de inocuidad), el resultado del debate difiere de país en país. En temas como etiquetado y rastreabilidad de alimentos GM como una forma de encarar las preocupaciones de los consumidores, no hay hasta la fecha ningún consenso. Esto quedó claro durante las discusiones dentro de la Comisión del Codex Alimentarius durante los últimos años. A pesar de la falta de consenso sobre estos temas, se han hecho progresos significativos en la armonización de opiniones concernientes a la evaluación de riesgos. La Comisión del Codex Alimentarius está a punto de adoptar principios sobre evaluación de riesgos antes de la comercialización, y las disposiciones del Protocolo de Cartagena sobre Bioinocuidad también revelan un mayor entendimiento a nivel internacional.

Más recientemente, la crisis humanitaria en el sur de África ha atraído la atención sobre el uso de alimentos GM como ayuda alimentaria en situaciones de emergencia. Una cantidad de gobiernos de la región expresaron su preocupación en torno de las alarmas sobre medio ambiente e inocuidad alimentaria. Si bien se han encontrado soluciones factibles para la distribución de grano molido en algunos países, otros han restringido el uso de alimentos GM y obtenido productos que no contienen GMO.

P16. ¿Hay una relación entre la reacción de la gente y las diferentes actitudes hacia los alimentos en diversas regiones del mundo?

Dependiendo de la región del mundo, las personas con frecuencia tienen actitudes diferentes hacia los alimentos. Además del valor nutricional, los alimentos frecuentemente tienen connotaciones sociales e históricas, y en algunos casos pueden tener importancia religiosa. La modificación tecnológica de los alimentos y la producción alimentaria puede provocar una respuesta negativa entre los consumidores, especialmente en ausencia de buena comunicación sobre los esfuerzos de evaluación de riesgos y las evaluaciones de costo-beneficio.

P17. ¿Hay implicancias para los derechos de los agricultores a ser dueños de sus cultivos?

Sí, es probable que los derechos de propiedad intelectual sean un elemento de debate sobre alimentos GM con un impacto sobre los derechos de los agricultores. Se han discutido los derechos de propiedad intelectual (IPR, siglas en inglés), especialmente las obligaciones de patentamiento del Acuerdo TRIPS (un acuerdo de la Organización Mundial de Comercio sobre los aspectos de los derechos de propiedad intelectual relacionados con el comercio) a la luz de sus consecuencias sobre la mayor disponibilidad de una diversidad de cultivos. En el contexto de los temas relacionados con el uso de tecnología genética en medicina, la OMS ha revisado el conflicto entre los IPR y el acceso igualitario a los recursos genéticos y la coparticipación de beneficios.

Esta revisión ha considerado los problemas potenciales de la monopolización y las dudas sobre las nuevas reglamentaciones de patentes en el campo de las secuencias genéticas en medicina humana. Es probable que dichas consideraciones también afecten el debate sobre alimentos GM.

P18. ¿Por qué están preocupados ciertos grupos por la creciente influencia de la industria química en la agricultura?

Ciertos grupos están preocupados sobre lo que ellos consideran un nivel no deseado de control de los mercados de semillas por parte de unas pocas compañías químicas. La biodiversidad y la agricultura sustentable se benefician más por el uso de una rica variedad de cultivos, tanto en términos de buenas prácticas de protección de cultivos como por la perspectiva de la sociedad en general y los valores asociados con los alimentos. Estos grupos temen que como resultado del interés de la industria química en los mercados de semillas, la gama de variedades utilizada por los agricultores pueda reducirse principalmente a cultivos GM. Esto impactaría en la canasta de alimentos de una sociedad así como en la protección de cultivos a largo plazo (por ejemplo, con el desarrollo de resistencia contra plagas de insectos y tolerancia a ciertos herbicidas). El uso exclusivo de cultivos GM resistentes a herbicidas también haría al agricultor dependiente de estas sustancias químicas. Estos grupos temen una posición dominante de la industria química en el desarrollo agropecuario, una tendencia que no consideran sostenible.

P19. ¿Qué otros desarrollos pueden esperarse en el área de los OGM?

Es probable que los organismos GM futuros incluyan vegetales con una mayor resistencia a enfermedades o sequías, cultivos con mayores niveles de nutrientes, especies de peces con mejores características de desarrollo y vegetales o animales que produzcan proteínas farmacéuticamente importantes como las vacunas.

A nivel internacional, la respuesta a los nuevos desarrollos puede hallarse en las consultas de expertos organizadas por FAO y OMS en los años 2000 y 2001, y la labor posterior de la Fuerza de Trabajo ad hoc del Codex sobre Alimentos Derivados de Biotecnología. Este trabajo ha dado como resultado un marco mejorado y armonizado para la evaluación de riesgos de alimentos GM en general. Se han tratado cuestiones específicas como la evaluación de la alergenicidad de alimentos GM o la inocuidad de alimentos derivados de microorganismos GM, y una consulta de expertos organizada por FAO y OMS en el año 2003 se concentrará en alimentos derivados de animales GM.

P20. ¿Qué acciones está implementando la OMS para mejorar la evaluación de los alimentos GM?

La OMS tomará un papel activo en relación con los alimentos GM, principalmente por dos razones: (1) debido a que la salud pública podría beneficiarse enormemente por el potencial de la biotecnología, por ejemplo por un aumento en el contenido de nutrientes de los alimentos, menor alergenicidad y producción alimentaria más eficiente; y (2) en base a las necesidades de examinar los efectos negativos potenciales para la salud humana del consumo de alimentos producidos mediante modificación genética, también a nivel mundial. Es claro que se deben evaluar minuciosamente las tecnologías modernas si van a constituir una mejoría real en la forma de producción de los alimentos. Dichas evaluaciones deben ser holísticas y abarcativas, y no pueden detenerse en los sistemas de evaluación anteriormente separados, no coherentes, que sólo enfocaban los efectos sobre el medio ambiente o la salud humana en forma aislada.

Por lo tanto, la OMS está trabajando para presentar un punto de vista más amplio de la evaluación de alimentos GM para permitir la consideración de otros factores importantes. Esta evaluación más holística de organismos GM y productos GM considerará no sólo la inocuidad sino también la seguridad alimentaria, los aspectos sociales y éticos, el acceso y la creación de capacidades. El trabajo internacional en esta nueva dirección presupone el compromiso de otras organizaciones internacionales claves en esta área. Como primer paso, la Junta Ejecutiva de la OMS debatirá en enero de 2003 el contenido de un informe de la OMS que abarca este tema. El informe está siendo desarrollado en colaboración con otras organizaciones claves, principalmente la FAO y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, siglas en inglés). Se espera que este informe pueda sentar las bases para una iniciativa futura hacia una evaluación más sistemática, coordinada, multi-organizativa e internacional de ciertos alimentos GM.

ANEXO 4

**LISTADO DE 123 GALARDONADOS CON EL PREMIO NOBEL
QUE FIRMARON LA DECLARACIÓN SOBRE LA AGRICULTURA
DE PRECISIÓN, EN FAVOR DE LOS OGM**

[FECHA DE CORTE: 1 DE MARZO DE 2017]

Esta declaración ha sido firmada por cerca de 10,500 personas, muchos de ellos científicos de varios países, incluyendo México. El documento se encuentra en: <http://supportprecisionagriculture.org/>

123 LAUREATES SUPPORTING PRECISION AGRICULTURE (GMOS)

Peter Agre	2003	Chemistry	Aaron Ciechanover	2004	Chemistry
Zhores I. Alferov	2000	Physics	Claude Cohen-Tannoudji	1997	Physics
Sidney Altman	1989	Chemistry	Leon N. Cooper	1972	Physics
Hiroshi Amano	2014	Physics	Elias James Corey	1990	Chemistry
Werner Arber	1978	Medicine	Robert F. Curl Jr.	1996	Chemistry
Richard Axel	2004	Medicine	Johann Deisenhofer	1988	Chemistry
David Baltimore	1975	Medicine	Peter C. Doherty	1996	Medicine
Paul Berg	1980	Chemistry	Richard R. Ernst	1991	Chemistry
Bruce A. Beutler	2011	Medicine	Sir Martin J. Evans	2007	Medicine
Elizabeth H. Blackburn	2009	Medicine	Eugene F. Fama	2013	Economics
Gunter Blobel	1999	Medicine	Edmond H. Fischer	1992	Medicine
Paul D. Boyer	1997	Chemistry	Jerome I. Friedman	1990	Physics
Sydney Brenner	2002	Medicine	Andre Geim	2010	Physics
Mario R. Capecchi	2007	Medicine	Ivar Giaever	1973	Physics
Thomas R. Cech	1989	Chemistry	Walter Gilbert	1980	Chemistry
Martin Chalfie	2008	Chemistry	Alfred G. Gilman *	1994	Medicine
Steven Chu	1997	Physics	Sheldon Glashow	1979	Physics

Roy J. Glauber	2005	Physics	John C. Mather	2006	Physics	Daniel C. Tsui	1998	Physics	Torsten N. Wiesel	1981	Medicine
Joseph L. Goldstein	1985	Medicine	Craig C. Mello	2006	Medicine	Harold E. Varmus	1989	Medicine	Frank Wilczek	2004	Physics
David J. Gross	2004	Physics	Robert C. Merton	1997	Economics	Sir John E. Walker	1997	Chemistry	Robert Woodrow		
Robert H. Grubbs	2005	Chemistry	Hartmut Michel	1988	Chemistry	J. Robin Warren	2005	Medicine	Wilson	1978	Physics
Roger Guillemin	1977	Medicine	James A. Mirrlees	1996	Economics	Arieh Warshel	2013	Chemistry	Ada E. Yonath	2009	Chemistry
Sir John B. Gurdon	2012	Medicine	Paul L. Modrich	2015	Chemistry	James Watson	1962	Medicine	Rolf M. Zinkernagel	1996	Medicine
John L. Hall	2005	Physics	William E. Moerner	2014	Chemistry	Eric F. Wieschaus	1995	Medicine			
Lars Peter Hansen	2013	Economics	Mario J. Molina	1995	Chemistry						
Serge Haroche	2012	Physics	Edvard Moser	2014	Medicine						
Leland H. Hartwell	2001	Medicine	May-Britt Moser	2014	Medicine						
Harald zur Hausen	2008	Medicine	Kary B. Mullis	1993	Chemistry						
James J. Heckman	2000	Economics	Ferid Murad	1998	Medicine						
Dudley R. Herschbach	1986	Chemistry	Erwin Neher	1991	Medicine						
Avram Hershko	2004	Chemistry	Ryoji Noyori	2001	Chemistry						
Gerardus 't Hooft	1999	Physics	Sir Paul Nurse	2001	Medicine						
H. Robert Horvitz	2002	Medicine	Christiane								
Robert Huber	1988	Chemistry	Nusslein-Volhard	1995	Medicine						
Tim Hunt	2001	Medicine	Arno Penzias	1978	Physics						
Louis J. Ignarro	1998	Medicine	Edward C. Prescott	2004	Economics						
Elfriede Jelinek	2004	Literature	Stanley B. Prusiner	1997	Medicine						
Daniel Kahneman	2002	Economics	Jose Ramos-Horta	1996	Peace						
Eric R. Kandel	2000	Medicine	Sir Richard J. Roberts	1993	Medicine						
Wolfgang Ketterle	2001	Physics	Bert Sakmann	1991	Medicine						
Klaus von Klitzing	1985	Physics	Bengt I. Samuelsson	1982	Medicine						
Aaron Klug	1982	Chemistry	Jean-Pierre Sauvage	2016	Chemistry						
Brian K. Kobilka	2012	Chemistry	Randy W. Schekman	2013	Medicine						
Roger D. Kornberg	2006	Chemistry	Thomas C. Schelling *	2005	Economics						
Herbert Kroemer	2000	Physics	Brian P. Schmidt	2011	Physics						
Finn E. Kydland	2004	Economics	Richard R. Schrock	2005	Chemistry						
Leon M. Lederman	1988	Physics	Phillip A. Sharp	1993	Medicine						
Yuan T. Lee	1986	Chemistry	Dan Shechtman	2011	Chemistry						
Robert J. Lefkowitz	2012	Chemistry	Vernon L. Smith	2002	Economics						
Anthony J. Leggett	2003	Physics	Hamilton O. Smith	1978	Medicine						
Jean-Marie Lehn	1987	Chemistry	Oliver Smithies *	2007	Medicine						
Michael Levitt	2013	Chemistry	George F. Smoot	2006	Physics						
Tomas Lindahl	2015	Chemistry	Thomas A. Steitz	2009	Chemistry						
Rudolph A. Marcus	1992	Chemistry	J. Fraser Stoddart	2016	Chemistry						
Barry J. Marshall	2005	Medicine	Jack W. Szostak	2009	Medicine						
Eric S. Maskin	2007	Economics	Joseph H. Taylor Jr.	1993	Physics						

* Alfred Gilman, Thomas C. Schelling y Oliver Smithies fallecieron después de haber firmado la declaración.

ANEXO 5

LISTADO DE 25 GALARDONADOS CON EL PREMIO NOBEL QUE FIRMARON LA DECLARACIÓN DE AGBIOWORLD EN APOYO A LA BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA

Esta declaración ha sido firmada por más de 3,400 personas. El documento se encuentra en: <http://www.agbioworld.org/declaration/index.html>

Oscar Arias Sanchez	1987	Peace	Jean-Marie Lehn	1987	Chemistry
Paul Berg	1980	Chemistry	Edward Lewis	1995	Physiology or Medicine
Norman Borlaug	1970	Peace	Mario Molina	1995	Chemistry
Paul D. Boyer	1997	Chemistry	Marshall Nirenberg	1968	Physiology or Medicine
Sydney Brenner	2002	Physiology or Medicine	George A. Olah	1994	Chemistry
Leon N. Cooper	1972	Physics	Douglas D. Osheroff	1996	Physics
Christian de Duve	1974	Medicine	Richard J. Roberts	1993	Physiology or Medicine
Peter C. Doherty	1996	Physiology or Medicine	Phillip A. Sharp	1993	Physiology or Medicine
Edmond H. Fischer	1992	Physiology or Medicine	Richard E. Smalley	1996	Chemistry
Donald A. Glaser	1960	Physics	James Watson	1962	Physiology or Medicine
Sheldon Glashow	1979	Physics	Eric Wieschaus	1995	Physiology Medicine
Roger Guillemin	1977	Physiology or Medicine			
Timothy Hunt	2001	Physiology or Medicine			
Arthur Kornberg	1959	Physiology or Medicine			

ANEXO 6

LISTADO DE REFERENCIAS DEL ARTÍCULO DE RICOCH, 2013, DECENAS DE LAS CUALES SUSTENTAN MEDIANTE CIENCIAS ÓMICAS LA EQUIVALENCIA SUSTANTIVA ENTRE PLANTAS TRANSGÉNICAS Y LAS CONVENCIONALES

Ricroch A.E., 2013: "Assessment of GE Food Safety using 'omics' techniques and long-term animal feeding studies. *New Biotechnology* 30, 4, 349–354 (Evaluación de la inocuidad del alimento genéticamente modificado, utilizando ciencias ómicas y animales alimentados por periodos largos).

1. OECD. An introduction to the food/feed safety consensus documents of the task force, series on the safety of novel foods and feeds; no. 14. Paris: Organization for Economic Cooperation and Development; 2006, pp. 1–15.
2. EFSA (European Food Safety Agency). Safety and nutritional assessment of GM plants and derived food and feed: the role of animal feeding trials. *Food and Chemical Toxicology* 2008; 46:S2–70.
3. Kuntz M, Ricroch A. Has time come to lower the current regulatory risk assessment for GM food and feed? *ISB News Report* 2012; 2:1–4.
4. Ricroch A, Bergé JB, Messéan A. Literature review of the dispersal of transgenes from genetically modified maize
Revue bibliographique sur la dispersion des transgènes à partir du maïs génétiquement modifié. *Comptes Rendus Biologies Académie des Science* 2009; 332(10):861–75.
5. D'Alessandro A, Zolla L. Food safety and quality control: hints from proteomics. *Food Technology and Biotechnology* 2012;50(3):275–85.
6. Ricroch A, Bergé JB, Kuntz M. Evaluation of genetically engineered crops using transcriptomic, proteomic and metabolomic profiling techniques. *Plant Physiology* 2011; 155(4):1752–61.
7. Batista R, Oliveira M. Plant natural variability may affect safety assessment data. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 2010 58:S8–12.

8. Balsamo GM, Cangahuala-Inocente GC, Bertoldo JB, Terenzi H, Arisi AC. Proteomic analysis of four Brazilian MON810 maize varieties and their four non-genetically-modified isogenic varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2011; 59(21):11553–59.
9. Franck T, Rohlig RM, Davies HV, Barros E, Engel KH. Metabolite profiling of maize kernels-genetic modification versus environmental influence. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2012; 60:3005–12.
10. Liu Z, Zhao J, Li Y, Zhang W, Jian G, *et al.* Non-uniform distribution pattern for differentially expressed genes of transgenic rice Huahui 1 at different developmental stages and environments. *PLoS ONE* 2012;7(5):e37078.
11. Gong CY, Li Q, Yu HT, Wang Z, Wang T. Proteomics insight into the biological safety of transgenic modification of rice as compared with conventional genetic breeding and spontaneous genotypic variation. *Journal of Proteome Research* 2012; 11(5):3019–29.
12. Chang Y, Zhao C, Zhu Z, Zhou Z, Zhao Y, Lu X, *et al.* Metabolic profiling based on LC/MS to evaluate unintended effects of transgenic rice with cry1Ac and sck genes. *Plant Molecular Biology* 2012; 78:477–87.
13. Wang Y, Xu W, Zhao W, Hao J, Luo Y, Tang X, *et al.* Comparative analysis of the proteomic and nutritional composition of transgenic rice seeds with Cry1ab/ac genes and their non-transgenic counterparts. *Journal of Cereal Science* 2012; 5(2):226–33.
14. Wu J, Yu H, Dai H, Mei W, Huang X, Zhu S, *et al.* Metabolite profiles of rice cultivars containing bacterial blight-resistant genes are distinctive from susceptible rice. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica (Shanghai)* 2012; 44(8):650–9. <http://dx.doi.org/10.1093/abbs/gms043>.
15. Zhou J, Zhang L, Chang Y, Lu X, Zhu Z, Xu G. Alteration of leaf metabolism in Bt-transgenic rice (*Oryza sativa* L.) and its wild type under insecticide stress. *Journal of Proteome Research* 2012; 11(8):4351–60.
16. Jin Z, Patzoldt WL, Shealy RT, Vodkin LO, Clough SJ, Tranel PJ. Transcriptome response to glyphosate in sensitive and resistant soybean. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2008; 56(15):6355–63.
17. García-Villalba R, León C, Dinelli G, Segura-Carretero A, Fernández-Gutiérrez A, García-Cañas V, *et al.* Comparative metabolomic study of transgenic versus conventional soybean using capillary electrophoresis-time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 2008; 1195:164–73.
18. Cheng KC, Beaulieu J, Iquiria E, Belzile FJ, Fortin MG, Stromvik MV. Effect of transgenes on global gene expression in soybean is within the natural range of variation of conventional cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2008; 56:3057–67.
19. Ioset JR, Urbaniak B, Ndjoko-Ioset K, Wirth J, Martin F, Gruissem W, *et al.* Flavonoid profiling among wild type and related GM wheat varieties. *Plant Molecular Biology* 2007; 65:645–54.
20. Batista R, Saibo N, Lourenco T, Oliveira M. Microarray analyses reveal that plant mutagenesis may induce more transcriptional changes than transgene insertion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2008; 105:3640–5.
21. Robertson FP, Koistinen PK, Gerrish C, Halket JM, Patel KP, Fraser PD, *et al.* Proteome changes in tomato lines transformed with phytoene synthase-1 in the sense and antisense orientations. *Journal of Experimental Botany* 2012; 63(16):6035–43.
22. Long M, Millar DJ, Kimura Y, Donovan G, Rees J, Fraser PD, *et al.* Metabolite profiling of carotenoid and phenolic pathways in mutant and transgenic lines of tomato: identification of a high antioxidant fruit line. *Phytochemistry* 2006; 67:1750–7.
23. Mattoo AK, Handa AK. Higher polyamines restore and enhance metabolic memory in ripening fruit. *Plant Science* 2008; 174:386–93.
24. Baker JM, Hawkins ND, Ward JL, Lovgrove A, Napier JA, Shewry PR, *et al.* A metabolomic study of substantial equivalence of field-grown genetically modified wheat. *Plant Biotechnology Journal* 2006; 4:381–92.
25. Wakasa K, Hasegawa H, Nemoto H, Matsuda F, Miyazawa H, Tozawa Y, *et al.* High-level tryptophan accumulation in seeds of transgenic rice and its limited effects on agronomic traits and seed metabolite profile. *Journal of Experimental Botany* 2006;57: 3069–78.
26. Defernez M, Gunning YM, Parr AJ, Shepherd LVT, Davies HV, Colquhoun IJ. NMR and HPLC-UV profiling of potatoes with genetic modifications to metabolic pathways. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2004; 52:6075–85.
27. EFSA (European Food Safety Authority). EFSA and GMO risk assessment for human and animal health and the environment. EFSA Meeting Summary Report; 2009, 210 pp.
28. ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Opinion of the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety. Recommendations for carrying out statistical analyses of data from 90-day rat feeding studies in the context of marketing authorization applications for GM organisms. Request no. 2009-SA-0285; 2011.
29. Snell C, Berheim A, Berge JB, Kuntz M, Pascal G, Paris A, *et al.* Assessment of the health impact of GM plant diets in long term and multigenerational animal feeding trials: a literature review. *Food and Chemical Toxicology* 2012; 50(3–4):1134–48.
30. Buzoianu SG, Walsh MC, Rea MC, Cassidy JP, Cotter PD, Ross RP, *et al.* Effect of feeding genetically modified Bt MON810 maize to 40-day-old pigs for 110 days on growth and health indicators. *Animal* 2012; 1609–19.
31. Walsh MC, Buzoianu SG, Gardiner GE, Rea MC, Ross RP, Joseph PC, *et al.* Effects of short-term feeding of Bt MON810 maize on growth performance, organ morphology and uncton in pigs. *British Journal of Nutrition* 2011;364–71.

32. Scholtz ND, Halle I, Danicke S, Hartmann G, Zur B, Sauerwein H. Effects of an active immunization on the immune response of laying Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*) fed with or without genetically modified *Bacillus thuringiensis*-maize. *Poultry Science* 2010; 89(6):1122–8.
33. Bakke-McKellep AM, Sanden M, Danieli A, Acierno R, Hemre GI, Maffia M, et al. Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr fed genetically modified soybeans and maize: histological, digestive, metabolic, and immunological investigations. *Research in Veterinary Science* 2008;84(3):395–408.
34. Aulrich K, Boehme H, Daenicke R, Halle I, Flachowsky G. Genetically modified feeds in animal nutrition 1st com.: *Bacillus thuringiensis* (Bt) corn in poultry, pig and ruminant nutrition. *Archives Tierernahr* 2001;54: 183–95.
35. Séralini GE, Clair E, Mesnage R, Gress S, Defarge N, Malatesta M, et al. Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. *Food and Chemical Toxicology* 2012; 50:4221–4231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2012.08.005>
36. BfR. Feeding study in rats with genetically modified NK603 maize and with a glyphosate containing formulation (Roundup) published by Séralini et al. (2012); 2012, BfR-Opinion 037/2012, 1 October 2012. <http://www.bfr.bund.de/cm/349/feeding-study-in-rats-with-genetically-modified-nk603-maize-and-with-a-glyphosate-containing-formulation-roundup-published-bei-seralini-et-al-2012.pdf>
37. EFSA (European Food Safety Authority). Review of the Séralini et al. (2012) publication on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize. *EFSA Journal* 2012; 10(10):2910.
38. EFSA (European Food Safety Authority). Final review of the Séralini et al. (2012) publication on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603 as published online on 19 September 2012 in *Food and Chemical Toxicology*. Statement of EFSA. *EFSA Journal* 2012; 10(11):2986 [10 pp.].
39. FSANZ (Food Standards Australia New Zealand. Agencia Australiana y Neozelandesa de Normas de Alimentos). Response to Séralini paper on the long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize. October 2012. www.foodstandards.gov.au/consumer/gmfood/Seralini/Pages/default.aspx.
40. DTU (Danmarks Tekniske Universitet). Fødevareinstituttets vurdering af nyt langtidsstudie med gensplejset majs NK603 og med sprøjtemidlet Roundup; October 2012. <http://www.food.dtu.dk>
41. NVWA (Nederlandse Voedsel- en Warenautoriteit). Beoordeling Inzake Artikel Séralini et al., 2012. *Food and Chemical Toxicology*, NVWA, BuRO; 2012, 3569. https://www.testbiotech.org/sites/default/files/NVWA_2012.pdf
42. HCB (The High Council of Biotechnologies). Opinion of the HCB Scientific Committee on the Seralini Study (2012); 2012, http://www.hautconseildesbiotechnologies.fr/IMG/pdf/Executive_Summary_121022.pdf
43. ANSES. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail; 2012, Saisine n2012-SA-0227 <http://www.anses.fr/Documents/BIOT2012sa0227.pdf>
44. Belgian Biosafety Advisory Council. Advice of the Belgian Biosafety Advisory Council on the article by Séralini et al., 2012; 2012, http://www.bio-conseil.be/Advices/BAC_2012_0898.pdf
45. CFIA (Canadian Food Inspection Agency). Statement on the Séralini et al. (2012) publication on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603; 2012, <http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/gmf-agm/seralini-eng.php>
46. CTNBIO (The Brazilian National Technical Commission on Biosafety). Ministry of Science, Technology and Innovation. National Biosafety Technical Commission. www.conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/comunicacion/prensa/CTNBIO-Brasil-Seralini1725.pdf
47. Brake DG, Thaler R, Evenson DP. Evaluation of Bt (*Bacillus thuringiensis*) corn on mouse testicular development by dual parameter flow cytometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2004; 52:2097–102.
48. Halle I, Aulrich K, Flachowsky G. Four generations feeding GMO-corn to laying hens. *Proceedings of the Society of Nutrition Physiology* 2006; 15:114.
49. Buzoianu SG, Walsh MC, Rea MC, O'Donovan O, Gelencser E, Ujhelyi G, et al. Effects of feeding Bt maize to sows during gestation and lactation on maternal and offspring immunity and fate of transgenic material. *PLoS ONE* 2012; 7(10):e47851.
50. Buzoianu SG, Walsh MC, Rea MC, Cassidy JP, Ryan TP, Ross RP, et al. Transgenerational effects of feeding genetically modified maize to nulliparous sows and offspring on offspring growth and health. *Journal of Animal Science* 2012; 91:318–30. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2012-5360>
51. Tyshko NV, Zhminchenko VM, Pashorina VA, Selyaskin KE, Saprykin VP, Utembaeva NT, et al. Assessment of the impact of GMO of plant origin on rat progeny development in 3 generations. *Vopr Pitani* 2011; 80(1):14–28.
52. Zhou XH, Dong Y, Wang Y, Xiao X, Xu Y, Xu B, et al. A three-generation study with high-lysine transgenic rice in Sprague-Dawley rats. *Food and Chemical Toxicology* 2012; 50:1902–10.
53. Tudisco R, Mastellone V, Cutrignelli MI, Lombardi P, Bovera F, Mirabella N, et al. Fate of transgenic DNA and evaluation of metabolic effects in goats fed genetically modified soybean and in their offsprings. *Animal* 2010; 4(10): 1662–1671.
54. Krzyzowska M, Wincenciak M, Winnicka A, Baranowski A, Jaszczak K, Zimny J, et al. The effect of multigenerational diet containing genetically modified triticale on immune system in mice. *Polish Journal of Veterinary Sciences* 2010; 13:423–30.
55. Nadella KD, Marla SS, Kuma PA. Metabolomics in agriculture. *Omics* 2012; 16(4):149–59.
56. Thelen JJ, Miernyk JA. The proteomic future: where mass spectrometry should be taking us. *Biochemical Journal* 2012; 444(2):169–81.

57. Doerrler N, Ladics G, McClain S, Herouet-Guicheney C, Poulsen LK, Privalle L, *et al.* Evaluating biological variation in non-transgenic crops: Executive summary from the ILSI Health and Environmental Sciences Institute workshop. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 2010; 58:S2-7.
58. EFSA. Scientific opinion. Guidance for risk assessment of food and feed from genetically modified plants. EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO). *EFSA Journal* 2011; 9(5):2150.
59. EFSA. Scientific opinion. Statistical significance and biological relevance. EFSA Scientific Committee. *EFSA Journal* 2011; 9(9):2372.
60. Ricroch A, Bergé JB, Kuntz M. Is the German suspension of MON810 maize cultivation scientifically justified? *Transgenic Research* 2010; 19(1):1-12.
61. Kuntz M, Davison J, Ricroch A. GMO ban: risks for science-based assessments. *EurActiv*; 2012, <http://www.euractiv.com/health/political-bans-gmos-eu-risks-sci-analysis-513694>

ANEXO 7

LISTADO DE REFERENCIAS DEL ARTÍCULO DE Ricroch *ET AL.*, 2014, QUE INCLUYE LOS 44 ARTÍCULOS CIENTÍFICOS QUE SUSTENTAN LA AUSENCIA DE DAÑO POR EL CONSUMO DE ALIMENTOS TRANSGÉNICOS POR ANIMALES. ESTE ARTÍCULO INCLUYE UN LISTADO DE 60 OPINIONES DE LA EFSA SOBRE DICHAS PUBLICACIONES

Ricroch, A.E. *et al.*, 2014: "Looking back at safety assessments of GM food/feed: An exhaustive review of 90 day animal feeding studies". *International Journal of Biotechnology* 13: 230-256 (Revisando la valoración de la inocuidad de la alimentación y del alimento genéticamente modificado: una revisión exhaustiva de los estudios de alimentación a animales por periodos de 90 días).

1. ADAS (2013) Review of the Strategies for the Comprehensive Food and Feed Safety and Nutritional Assessment of GM Plants Per Se. EFSA supporting publication 2013: EN-480, 115 pp. <http://www.efsa.europa.eu/en/supporting/doc/480e>.
2. Appenzeller, L.M., Malle, L., MacKenzie, S.A., Hoban, D. and Delaney, B. (2009a) 'Subchronic feeding study with genetically modified stacked trait lepidopteran and coleopteran resistant (DAS-Ø15Ø7-1 and DAS-59122-7) maize grain in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 47, No. 7, pp. 1512-1520.
3. Appenzeller, L.M., Munley, S.M., Hoban, D., Sykes, G.P., Malley, L.A. and Delaney, B. (2009b) 'Subchronic feeding study of grain from herbicide-tolerant maize DP- Ø9814Ø-6 in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 47, No. 9, pp. 2269-2280.
4. Appenzeller, L.M., Munley, S.M., Hoban, D., Sykes, G.P., Malley, L.A. and Delaney B. (2008) 'Subchronic feeding study of herbicide-tolerant soybean DP-356Ø43-5 in Sprague-Dawley rat', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 46, No. 6, pp. 2201-2213.
5. Bartholomaeus, A., Parrott, W., Bondy, G. and Walker, K. (2013) 'The use of whole food animal studies in the safety assessment of genetically modified crops: limitations and recommendations', *Critical*

- Reviews in Toxicology, Vol. 43, No. S2, pp. 1–24.
6. Cao, S., Xu, W., Luo, Y., He, X., Yuan, Y., Ran, W., Liang, L. and Huang, K. (2011) 'Metabonomics study of transgenic *Bacillus thuringiensis* rice (T2A-1) meal in a 90-day dietary toxicity study in rats', *Molecular Biosystems*, Vol. 7, No. 7, pp. 2304–2310.
 7. Cao, S.S., He, X.Y., Xu, W.T., Luo, Y.B., Yuan, Y.F., Liu, P.F., Cao, B., Shi, H. and Huang, K.L. (2012) 'Safety assessment of transgenic *Bacillus thuringiensis* rice T1c-19 in Sprague-Dawley rats from metabonomics and bacterial profile perspectives', *IUBMB Life*, Vol. 64, No. 3, pp. 242–250.
 8. Chukwudebe, A., Privalle, L., Reed, A., Wandelt, C., Contri, D., Dammann, M., Groeters, S., Kaspers, U., Strauss, V. and van Ravenzwaay, B. (2012) 'Health and nutritional status of Wistar rats following subchronic exposure to CV127 soybeans', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 50, Nos. 3–4, pp. 956–971.
 9. Codex Alimentarius Commission (2009) *Foods Derived From Modern Biotechnology*, 2nd ed., pp. 1–78, FAO/WHO, Rome, Italy
 10. Delaney, B., Appenzeller, L.M., Munley, S.M., Hoban, D., Sykes, G.P., Malley, L.A. and Sanders C. (2008) 'Subchronic feeding study of high oleic acid soybeans (Event DP 3Ø5423-1) in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 46, No. 12, pp. 3808–3817.
 11. Delaney, B., Karaman, S., Roper, J., Hoban, D., Sykes, G., Mukerji, P. and Frame, S.R. (2013) 'Thirteen week rodent feeding study with grain from molecular stacked trait lepidopteran and coleopteran protected (DP-004114-3) maize', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 53, pp. 417–427.
 12. Dong, Y.S., Dong, W., Zhou, X.H., Zhang, Y., Wang, Y. and Xiao, X. (2011) 'A 90-day toxicology study of transgenic rice expressing lysine-rich protein fusion gene in Sprague-Dawley rats', *Scientia Agricultura Sinica*, Vol. 40, No. 13, pp. 2768–2776.
 13. Dryzga, M.D., Yano, B.L., Andrus, A.K. and Mattsson J.L. (2007) 'Evaluation of the safety and nutritional equivalence of a genetically modified cottonseed meal in a 90-day dietary toxicity study in rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 45, No. 10, pp. 1994–2004.
 14. European Food Safety Authority (EFSA) (2006) *Guidance Document of the Scientific Panel on Genetically Modified Organisms for the Risk Assessment of Genetically Modified Plants and Derived Food and Feed*, European Food Safety Authority, Parma, Italy.
 15. European Food Safety Authority (EFSA) (2008) 'Safety and nutritional assessment of GM plants and derived food and feed: the role of animal feeding trials', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 46, Supplement 1, pp. S2–S70, GMO Panel Working Group on Animal Feeding Trials.
 16. European Food Safety Authority (EFSA) (2010) 'Scientific opinion on statistical considerations for the safety evaluation of GMOs', *EFSA Journal*, Vol. 8, No. 1, p. 1250.
 17. European Food Safety Authority (EFSA) (2011a) 'EFSA panel on genetically modified organisms (GMO); scientific opinion on guidance for risk assessment of food and feed from genetically modified plants', *EFSA Journal*, Vol. 9, No. 5, p. 2150.
 18. European Food Safety Authority (EFSA) (2011b) 'EFSA Guidance on conducting repeated-dose 90-day oral toxicity study in rodents on whole food/feed', *EFSA Journal*, Vol. 9, No. 12, p. 2438 [online] <http://www.efsa.europa.eu/de/efsajournal/pub/2438.htm> (accessed 2 April 2014).
 19. Gab-Alla, Z. et al. (2012) 'Morphological and biochemical changes in male rats fed on genetically modified corn (Ajeeb YG)', *Journal of American Science*, Vol. 8, No. 9, pp. 1117–1123.
 20. Hammond, B., Dudek, R., Lemen, J. and Nemeth, M. (2004) 'Results of a 13 week safety assurance study with rats fed grain from glyphosate tolerant corn', *Food Chemical Toxicology*, Vol. 42, pp. 1003–1014.
 21. Hammond, B.G., Dudek, R., Lemen, J.K. and Nemeth, M.A. (2006a) 'Results of a 90 day safety assurance study with rats fed grain from corn borer-protected corn', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 44, No. 7, pp. 1092–1099.
 22. Hammond, B.G., Lemen, J., Dudek, R., Ward, D., Jiang, C., Nemeth, M. and Burns, J. (2006b) 'Results of a 90 day safety assurance study with rats fed grain from corn rootworm-protected corn', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 44, No. 2, pp. 147–160.
 23. Hammond, B.G., Lemen, J.K., Ahmed, G., Miller, K.D., Kirkpatrick, J. and Fleeman, T. (2008) 'Safety assessment of SDA soybean oil: Results of a 28-day gavage study and a 90-day/one generation reproduction feeding study in rats', *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Vol. 52, No. 3, pp. 311–323.
 24. Harrigan, G.G., Lundry, D., Drury, S., Berman, K., Riordan, S.G., Nemeth, M.A., Ridley, W.P. and Glenn, K.C. (2010) 'Natural variation in crop composition and the impact of transgenesis', *Nature Biotechnology*, Vol. 28, No. 5, pp. 402–404.
 25. He, X.Y., Huang, K.L., Li, X., Qin, W., Delaney, B. and Luo, Y.B. (2008) 'Comparison of grain from corn rootworm resistant transgenic DAS-59122-7 maize with non-transgenic maize grain in a 90-day feeding study in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 46, No. 6, pp. 1994–2002.
 26. He, X.Y., Mao, Z., Tang, Y.B., Luo, X., Li, S.S., Cao, J.Y., Delaney, B. and Kun, L.H. (2009) 'A 90-day toxicology study of transgenic lysine-rich maize grain (Y642) in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 47, No. 2, pp. 425–432.
 27. Healy, C., Hammond, B. and Kirkpatrick, J. (2008) 'Results of a 13-week safety assurance study with rats fed grain from corn rootworm-protected, glyphosate-tolerant MON 88017 corn', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 46, pp. 2517–2524.
 28. Henseler, M., Piot-Lepetit, I., Ferrarib, E., Gonzalez Mellado, A., Bansea, M., Grethe, H., Harisi, Cl. and Hélaïne, S.

- (2013) 'On the asynchronous approvals of GM crops: potential market impacts of a trade disruption of EU soy imports', *Food Policy*, Vol. 41, pp. 166–176.
29. Hothorn, L.A. and Oberdoerfer, R. (2006) 'Statistical analysis used in the nutritional assessment of novel food using the proof of safety', *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Vol. 44, No. 2, pp. 125–135.
30. Hu, Y., Piao, J. and Yang, X. (2012) 'Nutritional components and sub-chronic toxicity of genetically modified rice expressing human lactoferrin', in Jiu, W.S.Y. (Ed.): *Journal of Hygiene Research*, Vol. 41, No. 1, pp. 6–12.
31. Knudsen, I. and Poulsen, M. (2007) 'Comparative safety testing of genetically modified foods in a 90-day rat feeding study design allowing the distinction between primary and secondary effects of the new genetic event', *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Vol. 49, No. 1, pp. 53–62.
32. Kroghsbo, S., Madsen, C., Poulsen, M., Schroder, M., Kvist, P.H., Taylor, M., Gatehouse, A., Shu, Q. and Knudsen, L. (2008) 'Immunotoxicological studies of genetically modified rice expressing PHA-E lectin or Bt toxin in Wistar rats', *Toxicology*, Vol. 1, No. 2, pp. 24–34.
33. Kuiper, H.A., Kok, E.J. and Davies, H.V. (2013) 'New EU legislation for risk assessment of GM food: no scientific justification for mandatory animal feeding trials', *Plant Biotechnology Journal*, Vol. 11, No. 7, pp. 1–4.
34. Kuntz, M. and Ricoch, A. (2012) 'Has time come to lower the current regulatory risk assessment for GM food and feed?', *ISB News Report*, February, pp. 1–4 [online] <http://www.isb.vt.edu/news/2012/Feb12.pdf>
35. Kuntz, M. and Ricoch, A. (2013) 'Evaluation of genetically engineered crops using proteomics', in Nollet, L.M.L. and Toldrá, F. (Eds.): *Proteomics in Foods: Principles and Applications*, p. 589, Publisher: Springer.
36. Langkilde, S., Schröder, M., Frank, T., Shepherd, L.V.T., Conner, S., Davies, H., Meyer, O., Danier, J., Rychlik, M., Belknap, W., McCue, K.F., Engel, K.H., Stewart, D., Knudsen, I. and Poulsen M. (2012) 'Compositional and toxicological analysis of a GM potato line with reduced a-solanine content-a 90-day feeding study in the Syrian Golden hamster', *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Vol. 64, No. 1, pp. 177–185.
37. Li, M., Piao, J. and Yang, X. (2010) 'Subchronic toxicity test of genetically modified rice with double antisense starch-branching enzyme gene', Jiu, W.S.Y. (Ed.): *Journal of Hygiene Research*, Vol. 39, No. 4, pp. 436–443.
38. Li, Y., Piao, J., Zhuo, Q.C., Chen, X. and Yang, X. (2004) 'Subchronic toxicity test of transgenic rice', in Jiu, W.S.Y. (Ed.): *Journal of Hygiene Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 575–578.
39. Liu, P., He, X., Chen, D., Luo, Y., Cao, S., Song, H., Liu, T., Huang, K. and Xu, W. (2012) 'A 90-day subchronic feeding study of genetically modified maize expressing cry1Ac-M protein in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 50, No. 9, pp. 3215–3221.
40. MacKenzie, S.A., Lamb, I., Schmidt, J., Deege, L., Morrissey, M.J., Harper, M., Layton, R.J., Prochaska, L.M., Sanders, C., Locke, M., Mattsson, J.L., Fuentes, A. and Delaney, B. (2007) 'Thirteen week feeding study with transgenic maize grain containing event DAS-01507-1 in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 45, No. 4, pp. 551–562.
41. Malley, L.A., Everds, N.E., Reynolds, J., Mann, P.C., Lamb, I., Rood, T., Schmidt, J., Layton, R.J., Prochaska, L.M., Hinds, M., Locke, M., Chui, C.F., Claussen, F., Mattsson, J.L. and Delaney, B. (2007) 'Subchronic feeding study of DAS-59122-7 maize grain in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 45, No. 7, pp. 1277–1292.
42. Masip, G., Sabalza, M., Perez-Massot, E., Banakar, R., Cebrian, D., Twyman, R.M., Capell, T., Albajes, R. and Christou, P. (2013) 'Paradoxical EU agricultural policies on genetically engineered crops', *Trends Plant Sciences*, Vol. 18, No. 6, pp. 312–324.
43. Noteborn, HPJM *et al.* (1995) 'Safety assessment of the *Bacillus thuringiensis* insecticidal crystal protein CRYIA(b) expressed in transgenic tomatoes', in: Engel, K-H., Takeoka, G.R. and Teranishi, R. (Eds.): *Genetically Modified Foods - Safety Aspects*, ACS Symposium Series 605, American Chemical, Society Washington DC, pp. 134–147.
44. Official Journal of the European Union (2013) Commission Implementing Regulation (EU) No. 503/2013 of 3 April 2013 on applications for authorization of genetically modified food and feed in accordance with Regulation (EC) No. 1829/2003 of the European Parliament and of the Council and amending Commission Regulations (EC) No. 641/2004 and (EC) No. 1981/2006. L 157.
45. Organization for Economic Cooperation & Development (OECD) (1998) 'Test guideline 408. Repeated dose 90-day oral toxicity study in rodents', in OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Paris.
46. Poulsen, M., Kroghsbo, S., Schröder, M., Wilcks, A., Jacobsen, H., Miller, A., Frenzel, T., Danier, J., Rychlik, M., Shu, Q., Emami, K., Sudhakar, D., Gatehouse, A., Engel, K-H. and Knudsen, I. (2007a) 'A 90-day safety study in Wistar rats fed genetically modified rice expressing snowdrop lectin *Galanthus nivalis* (GNA)', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 45, No. 3, pp. 350–363.
47. Poulsen, M., Schroder, M., Wilcks, A., Kroghsbo, S., Lindecrona, R.H., Miller, A., Frenzel, T., Danier, J., Rychlik, M., Shu, Q., Emami, K., Taylor, M., Gatehouse, A., Engel, K-H. and Knudsen, I. (2007b) 'Safety testing of GM-rice expressing PHA-E lectin using a new animal test design', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 45, pp. 364–377.
48. Powell, M., Wheatley, A., Omoruyi, F., Asemota, H., Williams, N. and Tennant P. (2010) 'Comparative effects of dietary administered transgenic and conventional papaya on selected intestinal parameters in rat models', *Transgenic Research*, Vol. 19, No. 13, pp. 511–518.
49. Powell, M., Wheatley, A., Omoruyi, F., Asemota, H., Williams, N.P. and Ten-

- nant, P.F. (2008) 'Effects of subchronic exposure to transgenic papayas (*Carica papaya* L.) on liver and kidney enzymes and lipid parameters in rats', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 88, No. 15, pp. 2638–2647.
50. Qi, X.Z., He, X.Y., Luo, Y.B., Li S. Y., Zou, S.Y., Cao, S.S., Tang, M.Z., Delaney, B., Xu, W.T. and Huang, K.L. (2012) 'Subchronic feeding study of stacked trait genetically-modified soybean (305423 × 40-3-2) in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 50, No. 9, pp. 3256–3263.
51. Ricroch, A. (2013) 'Assessment of GE food safety using omics techniques and long-term animal feeding studies', *New Biotechnology*, (online 2012), Vol. 30, No. 4, pp. 349–354.
52. Ricroch, A., Bergé, J.B. and Kuntz, M. (2011) 'Evaluation of genetically engineered crops using transcriptomic, proteomic and metabolomic profiling techniques', *Plant Physiology*, 24 February, 10.1104/pp.111.173609, Vol. 155, No. 4, pp. 1752–1761.
53. Ricroch, A., Berheim, A., Pascal, G., Paris, A. and Kuntz, M. (2013) 'Assessment of the health impact of GE plant diets in long term and multigenerational animal feeding trials', in Flachowsky, G. (Ed.): *Animal Nutrition with Transgenic Plants*, p.234, Publisher: CABI Biotechnology Series.
54. Schroder, M., Poulsen, M., Wilcks, A., Kroghsbo, S., Miller, A., Frenzel, T., Danier, J., Rychlik, M., Emami, K., Gatehouse, A., Shu, Q.Y., Engel, K.H., Altosaar, I. and Knudsen, I. (2007) '90-day safety study of genetically modified rice expressing cry1Ab protein (*Bacillus thuringiensis* toxin) in Wistar rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 45, pp. 339-349.
55. Snell, C., Berheim, A., Bergé, J.B., Kuntz, M., Pascal, G., Paris, A. and Ricroch, A. (2012) 'Assessment of the health impact of GE plant diets in long term and multigenerational animal feeding trials: a literature review', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 50, No. 34, pp. 1134–1148.
56. Tang, X. *et al.* (2012a). 'A 90-day safety study of genetically modified rice expressing rhIGF-1 protein in C57BL/6J rats', *Transgenic Research*, Vol. 21, No. 3, pp. 499–510.
57. Tang, X., Han, F., Zhao, K., Xu, Y., Wu, X., Wang, J., Jiang, L. and Shi, W. (2012b) 'A 90-day dietary toxicity study of genetically modified rice t1c-1 expressing cry1c protein in Sprague Dawley rats', *Plos One*, Vol. 7, No. 12, p. e52507.
58. Teshima, R., Akiyama, H., Okunuki, H., Sakushima J., Goda Y., Onodera, H., Sawada, J. and Toyoda, M. (2000) 'Effect of GM and non-GM soybeans on the immune system of BN rats and B10A mice', *Journal of the Food Hygienic Society of Japan*, Vol. 41, No. 3, pp. 188–193.
59. Teshima, R., Watanabe, T., Okunuki, H., Isuzugawa, K., Akiyama, H., Onodera, H., Imai, T., Toyoda, M. and Sawada, J. (2002) 'Effect of subchronic feeding of genetically modified corn (CBH351) on immune system in BN rats and B10A mice', *Journal of the Food Hygienic Society of Japan*, Vol. 43, No. 5, pp. 273–279.
60. Wang, E.H., Yu, Z., Hu, J. and Xu, H.B. (2013) 'Effects of 90-day feeding of transgenic Bt rice TT51 on the reproductive system in male rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 62, pp. 390–396.
61. Wang, Z.H., Wang, Y., Cui, H.R., Xia, Y.W. and Altosaar, I. (2002) 'Toxicological evaluation of transgenic rice flour with a synthetic cry1Ab gene from *Bacillus thuringiensis*', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 82, pp. 738–744.
62. Yuan, Y., Xu, W., Luo, Y., Liu, H., Lu, J., Su, C. and Huang, K. (2011) 'Effects of genetically modified T2A-1 rice on faecal microflora of rats during 90 day supplementation', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 91, No. 11, pp. 2066–2072.
63. Yuan, Y., Xu, W., He, X., Liu, H., Cao, S., Qi, X., Huang, K. and Luo, Y. (2013) 'Effects of genetically modified T2A-1 rice on the GI health of rats after 90-day supplement', *Science Reports*, Vol. 3, p. 1962, DOI: 10.1038/srep01962.
64. Zhu, Y., He, X., Luo, Y., Zou, S., Zhou, X., Huang, K. and Xu, W. (2013) 'A 90-day feeding study of glyphosate-tolerant maize with the g2-aroa gene in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 51, pp. 280–287.
65. Zhu, Y., Li, D., Wang, F., Yin, J. and Jin, H. (2004) 'Nutritional assessment and fate of DNA of soybean meal from roundup ready or conventional soybeans using rats', *Archives of Animal Nutrition*, Vol. 58, No. 4, pp. 295–310.
66. Zhuo, Q., Chen, X., Piao, J. and Gu, L. (2004) 'Study on food safety of genetically modified rice which expressed cowpea trypsin inhibitor by 90 day feeding test on rats', in Jiu, W.S.Y. (Eds.): *Journal of Hygiene Research*, in Chinese, Vol. 3, No. 2, pp. 176–179.
67. Zhou, X.A., Dong, Y., Xiao, X., Wang, Y., Xu, Y., Xu, B., Shi, W.D., Zhang, Y., Zhu, L.J. and Liu, Q.Q. (2011) 'A 90-day toxicology study of high-amylose transgenic rice grain in Sprague-Dawley rats', *Food and Chemical Toxicology*, Vol. 49, No. 12, pp. 3112–3118.

NOTES

1. Zeljenková *et al.* (*Arch. Toxicol.* [on line] 2 October 2014, DOI 10.1007/s00204-014-1374-8) published a paper entitled: 'Ninety-day oral toxicity studies on two genetically modified maize MON810 varieties in Wistar Han RCC rats' (EU 7th Framework Programme project GRACE). This study did not observe adverse effects, in agreement with Hammond *et al.* (2006a).
2. Song *et al.* (*Transgenic Research* [on line] 1 November 2014) published a paper entitled: 'A 90-day subchronic feeding study of genetically modified rice expressing cry1Ab protein in Sprague-Dawley rats'. This study did not observe adverse effects.

ANEXO 8

DOCUMENTO ENVIADO POR LAS ACADEMIAS FRANCESAS DE CIENCIAS SOBRE EL ARTÍCULO DE SÉRALINI *ET AL.*, 2012



**Avis des Académies nationales
d'Agriculture, de Médecine, de Pharmacie, des Sciences, des Technologies, et Vétérinaire
sur la publication récente de G.E. Séralini et al. sur la toxicité d'un OGM**

Les six Académies ont pris connaissance le 19 septembre 2012, en même temps que le grand public, d'un article publié par l'équipe de Gilles-Eric Séralini, dans la revue *Food and Chemical Toxicology* selon lequel un effet tumorigène et toxique important résulterait, chez le Rat, de la consommation de maïs génétiquement modifié NK603 ou de l'exposition à de faibles doses du désherbant Roundup auquel il est résistant.

Devant la mobilisation médiatique autour de cette affaire et son impact sur l'opinion publique, les Académies ont décidé de publier ensemble un avis abordant ses différents aspects, qu'ils soient scientifiques, sociétaux ou déontologiques, et proposent un certain nombre de recommandations.

Les Académies ont cependant jugé inutile d'organiser en leur sein une expertise approfondie de l'article de G.E. Séralini et al. puisque ce rôle a été confié à des agences et institutions spécialisées disposant de toutes les expertises nécessaires. Deux agences étrangères (Allemagne, Australie/Nouvelle Zélande) qui ont déjà publié leurs conclusions, tout comme l'Autorité européenne EFSA (European Food Safety Authority), réfutent les interprétations de résultats jugés douteux. La France va prochainement se prononcer avec les analyses de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) et du HCB (Haut Conseil des Biotechnologies).

Avant d'avoir connaissance de ces deux avis, l'expérience du métier de la recherche permet cependant aux Académies de mettre en cause immédiatement divers aspects scientifiques et déontologiques.

1° - Aspects scientifiques

Les Académies souhaitent attirer l'attention sur plusieurs graves lacunes de l'article de G.E. Séralini et al.

Statistique et méthodologie

Les expériences de toxicologie nécessitent l'utilisation d'un nombre d'animaux adapté à l'objectif pour avoir une valeur statistique interprétable. Dans le cas particulier de l'étude de G.E. Séralini d'une durée de deux ans, il aurait fallu utiliser un nombre d'animaux bien plus important tel que le recommandent les guides, ou dans le cas d'un nombre restreint, de l'ordre de 200 comme ce fut le cas, ne considérer qu'un nombre réduit de groupes répondant à des questions précises. L'utilisation de 10 groupes de 10 animaux, dont un seul groupe témoin est un mauvais choix expérimental.

Avis du 19 octobre 2012 - 1 -

Les trois questions principales abordées par G.E. Séralini étaient : 1°) l'OGM étudié peut-il isolément avoir un effet toxique ou tumorigène ? 2°) Le Roundup peut-il également isolément avoir un effet toxique ou tumorigène ? 3°) Existe-t-il un effet spécifique de l'association des deux produits ? Il convient de bien séparer la question des OGM et celle des herbicides qui biologiquement n'ont aucun rapport l'un avec l'autre. Ce point est important car toute la médiatisation a été faite autour des OGM. Pour répondre à ces trois questions, l'expérimentateur aurait pu constituer 4 groupes d'un nombre important d'animaux : OGM seul, Roundup seul, OGM et Roundup, témoins. L'utilisation dans le travail de G.E. Séralini de 10 groupes de petite taille ne permet pas de répondre aux questions posées. En fait, l'analyse statistique conventionnelle des résultats obtenus, tels qu'ils sont présentés dans l'article, montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes, en d'autres termes, il n'y a pas de mortalité plus importante ni d'effet tumorigène prouvé de l'OGM, ni du Roundup, ni de leur association, contrairement à ce que l'on a laissé entendre au public. L'affirmation que les animaux nourris avec le maïs génétiquement modifié présentent plus de tumeurs que ceux recevant du maïs conventionnel n'a pas de valeur statistique. Ce constat aurait dû, à lui seul, suspendre l'analyse du contenu de cet article qui ne permet pas d'établir une quelconque toxicité.

Tumorigénèse

Il est à noter que ni le mot « cancer » ni le mot « cancérogène » n'apparaissent dans le texte de G.E. Séralini ni dans l'article du Nouvel Observateur ; mais le mot « tumeur » utilisé prête à confusion car chacun pense au cancer et c'est d'ailleurs ce mot qui a été repris par les médias.

L'analyse de la longévité plutôt que de la mortalité laisse à désirer pour des raisons qui relèvent directement de la méthodologie statistique. Le fait de considérer toute mort survenant après la moyenne de survie comme "naturelle" n'est pas acceptable.

En ce qui concerne la tumorigénèse, le choix de la souche de rats Sprague-Dawley est particulièrement malheureux. Cette souche de rats présente spontanément un taux élevé de tumeurs, ce qui d'une part montre qu'il existe un terrain de prédisposition génétique particulier chez ces rats et que, d'autre part, l'analyse statistique doit alors porter sur un nombre de rats très élevé (ce qui n'a pas été fait dans les expériences de G.E. Séralini). Mentionnons que la cancérogénèse du glyphosate, le principe actif du Roundup, a fait l'objet de nombreuses études non citées.

Autres remarques

Plusieurs autres réserves peuvent être formulées :

- La composition des aliments avec la quantité relative de maïs génétiquement modifié et de Roundup, ainsi que la présence éventuelle de contaminants (résidus de pesticides, adjuvants, mycotoxines, etc..) ne sont pas précisées.
- Il n'y a pas de relation dose/effet, ce qui est possible mais inhabituel en toxicologie.
- La présentation des méthodes et des résultats est très succincte alors qu'il y avait toute possibilité pour G.E. Séralini de donner les détails dans l'annexe placée sur le site internet du journal. Cela aurait été particulièrement justifié étant donnée l'utilisation médiatique qui en a été faite. L'absence de ces précisions rendra impossible, sans informations complémentaires, la mise en oeuvre d'études visant à reproduire les résultats annoncés.

2° - Conséquences de l'article sur la société

L'orchestration de la notoriété d'un scientifique ou d'une équipe constitue une faute grave lorsqu'elle concourt à répandre auprès du grand public des peurs ne reposant sur aucune conclusion établie. Tout chercheur peut se considérer comme un lanceur d'alerte, encore faut-il que les hypothèses formulées ne soient pas, en l'absence de résultats validés et confirmés, présentées ou perçues comme des commencements de preuve suffisants pour faire appel au principe de précaution. Il est donc essentiel que tout chercheur soit attentif aux conséquences potentiellement graves de propos excessifs.

Ne disposant pas des informations suffisantes, il en résulte chez le consommateur un renforcement de la peur des OGM, propagée par une presse « catastrophiste ». Cela est particulièrement grave pour les populations qui consomment des OGM en grande quantité comme l'Afrique du Sud. Cela est aussi très délétère pour les autres pays où tant l'utilisation des OGM que les recherches les concernant peuvent être remises en question.

3° - Aspects déontologiques et éthiques

La mobilisation médiatique savamment orchestrée autour de travaux sans conclusion solide pose un problème éthique majeur : celui des auteurs qui ont cru bon d'organiser une opération de communication de grande ampleur autour de ces travaux, opération qui semble motivée plus par des considérations idéologiques que par la qualité ou la pertinence des données obtenues, et celui du journal qui a accepté de publier des données qui apparaissent très fragiles sur de multiples aspects, ne serait-ce que statistiques.

Outre le jugement sur le fond du contenu de l'article évoqué plus haut, la forme de la communication soulève de nombreuses interrogations, notamment la concomitance de la sortie de deux livres, d'un film et d'un article scientifique, avec l'exclusivité de leur contenu accordée à un hebdomadaire et une clause de confidentialité pour les journalistes jusqu'à la conférence de presse. Ces conditions de diffusion vers la presse, mise dans l'impossibilité de s'informer au préalable et donc sans possibilité de commenter en connaissance de cause, ne sont pas acceptables. La sortie du film-reportage à grande diffusion qui a suivi le déroulement de l'étude toxicologique, comme si les conclusions étaient connues d'avance, et la publication de livres par l'un des auteurs interpellent.

L'article de G.E. Séralini a été reçu par la revue le 11 avril 2012 (et accepté apparemment sans modification le 2 août 2012). Compte tenu du temps nécessaire à la finalisation de l'article, on peut penser que G.E. Séralini était en possession de tous les résultats de l'étude au plus tard fin février 2012 et qu'il avait déjà rassemblé suffisamment de données dès la fin 2011 pour conclure, selon sa vision, à « l'extrême dangerosité de l'OGM NK603 et du Roundup ».

Si on prend pour hypothèse que G.E. Séralini était convaincu de la qualité de ses travaux et de la justesse de ses conclusions, son devoir était d'alerter dès 2011 les plus hautes autorités sanitaires du pays pour attirer leur attention sur les très graves dangers que faisaient courir aux populations l'usage du Roundup et de l'OGM NK603. Ces autorités auraient alors pu diligenter une expertise et gagner un temps précieux dans la mise en oeuvre éventuelle de

mesures de protection des populations. Cette retenue d'information est une grave faute professionnelle, de sa part et de tous ceux qui étaient informés de ces résultats.

Dans la communication des résultats, les études antérieures de longue durée qui aboutissent à des conclusions opposées sur la même question sont occultées, alors qu'un travail scientifique rigoureux impose une discussion des résultats obtenus, au vu des résultats antérieurs connus.

Quant aux conflits d'intérêt dont G.E. Seralini accuse continuellement les scientifiques de tous bords et de toutes origines, on peut se poser la question de l'absence de tels conflits d'intérêt pour lui-même et ceux qui l'entourent quand on connaît leur engagement écologique et les soutiens financiers qu'ils ont obtenus par des groupes de distribution fondant leur publicité sur l'absence d'OGM dans les produits alimentaires qu'ils proposent à leurs clients.

4° - Interrogations concernant la publication de l'article dans la revue *Food and Chemical Toxicology*

Il a pu être avancé l'argument que la valeur de l'article de G.E. Seralini était attestée par sa publication dans une revue internationale à comité de lecture. Nous savons tous que les meilleures revues publient un certain nombre, heureusement faible, d'articles médiocres voire inexacts. La revue en question, dans le cas qui nous intéresse *Food and Chemical Toxicology*, est d'un niveau correct. On peut se poser la question de savoir comment un article aussi faible scientifiquement que celui de G.E. Seralini et al. a pu être accepté.

En conséquence, cette acceptation n'est pas un gage de valeur scientifique, en quelque sorte une labellisation. Les défaillances unanimement constatées dans la conception du travail sont telles qu'il est tout à fait étonnant que le comité de lecture d'une revue scientifique de bonne notoriété ait accepté la publication.

En tout état de cause, en science, la seule publication ne suffit pas à établir la preuve d'un fait scientifique. C'est l'avis de la communauté scientifique, des pairs, après la publication, la confirmation indépendante des résultats et l'intégration de ceux-ci dans un ensemble plus large de données qui se soutiennent toutes, qui vont permettre de passer de l'expérience au fait scientifique.

Conclusions et Recommandations

Il apparaît ainsi, au vu des arguments évoqués plus haut, que le bruit médiatique et même politique, occasionné par la divulgation des résultats de G.E. Seralini ne sont pas fondés sur des résultats aussi incontestables qu'ils auraient dû l'être par rapport aux conséquences de la médiatisation qu'ils ont entraînées. Deux responsabilités apparaissent clairement. D'une part celle de la revue qui, nous l'avons dit, n'aurait jamais dû accepter cet article, ce qui est grave car l'expertise de l'article par les revues tient lieu d'évaluation initiale par les pairs. La seconde responsabilité est celle de G.E. Seralini d'avoir orchestré à l'avance une sur-médiatisation à partir de résultats contestables n'apportant aucun commencement de preuve.

Il reste vrai, même après ces critiques, qu'il est sans doute opportun de se poser la question des protocoles expérimentaux qui devraient être utilisés pour détecter un pouvoir cancérigène éventuel des produits alimentaires. Trois mois (durée le plus souvent utilisée) sont-ils suffisants ou non ? La question peut être en particulier posée pour les pesticides ou les

herbicides. Le problème n'est pas simple car l'échelle des temps, en particulier la durée de vie, n'est pas la même chez le Rat et chez l'Homme. Mais ce n'est pas la publication de cet article qui doit inciter à cette réflexion car il ne contient aucun élément probant. Il serait particulièrement dangereux d'évoquer une nécessité éventuelle d'expériences à long terme à l'occasion de cet article car l'impression serait donnée que les résultats présentés par G.E. Seralini ont une valeur suffisante pour justifier une inquiétude du public, avec tous les dégâts que cela peut avoir en France et dans le monde. Il convient de bien faire la différence entre l'évaluation du risque sanitaire lié à l'ingestion d'un aliment comme un maïs, de l'évaluation d'une molécule ou d'un produit auquel l'homme est exposé à faible ou très faible dose comme le glyphosate et le Roundup.

Sur le plan sanitaire, il faut dans un premier temps rassurer la population et confirmer les communiqués déjà donnés sur la faible qualité de l'article. Les questions soulevées méritent d'être étudiées par des chercheurs reconnus, non suspectés de conflits d'intérêt, avec un financement sous contrôle public.

La médiatisation de l'article de G.E. Seralini et son impact sur l'opinion ont été d'autant plus importants que ces travaux concernent la sécurité de notre alimentation, sujet auquel les Français sont très sensibles. Les médias télévisés ont largement repris des images chocs qui n'ont pu que frapper les téléspectateurs. Ils ont ainsi contribué à alimenter des peurs totalement irrationnelles dans la mesure où les résultats présentés n'ont aucune validité scientifique.

Pour limiter de telles dérives, les six Académies recommandent la création auprès du Président du Conseil supérieur de l'audiovisuel d'un « Haut comité de la science et de la technologie ». La mission de ce Haut comité serait d'attirer l'attention du Président du CSA sur la médiatisation de travaux scientifiques remettant en cause des savoirs partagés par la très grande majorité de la communauté scientifique internationale sans que les responsables de chaînes de télévision ou de radios se soient auparavant assurés de leur validité, alors que la diffusion de ce qui pourrait s'avérer par la suite comme « une fausse nouvelle » aura profondément et indûment influencé les Français, parfois de manière irréversible. Ce Comité qui dans le cas le plus fréquent ne pourrait fonctionner qu'*a posteriori*, devrait être très réactif dans la mesure où les problèmes qu'il aurait à analyser nécessitent souvent des réponses rapides.

ANEXO 9

CONSIDERACIONES A LOS SEÑALAMIENTOS MÁS IMPORTANTES EN CONTRA DE LOS TRANSGÉNICOS

- a) Conforme a 44 trabajos científicos, no existe daño en animales alimentados por cultivos transgénicos o sus derivados por periodos largos (90 días).
- b) Las plantas transgénicas son metabólicamente y sustancialmente equivalentes a las parentales, según se ha determinado por ciencias ómicas en decenas de trabajos independientes.
- c) Por lo anterior, las agencias responsables de inocuidad y sanidad alimentaria no han retirado ningún producto transgénico de los que hoy se utilizan.
- d) No existe evidencia de daño por la coexistencia entre plantas transgénicas y plantas convencionales, y no se considera que habrá daño por el posible flujo génico mediado por el polen de maíz transgénico en maíces convencionales o nativos. En varios países existe una agricultura de coexistencia.
- e) La transferencia de transgenes mediante el polen puede ocurrir, aunque es poco probable, y esto no implica daño ni contaminación. Se señalan las medidas que se llevan a cabo en diferentes regiones del planeta para contener el movimiento del polen a través de distancias y barreras físicas de las propias plantas.
- f) Se presentan alternativas tecnológicas para contener con posibles nuevas plagas de insectos que pudieran no ser sensibles a los bioinsecticidas que se encuentran en las plantas transgénicas actuales.
- g) Existen razones, basadas en la evidencia científica sobre la ausencia de daños a la salud y al medio ambiente, que sustentan el cultivo y el consumo de OGM en México.
- h) Las plantas transgénicas comerciales que se utilizan actualmente en México tienen la capacidad de eliminar diferentes plagas de insectos que existen en el país.

i) El control de semillas por parte de las compañías transnacionales es el mayor motivo de rechazo a las plantas transgénicas. La supuesta soberanía alimentaria en manos de compañías transnacionales y cómo contender con ello, no es un problema exclusivo de las plantas transgénicas, sino de muchos de los cultivos tradicionales previos.

j) Se enfatiza la ausencia de daño a la salud y al medio ambiente de los cultivos transgénicos

y del glifosato que se utiliza para eliminar las malezas, siempre y cuando éste se emplee en las condiciones y concentraciones adecuadas, conforme lo señalan las agencias de inocuidad y seguridad alimentaria. Las malezas deben ser destruidas porque de lo contrario aventajan a los cultivos por los nutrientes. El glifosato es un herbicida de muy baja toxicidad que se usa para tal efecto, sin embargo, si se usa de manera irresponsable, podría traducirse en daños a la salud y en contaminación del medio ambiente.

ANEXO 10

LISTADO SIMPLIFICADO DE BENEFICIOS DE LOS TRANSGÉNICOS

SALUD; PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DE ALIMENTOS Y MEDICAMENTOS INOCUOS Y DE CALIDAD

- Existe evidencia científica que respalda la ausencia de daños a la salud por el consumo de alimentos de origen transgénico.
- Hoy día, una gran variedad de alimentos procesados y naturales de origen transgénico, producidos por 28 países y consumidos por cientos de millones de seres humanos y miles de millones de animales, se comercializan internacionalmente en los mercados y supermercados, incluyendo los de México.
- Los alimentos transgénicos son los alimentos mejor evaluados, y se puede afirmar que existe equivalencia metabólica, sustantiva y composicional entre los cultivos transgénicos y las plantas convencionales de las que provienen.
- Los organismos genéticamente modificados (OGM) han permitido la generación y

respectiva utilización de más de 100 medicamentos y vacunas transgénicas, los cuales no existirían sin los OGM.

- Los OGM han permitido a los agricultores reducir, y en ciertos casos eliminar, su exposición a insecticidas químicos sintéticos, algunos de los cuales causan daño a la salud o incluso son carcinogénicos.

MEDIO AMBIENTE Y PRODUCCIÓN SUSTENTABLE DE ALIMENTOS

- Gracias a las plantas transgénicas, en el campo se puede reducir significativamente el uso de insecticidas químicos sintéticos, muchos de ellos recalcitrantes e importantes contaminantes de los suelos y mantos freáticos.
- El uso de los cultivos transgénicos ha contribuido también indirectamente a la disminución de gases de efecto invernadero.

BIODIVERSIDAD

- Por ser organismos creados por procesos de transferencia horizontal de ADN, similares a los que han ocurrido y ocurren en la naturaleza, los OGM son organismos con niveles de riesgo similares a los que ya existen en los procesos naturales de la biota.
- No existe contaminación ni evidencia de daño a las variedades nativas y convencionales por plantas transgénicas; existe coexistencia.
- Con los cultivares transgénicos se protegen múltiples especies de insectos no plaga —algunos polinizadores— que viven en los campos de cultivo, ya que de esta manera no son eliminados por las fumigaciones con insecticidas químicos que son inespecíficos y lamentablemente se siguen usando en muchas regiones.

BENEFICIO ECONÓMICO

- Los cultivares transgénicos permiten a los agricultores dejar de utilizar y, por ende, de comprar insecticidas químicos, lo cual ya ocurre en muchos países, incluyendo Estados Unidos y Canadá, y especialmente en nueve países iberoamericanos.

BENEFICIO SOCIAL

- La suma de las múltiples ventajas aquí señaladas representa un considerable beneficio para las comunidades que están utilizando y adoptando la biotecnología de los cultivares transgénicos.

REGULACIÓN

- Las autoridades y agencias reguladoras de la sanidad y la seguridad alimentaria de varios países y regiones, incluyendo México y Europa, no han retirado medicamentos ni cultivos transgénicos que se utilizan y venden en el mercado internacional. A pesar de que algunos han sido cuestionados por supuestos daños, éstos han sido reevaluados sin cambio en la decisión y ninguno ha salido de circulación.
- En México, los detractores han señalado supuestos daños ocasionados por OGM y, en consecuencia, han realizado acciones como amparos y una demanda colectiva ante el poder judicial para bloquear el uso de cultivares transgénicos; esto, en detrimento de los campesinos mexicanos, cuando hoy el planeta se mueve hacia una tecnología agraria menos contaminante y nociva, basada en el uso de la biotecnología transgénica.

CONCLUSIONES FINALES

- Existen amplios e innegables beneficios de distinta índole por el uso de organismos genéticamente modificados y sus productos.
- No existe evidencia sustentada de daños a la salud ni al ecosistema por el uso de transgénicos o sus productos.
- Los señalamientos por supuestos daños a la salud, al medio ambiente y a la biodiversidad son falsos y carecen de sustento científico verdadero.





AGRADECIMIENTOS

El Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) agradece al Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi, presidente de la AMC, su interés, confianza y apoyo para la elaboración de este libro.

Se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) a la AMC para la edición, impresión y publicación de esta obra.

Se agradece también el apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, a través del Instituto de Biotecnología y especialmente de su director, el Dr. Octavio Tonatíuh Ramírez Reivich, para la impresión de este libro.

Asimismo, el Comité agradece a Renata Villalba, coordinadora ejecutiva de la AMC, el extraordinario y especial apoyo brindado, sin el cual no hubiera sido posible elaborar este documento.

Un reconocimiento especial a la Dra. Sol Ortiz, secretaria ejecutiva de la Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (Cibiogem) y a su equipo por el apoyo brindado. Mucha de la información que aquí se presenta fue previamente comentada con ella.

El Comité agradece muy sinceramente el apoyo brindado por Andrea Sabido en la organización de las referencias bibliográficas.

Se agradece a El Colegio Nacional por varias figuras que se tomaron del libro *Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna* (compilador y editor: Francisco G. Bolívar Zapata, 2007).

Se agradece a la Academia Mexicana de Ciencias el permiso para reproducir contenidos, figuras e imágenes del libro *Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados* (coordinador: Francisco G. Bolívar Zapata, 2011).

Los autores agradecen el apoyo de Walter Galván, Francisco Mora, Edith Martínez y Claudia Jiménez, quienes laboran en la Academia Mexicana de Ciencias.

Se agradece a la M. en C. Guadalupe Ramírez Villatoro y al Lic. Alejandro Rodríguez Torres, del Instituto Nacional de Medicina Genómica por la elaboración de la figura II.15, relativa al modo de acción del sistema CRISPR-Cas9.

Los autores agradecen el trabajo y apoyo del equipo editorial que realizó la corrección de estilo, la formación y el cuidado de la edición: Ana Ezcurra, Saúl Peña y Juan Carlos Burgoa. También agradece los trabajos de impresión de Offset Rebosán S.A. de C.V., en particular a su director comercial, Enrique Sánchez.

El Comité agradece los permisos y las autorizaciones de las siguientes academias, instituciones, organizaciones o casas editoriales para reproducir materiales que fueron utilizados en varios capítulos:

CAPÍTULO III

Figura III.1. Declaración premios Nobel, 2016: “Laureates Letter Supporting Precision Agriculture (GMOs)” [Carta firmada por 123 premios Nobel a favor de la agricultura de precisión (OGM)].

Se agradece a Sir Richard J. Roberts, Ph.D. F.R.S. y premio Nobel de Medicina 1993, la autorización para reproducir esta carta.

Reprinted by permission granted by Sir Richard J. Roberts, Ph.D. F.R.S., 1993 Nobel Laureate in Medicine. http://supportprecisionagriculture.org/nobel-laurate-gmo-letter_rjr.html

Figura III.1 bis. Declaración AgBioworld, 2012: “Scientists in support of agricultural biotechnology” (Científicos a favor de la biotecnología agrícola). Carta firmada por 25 premios Nobel y otros destacados investigadores.

Se agradece al Prof. Channapatna S. Prakash la autorización para reproducir esta carátula.

Reprinted by permission granted by Prof. Channapatna S. Prakash.

www.agbioworld.org/declaration/

Figura III.2. Carátula del reporte EASAC, 2013: “Planting the future: opportunities and challenges for using crop genetic improvement technologies for sustainable agriculture” (Plantando el futuro: oportunidades y retos por el uso de plantas mejoradas genéticamente para la agricultura sustentable).

Se agradece el permiso del Secretariado de la EASAC para reproducir esta carátula.

Reprinted with the permission granted by the EASAC Secretariat.

www.easac.eu.

Figura III.3. Declaración AAAS, 2012: “Statement by the Board of Directors of the American Association for the Advancement of Science (AAAS) on labelling of genetically modified foods”, USA (Pronunciamento del Consejo Directivo de la AAAS sobre el etiquetado de alimentos genéticamente modificados).

Se agradece a la AAAS la reproducción de esta declaración. Licencia No. OP-00090582.

Statement reprinted with permission granted by AAAS. License number OP-00090582.

www.aaas.org/aaas_GM_statement.pdf

Figura III.4. Carátula del libro *Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados*, Bolívar y colaboradores, Comité de Biotecnología, Academia Mexicana de Ciencias, México, 2011.

Se agradece a la Academia Mexicana de Ciencias la autorización para reproducir esta carátula.

<http://www.coniunctus.amc.edu.mx/libros/OGM.pdf>

Figura III.5. Carátula del reporte Unión Europea, 2010: “A decade of EU-funded GMO research (2001–2010)” [Una década de investigación sobre OGM (2001–2010)].

Se agradece a la European Commission, Directorate-General for Research la autorización para reproducir esta carátula.

Reprinted with permission granted by the European Commission, Directorate-General for Research.

<https://bookshop.europa.eu/en/a-decade-of-eu-funded-gmo-research-2001-2010-pbKINA24473/>

Figura III.6. Carátula del reporte The Royal Society, 2000: “Transgenic plants and world agriculture”, London, U.K. (Plantas transgénicas y agricultura en el planeta).

Se agradece a The Royal Society el permiso para reproducir esta carátula.

Reprinted with permission granted by The Royal Society.

https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2000/10062.pdf

Figura III.7. Carátula del reporte NASEM, 2010: “The impact of genetically engineered crops on farms sustainability in the United States”, Washington, D.C., USA (El impacto de cultivos modificados por ingeniería genética en la sustentabilidad de las granjas en Estados Unidos).

Se agradece el permiso para reproducir esta carátula a la National Academy of Sciences, cortesía de la National Academies Press, Washington, D.C.

Reprinted with permission from NASEM (2010) by the National Academy of Sciences, courtesy of the National Academies Press, Washington, D.C.

<https://doi.org/10.17226/12804>

Figura III.8. Carátula del reporte NASEM, 2016: “Genetically engineered crops: experiences and prospects”, Washington, D.C., USA (Plantas desarrolladas por ingeniería genética: experiencias y prospectivas).

Se agradece el permiso para reproducir esta carátula a la National Academy of Sciences, cortesía de la National Academies Press, Washington, D.C.

Reprinted with permission from NASEM Report (2016) by the National Academy of Sciences, courtesy of the National Academies Press, Washington, D.C.

<https://doi.org/10.17226/23395>

Figura III.9. Carátula del reporte The Royal Society, 2016: “GM plants. Questions and answers”, London, U.K. (Plantas genéticamente modificadas. Preguntas y respuestas).

Se agradece a The Royal Society el permiso para reproducir esta carátula.

Reprinted with permission by The Royal Society.

<https://royalsociety.org/~media/policy/projects/gm-plants/gm-plant-q-and-a.pdf>

CAPÍTULO IV

Figura IV.1. Carátula del artículo de Snell *et al.*, 2012: “Assessment of the health impact of GM plant diets in long-term and multigenerational animal feeding trials: a literature review” (Valoración del impacto en la salud por dietas con plantas genéticamente modificadas en periodos largos y multigeneracionales en pruebas de alimentación en animales: una revisión de la literatura), *Food and Chemical Toxicology* 50(3–4), 1134–1148.

Se agradece el permiso de Elsevier para incluir esta carátula. Licencia número 4061440414806.

Permission granted by Elsevier. License number 4061440414806.

Figura IV.2. Carátula del artículo de Ricroch, 2013: “Assessment of GE food safety using ‘omics’ techniques and long-term animal feeding studies” (Evaluación de la inocuidad del alimento genéticamente modificado, utilizando ciencias ómicas y animales alimentados por periodos largos), *New Biotechnology* 30, 4, 349–354.

Se agradece el permiso de Elsevier para incluir esta carátula. Licencia número 4064911006926.

Permission granted by Elsevier. License number 4064911006926.

Figura IV.3. Carátula del artículo de Ricroch *et al.*, 2014: “Looking back at safety assessments of GM food/feed: an exhaustive review of 90 day animal feeding studies” (Revisando la valoración de la inocuidad de la alimentación y del alimento genéticamente modificado: una revisión exhaustiva de los estudios de alimentación a animales por periodos de 90 días), *International Journal of Biotechnology* 13: 230–256.

Se agradece el permiso de INDERSCIENCE Publishers para incluir esta carátula

Permission granted by INDRSCIENCE Publishers

<http://www.inderscience.com>

Figura IV.5. Carátula del aviso de retractación por parte del editor de la revista *Food and Chemical Toxicology*, respecto a la publicación del artículo de Séralini *et al.*, 2012: “Long term toxicity of a Roundup herbicide and a Roundup-tolerant genetically modified maize” [*Food Chem. Toxicol.* 50 (2012), 4221–4231]. Este aviso fue publicado en *Food and Chemical Toxicology* 63, 244, en el año 2014.

Se agradece el permiso de Elsevier para incluir esta carátula. Licencia número 4061440536877.

Permission granted by Elsevier. License number 4061440536877.

Figura IV.6. Carátula del pronunciamiento final de la EFSA respecto al artículo de Séralini *et al.*, 2012: “Final review of the Séralini *et al.* (2012a) publication on a 2 year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603 as published online on 19 September 2012 in *Food and Chemical Toxicology*” (Revisión final de la publicación de Séralini *et al.* (2012) sobre la alimentación en roedores durante periodos de dos años con formulaciones de glifosato y maíz GM NK603, publicado en línea el 19 de septiembre de 2012 en *Food and Chemical Toxicology*), *EFSA Journal* 10 (11), 2986, 2012.

© European Food Safety Authority (2012) Carátula reproducida con el permiso de John Wiley & Sons, Ltd. Contrato No. 108405.

Permission granted by John Wiley & Sons, Ltd. Contract number 108405.

Figura IV.7. Carátula del Aviso de las Academias Nacionales Francesas enviado al editor de la revista *Food and Chemical Toxicology* respecto a la publicación de Séralini *et al.*, 2012 (Avis des Académies nationales d’Agriculture, de Médecine, de Pharmacie, des Sciences, des Technologies, et Vétérinaire sur la publication récente de G.E. Séralini *et al.* sur la toxicité d’un OGM).

Se agradece el permiso de la vicepresidenta de la Academia de Ciencias de Francia, Mme. Cathérine Cesarsky, para incluir esta carátula.

Permission granted by Mme. Cathérine Cesarsky, Vicepresident of the French Academy of Sciences.

www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/avis1012.pdf

Figura IV.8. Carátula del artículo de Nicolía *et al.*, 2014: “An overview of the last 10 years of genetically engineered crop safety research” (Un análisis de los últimos 10 años de investigación en la seguridad de las plantas generadas por ingeniería genética), *Crit. Rev. Biotechnol.* 34(1), 77–88.

Carátula reproducida con el permiso de Taylor & Francis Group. Factura No. 947303438.

Permission granted by Taylor & Francis Group. Invoice number 947303438.

Se agradece también a los autores Alessandro Nicolía, Alberto Manzo, Fabio Veronesi y Daniele Rosellini el aval para la reproducción de esta carátula

We also thank the authors of this article: Alessandro Nicolía, Alberto Manzo, Fabio Veronesi, and Daniele Rosellini for their approval to reprint this image.

Figura IV.10. Carátulas de las dos publicaciones de la EFSA de los años 2012 y 2014, con declaraciones y opiniones científicas sobre los OGM.

© European Food Safety Authority (2012) / © European Food Safety Authority (2014).

Carátulas reproducidas con el permiso de John Wiley & Sons, Ltd. Contrato No. 108405.

Permissions granted by John Wiley & Son, Ltd. Contract number 108405.

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2012.2705/epdf>

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2014.3809/epdf>

CAPÍTULO V

Figura V.1. Carátula del artículo de Brookes y Barfoot, 2012: “Global impact of biotech crops: environmental effects, 1996–2010” (Impacto global de las cosechas producidas por biotecnología: efectos en el medio ambiente, 1996–2010), *GM Crops and Food. Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 3(2), 129–137.

Este artículo es de libre acceso y no se requiere permiso especial para incluir su carátula.

This is an open-access article licensed under Creative Commons Attribution-Non-Commercial 3.0 Unported License.

Figura V.2. Carátula de la publicación de Klümper y Qaim, 2014:

“A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops” (Un metaanálisis de los impactos de las cosechas genéticamente modificadas), *Plos One* 9(11): e111629.

Este artículo publicado en *Plos One* es de acceso libre “CC-BY” y no se requiere permiso especial para reproducir esta carátula.

Open-access article published by *Plos One* license “CC-BY”.

Figura V.3. Carátula de la publicación de Brookes y Barfoot, 2014:

“Economic impact of GM crops. The global income and production effects, 1996–2012” (Impacto económico de las cosechas genéticamente modificadas: ingreso global y efectos en la producción en el periodo 1996–2012), *GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain* 5(3), 65–75.

Este artículo es de acceso libre y no se requiere permiso especial para incluir esta carátula.

This is an open-access article licensed under Creative Commons Attribution-Non-Commercial 3.0 Unported License.

Figura V.4. Carátula de la publicación de Marvier *et al.*, 2007:

“A meta-analysis of effects of Bt cotton and maize on non target invertebrates” (Un metaanálisis de los efectos del algodón y el maíz Bt en invertebrados que no son el objetivo), *Science* 316: 5830, 1475–1477.

Se agradece a AAAS/ Science el permiso para reproducir esta carátula. Licencia No. OP-00090582.

Permission granted by AAAS/Science. License number OP-00090582.

Figura V.5. Carátula de la publicación de Duan *et al.*, 2008:

“A meta-analysis of effects of Bt crops on honey bees (*Hymenoptera apidae*)” [Un metaanálisis de los efectos del algodón Bt en abejas productoras de miel (*Hymenoptera apidae*)]. *Plos One* 3(1): e1415.

Este artículo publicado en *Plos One* es de acceso libre “CC-BY” y no se requiere permiso especial para reproducir esta carátula.

Open-access article published by *Plos One* license “CC-BY”.

CAPÍTULO VI

Figura VI.1. Blanco *et al.*, 2014: “Maize pests in Mexico and challenges for the adoption of integrated pest management programs” (Plagas de maíz en México y retos para la adopción de programas de manejo integral de control de plagas) *J. Integr. Pest Manag.* 5(4): E1-E9.DOI:10.1603/IPM14006

Se agradece a Oxford University Press el permiso para reproducir esta figura. Licencia no. 4060460300285
Permission granted by Oxford University Press. License number 4060460300285

Figura VI.2. Tabla obtenida del reporte NASEM, 2016: “Successful coexistence in selected countries that produce and market genetically engineered crops and non-GE crops”, Washington D.C., USA (Coexistencia exitosa en países que producen y comercializan cosechas genéticamente modificadas y cosechas no modificadas genéticamente.)

Se agradece el permiso para reproducir esta tabla a la National Academy of Sciences, cortesía de National Academies Press, Washington, D.C.

Reprinted with permission from NASEM Report (2016) by the National Academy of Sciences, courtesy of the National Academies Press, Washington, D.C.

CAPÍTULO VII

Figura VII.1. Diferencia de opiniones entre público en general y científicos. Encuesta sobre ciencia y sociedad realizada por el Pew Research Center, 2014, USA (Pew Research Center. Public and Scientists views on Science and Society, 2014:

www.pewinternet.org/2015/01/29/public-and-scientists-views-on-science-and-society/pi_2015-01-29_science-and-society-00-02/)

Se agradece al Pew Research Center la autorización para reproducir esta imagen.

Reprint permission granted by the Pew Research Center.

http://www.pewinternet.org/2015/01/29/public-and-scientists-views-on-science-and-society/pi_2015-01-29_science-and-society-00-02/

CAPÍTULO VIII

Figura VIII.1. Variedad de maíz CIEA-9, tolerante a sequía y frío, desarrollada en México por Beatriz Xoconostle y su grupo de colaboradores. Se puede observar el efecto de mayor resistencia a la helada en la variedad CIEA-9 y en cultivares CR que por cruza llevan también esta capacidad, comparativamente con la cepa de la que procede.

Se agradece a la Dra. Xoconostle la información, incluyendo la presentada en esta figura, y el permiso para utilizarla en este libro.

Figura VIII.2. Portada de la revista *Plant Biotechnology Journal* en la que se publicó el artículo de López Arredondo y Herrera Estrella, 2013, donde se reporta la variedad transgénica de tabaco que utiliza fosfito como fertilizante. Ésta y otras variedades transgénicas han sido diseñadas y construidas por Luis Herrera Estrella y su grupo.

© Society for Experimental Biology, Association of Applied Biologists, 2013.

Carátula reproducida con el permiso de John Wiley & Sons, Ltd. Contrato No. 108404.

Permission granted by John Wiley & Sons, Ltd. Contract number 108404.

ANEXO 3

Se agradece a la Organización Mundial de la Salud el permiso para reproducir el documento electrónico “20 preguntas sobre alimentos genéticamente modificados (GM)”.

www.who.int/mediacentre/news/notes/np5/es/

NOTAS ACLARATORIAS

1. Las imágenes que no presentan crédito fueron adquiridas de los acervos electrónicos de Thinkstock y Shutterstock mediante los contratos celebrados entre la AMC y dichas compañías.

2. La presente obra se realizó tomando como base el libro *Por un uso responsable de los organismos genéticamente modificados*, elaborado por el Comité de Biotecnología de la AMC y editado por la AMC en el año 2011. Al inicio del proceso editorial de esta publicación, el objetivo era realizar la segunda edición del libro publicado en 2011. Sin embargo, en virtud de que la temática y la información se ampliaron de manera considerable, y se incorporaron nuevos elementos, los autores decidieron que no sólo se trataba de una revisión del título de 2011, sino de una nueva publicación que derivó en la presente obra.





SEMBLANZAS DE LOS COAUTORES

CARLOS FEDERICO ARIAS ORTIZ

Instituto de Biotecnología

Universidad Nacional Autónoma de México

arias@ibt.unam.mx

Investigador del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Obtuvo la licenciatura en la Facultad de Química y el doctorado en Investigación Biomédica Básica en la UNAM. Posteriormente realizó estudios postdoctorales en el Instituto Tecnológico de California, EUA. Sus áreas de investigación son la biología molecular y la epidemiología de virus gastrointestinales y respiratorios, con énfasis en rotavirus y astrovirus. Recientemente su laboratorio ha extendido su interés más al diagnóstico y al estudio de la metagenómica viral de los tractos respiratorios y gastrointestinales, para entender la diversidad de virus presentes en estos sistemas en condiciones de salud y enfermedad. Ha publicado más de 140 artículos originales en revistas de circulación internacional y sus trabajos han sido citados en más de 4,000 ocasiones en la literatura mundial. Ha graduado a 46 estudian-

tes, 33 de ellos de posgrado. Es miembro del comité editorial de las revistas *Journal of Virology* y *Archives of Medical Research*, y autor de capítulos en los libros de texto y referencia *Fields Virology* y *Clinical Virology*, los más importantes en el área de la virología en el ámbito internacional. Ha presentado más de 300 trabajos en foros nacionales e internacionales en los cinco continentes y ha sido investigador invitado en el Instituto Nacional de Salud de Tokio, Japón; en el Centro Nacional de Investigación Científica de Francia, en París, y en el Instituto Tecnológico de California, EUA. Entre sus distinciones se encuentran el Premio de la Academia Mexicana de Ciencias, el Premio Carlos J. Finlay, otorgado por la UNESCO en París, el nombramiento de Investigador Internacional del Instituto Médico Howard Hughes de Estados Unidos (1991–2006), el Premio de la Academia Mundial de Ciencias, entregado en Sudáfrica en 2008, el Premio Universidad Nacional (2013) que otorga la UNAM y el Premio Nacional de

Ciencias y Artes (2014) en el área de Ciencias Naturales y Físico-matemáticas que otorga el Gobierno de la República. Fue director del Instituto de Biotecnología de la UNAM de 2005 a 2013 y pertenece al nivel III del Sistema Nacional de Investigadores.

MARIO ALBERTO ARTEAGA VÁZQUEZ

Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada
Universidad Veracruzana
marioarteagavazquez@gmail.com

Nació en la Ciudad de México en 1978, graduado con honores de la licenciatura en Biología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Realizó su tesis de licenciatura bajo la asesoría del Dr. Luis R. Herrera Estrella en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN) y se graduó del programa de doctorado directo también en el Cinvestav, bajo la asesoría del Dr. Jean Philippe Vielle Calzada. El Dr. Arteaga realizó estudios de posdoctorado con la Dra. Vicki Chandler en el Instituto BIO5 de la Universidad de Arizona, EUA, estudiando las bases moleculares de la paramutación, el fenómeno de herencia epigenética transgeneracional más extremo de la naturaleza. En el año 2011, se integró al Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada de la Universidad Veracruzana (Inbioteca-UV); ese mismo año se consolidó como jefe del Grupo de Epigenética y Biología del Desarrollo, y fundó el Laboratorio de Transcriptómica. En 2012, el Dr. Arteaga se integró al grupo internacional de científicos que analizó el genoma de *Marchantia polymorpha*, una de las plantas terrestres más antiguas del planeta, y estableció en su laboratorio a *M. polymorpha* como modelo para estudiar la evolución y la función

de los mecanismos epigenéticos involucrados en el desarrollo reproductivo y la respuesta al estrés biótico y abiótico. El Dr. Arteaga cuenta con 20 publicaciones citadas más de 1,000 veces en la literatura mundial. Ha formado parte del consejo editorial del Maize Genome Database. Desde el año 2013 es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I, y a partir de 2014 colabora como editor asociado en la revista *Frontiers in Plant Science*. En 2015, el Dr. Arteaga ganó la prestigiosa beca Newton Advance y se integró como investigador becario a la Real Sociedad Inglesa (The Royal Society).

HUGO ALBERTO BARRERA SALDAÑA

Facultad de Medicina
Universidad Autónoma de Nuevo León
hbarrera@gmail.com

Se graduó en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) como bioquímico cursando la carrera de Biología y buena parte de la de Químico Bacteriólogo Parasitólogo. Se doctoró en Biología Molecular en la Universidad de Texas en Houston, EUA, y realizó un posdoctorado en la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo, Francia. Cursó las especialidades en Conversión de Tecnología a Capital por la Universidad de Texas en Austin, EUA. Es catedrático de Bioquímica y Biología Molecular en la Facultad de Medicina y en la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL. Lo ha sido también en otras universidades de México y del extranjero. Ha realizado estancias de investigación en Francia, España y Estados Unidos. Su carrera como investigador la avalan más de 200 publicaciones científicas que han recibido alrededor de 3,000 citas, cinco libros, dos patentes y varias vinculaciones con empresas; además de haber sido mentor, di-

rector o codirector de 26 tesis de licenciatura, 87 de maestría y 39 de doctorado, a la fecha. En la UANL es el coordinador del Laboratorio de Genómica y Bioinformática y de la Unidad de Biotecnología Médica. Ha colaborado en proyectos de la mayor competitividad internacional, destacando el de la secuenciación más extensa de genes humanos (del locus de la hormona del crecimiento) lograda en conjunto con investigadores de Genentech Inc. y de la Universidad de Washington, EUA, y considerada un record mundial por la revista *Science* y evidencia de la factibilidad del Proyecto del Genoma Humano (PGH). En México y Latinoamérica se le considera pionero de la genómica, tanto por haber propuesto, fundado y dirigido el primer centro de genómica de Latinoamérica (Centro de Biotecnología Genómica del IPN), como por haber iniciado investigaciones, posgrados, proyectos, protocolos clínicos e incluso servicios tecnológicos, en los campos de la biología molecular, el diagnóstico molecular, la farmacogenética y la terapia génica. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel III, y ha recibido varias distinciones, entre ellas, 20 premios de investigación de la UANL, el Premio Nacional de Alimentos, el Premio Dr. Rosenkranz, la Medalla al Mérito Dr. Carlos Canseco, la Medalla al Mérito Académico Dr. Jorge Brenes Anaya y el Premio Luis Elizondo del ITESM, así como las membresías de la Academia Nacional de Medicina y de la Academia Mexicana de Ciencias, y la publicación de su perfil en el semanario *Nature Medicine* (2003).

FRANCISCO GONZALO BOLÍVAR ZAPATA

Instituto de Biotecnología
Universidad Nacional Autónoma de México
bolivar@ibt.unam.mx
(coordinador)

Nació en la Ciudad de México en 1948. Es doctor en Química por la UNAM, institución en la que es profesor e investigador emérito. En 1982 fue director fundador del Centro de Investigación sobre Ingeniería Genética y Biotecnología de la UNAM. En 1991 la UNAM transformó este Centro en el Instituto de Biotecnología, y Bolívar fue nombrado su primer director, cargo que ocupó hasta 1997. Ese año fue designado coordinador de la Investigación Científica de la UNAM, puesto que ocupó por tres años. En el periodo 1996–2000 fungió como vicepresidente y presidente de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC). Asimismo, fue miembro de la Junta Directiva de la UAM de 1997 a 2005, así como integrante de la Junta de Gobierno de la UNAM de 2002 a marzo de 2012. También perteneció a la Junta de Gobierno de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos de 2009 a 2012. Su trabajo de investigación y desarrollo tecnológico es pionero en el ámbito internacional, en el área de la biología molecular y la biotecnología, en particular en el aislamiento, la caracterización y la manipulación de genes en microorganismos. Bolívar Zapata fue miembro de un grupo de investigadores que en San Francisco, EUA, en 1977 lograron, por primera vez a nivel mundial, mediante técnicas de ingeniería genética la producción de proteínas transgénicas idénticas a las humanas —como la insulina, que se utiliza clínicamente para contender contra la diabetes— en bacterias. Además, su trabajo en el área de la ingeniería de vías meta-

bólicas en microorganismos es también pionero en el propósito de la modificación genética y de la fisiología bacteriana para el diseño y la optimización de microorganismos productores de metabolitos y proteínas de interés social y comercial. El Dr. Bolívar cuenta con más de 240 publicaciones citadas más de 15,200 veces en la literatura mundial, incluyendo más de 1,000 citas en 330 libros de texto y especializados. Ha dirigido más de 65 tesis, siendo la mayoría de posgrado; muchos de sus alumnos son profesores-investigadores y técnicos en instituciones nacionales e internacionales. Ha escrito y editado libros de divulgación y opinión, incluyendo cinco tomos de su obra científica como miembro de El Colegio Nacional. Ha realizado numerosas intervenciones ante el Congreso de la Unión y ante la Presidencia de la República, en defensa y promoción de la ciencia, de la tecnología, de la universidad pública y de la biotecnología. Ha recibido varias distinciones y premios, entre los que destacan: el Premio de Investigación en Ciencias Naturales (1982) que otorga la AMC, el Premio Manuel Noriega en Ciencia y Tecnología (1988) que otorga la OEA, el Premio Universidad Nacional (1990), el Premio Príncipe de Asturias en Investigación Científica y Técnica (1991) que otorga en España la Fundación Príncipe de Asturias, el Premio Nacional de Ciencias y Artes (1992) que otorga el Gobierno de la República, el Premio TWAS (The World Academy of Sciences) en Biología (1997) que otorga la Third World Academy of Sciences, en Italia. La Universidad de Lieja, Bélgica, la Universidad Autónoma Metropolitana, el Colegio de Postgraduados y la Universidad Autónoma del Estado de Morelos le han otorgado doctorados *Honoris Causa*. Desde septiembre de 2012, el Auditorio del Instituto de Biotecnología de la UNAM lleva el nombre

“Dr. Francisco G. Bolívar Zapata”. En 2015, la Asociación Nacional de Fabricantes de Medicamentos (ANAFAM) le otorgó un reconocimiento por su contribución al conocimiento y desarrollo de la biotecnología y de la industria farmacéutica en México. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 1984 y en 2014 fue designado investigador emérito del SNI. Es miembro de El Colegio Nacional desde 1994. Desde 2007 es miembro de la Junta de Gobierno del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Es coordinador del Comité de Biotecnología de la Academia Mexicana de Ciencias. En septiembre de 2012, el entonces presidente electo de México designó a Francisco Bolívar como el coordinador del ramo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Equipo de Transición. En abril de 2013, el presidente de México nombró al Dr. Bolívar coordinador de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Oficina de la Presidencia de la República, cargo que ocupó hasta septiembre de 2015, reintegrándose a sus labores académicas como investigador emérito del Instituto de Biotecnología de la UNAM.

ENRIQUE GALINDO FENTANES

Instituto de Biotecnología
Universidad Nacional Autónoma de México
galindo@ibt.unam.mx

Es ingeniero químico por la Universidad Autónoma de Puebla y doctor en Biotecnología por la UNAM. Desde 1984 radica en Cuernavaca, Morelos, donde ha ocupado diferentes puestos académicos en el Instituto de Biotecnología (IBt) de la UNAM, donde es investigador titular C (a partir de 1998). Es miembro del SNI desde su fundación (1984) y tiene el nivel III desde 1999. Sus líneas de investigación se han centrado en el

área de ingeniería y tecnología de bioprocesos. Ha publicado un total de 120 artículos de investigación original, publicados en revistas internacionales indexadas que han generado cerca de 1,500 citas en la literatura científica. Ha dirigido 26 tesis de licenciatura, 25 de maestría y seis de doctorado. En los aspectos de innovación tecnológica es autor de siete patentes otorgadas y ha participado en el desarrollo de cuatro procesos biotecnológicos que han sido transferidos a sus usuarios. Destacan los trabajos liderados por el Dr. Galindo en el desarrollo de tecnologías para el control biológico de la principal enfermedad del mango (antracnosis) que han permitido la producción de mango de alta calidad destinado a la exportación. Estas tecnologías han sido transferidas a una empresa (Agro&Biotecnia, filial del IBt-UNAM, fundada en 2008 por él y dos socios), la cual, desde noviembre de 2012, comercializa el primer biofungicida foliar completamente desarrollado en México (con el nombre comercial de Fungifree AB®). Actualmente este producto tiene registros de efectividad para el control de tres enfermedades ocasionadas por hongos en 20 diferentes cultivos. Cuenta también con el registro OMRI como producto orgánico. En 2014 este desarrollo recibió los premios más importantes a la innovación a nivel nacional y latinoamericano: primer lugar del Premio ADIAT (categoría PyME) y el Premio Innovadores de América (categoría Empresa e industria), respectivamente. Es editor o coeditor de seis libros y ha publicado 90 trabajos de divulgación. Es autor del libro *El quehacer de la ciencia experimental* (2013), publicado por Siglo XXI Editores y la Academia de Ciencias de Morelos. Este libro ha sido traducido al portugués y fue publicado en Brasil en 2014. Es miembro regular de la Academia Mexicana de Ciencias; de la Academia

de Ingeniería de México y de la Academia de Ciencias de Morelos, de la que fue presidente; fue también presidente de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería A.C. Ha formado parte de varios comités de alto nivel, incluyendo la Comisión Dictaminadora del SNI en el área de Biotecnología y Ciencias Agropecuarias. Actualmente el Dr. Galindo es secretario de Vinculación del Instituto de Biotecnología de la UNAM y editor de *Biotecnología en Movimiento*, la revista de divulgación del IBt. La trayectoria del doctor Galindo ha sido reconocida con varios premios, destacando el Premio Nacional de Ciencias y Artes, en la categoría de Innovación, Tecnología y Diseño, otorgado por el Gobierno de la República (2015).

ADOLFO GRACIA GASCA

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México
gracia@unam.mx

Es licenciado en Biología, egresado de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, con maestría y doctorado en Ciencias (Biología) de la misma facultad. Es investigador titular C, PRIDE D, del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, profesor de posgrado y de licenciatura en la UNAM. Sus líneas de investigación son: ecología pesquera de crustáceos decápodos, aprovechamiento sustentable de recursos marinos, y ecología de comunidades bénticas. Cuenta con más de 100 publicaciones sobre ecología de poblaciones, evaluación y manejo de recursos pesqueros, ecología de comunidades bénticas, biología de crustáceos decápodos y monitoreo de contaminación por hidrocarburos en el ambiente marino (agua y sedimentos), incluyendo organismos (peces y crustáceos). Es

autor de seis libros sobre las características oceanográficas del sur del Golfo de México. Ha dirigido 25 tesis de licenciatura, 16 de maestría y seis de doctorado. Es investigador del Sistema Nacional de Investigadores, nivel II. Pertenece a la Academia Mexicana de Ciencias donde fue director del Programa de Ciencias Oceanográficas (2000–2003) y participa en varias sociedades científicas nacionales e internacionales. Fue asesor científico de la Cámara Nacional de la Industria Pesquera y Acuícola de México (1993–1999) y consultor del Texas Park and Wildlife, Texas, EUA, en el manejo del recurso camarón (2000). Ha sido miembro de la Junta de Gobierno del Instituto Nacional de la Pesca, SAGARPA en dos ocasiones (2002–2007 y 2015–2019). Fue jefe de departamento de Ecología Marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (1999), director del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM por dos periodos (1999–2007), y coordinador del Consejo Académico del Área de las Ciencias Biológicas, Químicas y de la Salud de la Universidad Nacional Autónoma de México (2008–2016). Ha sido receptor de diversos donativos para proyectos de investigación sobre ecología, dinámica y manejo de recursos pesqueros de México, oceanografía del Golfo de México y evaluación de contaminantes en el Golfo de México. Ha sido responsable de proyectos de investigación de monitoreo del ecosistema marino del suroeste del Golfo de México, desarrollados para PEP-PEMEX. Actualmente es responsable por parte de la UNAM de dos grandes proyectos en el Golfo de México, dirigidos a establecer la línea base del mar profundo del Golfo de México (CIGoM) y a realizar una comparación de los efectos y la resiliencia del ecosistema (C-IMAGE II) ante los dos derrames más grandes ocurridos en el Golfo de México (IXTOC I y

la plataforma Deepwater Horizon), con apoyos nacional e internacional, respectivamente.

LUIS RAFAEL HERRERA ESTRELLA

Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad
Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Irapuato
lherrera@langebio.cinvestav.mx

Se graduó como ingeniero bioquímico en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional; continuó con sus estudios de maestría en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del mismo instituto y en 1984 obtuvo el grado de doctor en Ciencias en el Departamento de Genética de la Universidad Estatal de Gante, en Bélgica. A partir de su regreso a México, el Dr. Herrera Estrella dedica parte de su programa de investigación básica al estudio de problemas relevantes para la agricultura de América Latina. Estudia los mecanismos moleculares de la acción de toxinas producidas por bacterias patógenas de plantas y logra desarrollar plantas transgénicas resistentes a la toxina producida por uno de los patógenos que causan mayores pérdidas en el cultivo del frijol. Usando la experiencia en biología molecular e ingeniería genética obtenida en los años anteriores, dirige a su grupo de trabajo a desarrollar la metodología para la transformación genética de tomatillo, papaya, maíz criollo y espárrago, especies vegetales de gran importancia en Latinoamérica. En los últimos años ha desarrollado varios proyectos de investigación, como el proyecto de secuenciación del genoma del maíz palomero, la secuenciación del genoma del aguacate y participó en la secuenciación del genoma del oso polar. Ha desarrollado plantas transgé-

nicas con nuevas características que las hacen más eficientes en el uso de fertilizantes, las cuales reducen hasta un 50% la cantidad de fertilizante fosforado que se utiliza en el cultivo de las plantas para tener una producción óptima. Recientemente creó la empresa StelaGenomics, dedicada al desarrollo de cultivos genéticamente modificados diseñados para disminuir el uso de fertilizantes y agroquímicos en la agricultura. La productividad científica total del Dr. Herrera Estrella se ve reflejada en más de 170 artículos de investigación publicados en revistas de prestigio internacional y 32 capítulos de libros que, de acuerdo con el ResearchGate y el Google Académico, han recibido más de 10,500 y 15,000 citas. Esta productividad es de destacarse porque más del 90% de los trabajos publicados por el Dr. Herrera Estrella han sido el producto de tesis de estudiantes de maestría o doctorado que se han formado bajo su dirección. El impacto del Dr. Herrera Estrella en el desarrollo tecnológico es igualmente trascendente y ha generado 12 patentes internacionales, hasta el momento. En cuanto a sus aportaciones al desarrollo de capacidades científicas, el Dr. Herrera Estrella funda el Departamento de Ingeniería Genética de la Unidad Irapuato del Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN. Este departamento ha sido uno de los más productivos en los últimos 25 años en América Latina y goza de reconocimiento internacional. En 1995, después de un estudio sobre las diferentes instituciones que desarrollaban biología molecular y biotecnología en países en desarrollo, la UNESCO reconoce al departamento fundado por el Dr. Herrera Estrella como uno de sus cinco centros de educación y entrenamiento en biotecnología. En 2005, el Dr. Herrera Estrella fue el líder y responsable del proyecto para la creación del

Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad, en Guanajuato, México. Este nuevo grupo, que rápidamente ha ganado reputación internacional, tiene una de las infraestructuras más destacadas en genómica de América Latina y cuenta con 20 grupos de investigación liderados por investigadores mexicanos, europeos y americanos. La labor como formador de recursos humanos de alto nivel se ve reflejada al haber dirigido 17 tesis de licenciatura, haber graduado a 18 maestros y 38 doctores en Ciencias. El Dr. Herrera Estrella ha sido distinguido con los siguientes premios y reconocimientos: el Premio Minuro y Ethel Tsutsui, un reconocimiento bianual que otorga la Academia de Ciencias de Nueva York a la mejor tesis de doctorado a nivel internacional; el Premio Javed Husain de la UNESCO, como el investigador joven más destacado en ciencias naturales; el Premio TWAS (The World Academy of Sciences) en Biología; el Premio de Investigación de la Academia Mexicana de Ciencias en Ciencias Naturales; el Premio Nacional de Ciencias y Artes, otorgado por el Gobierno de la República; además de haber sido elegido Miembro Extranjero de la National Academy of Sciences, EUA. Las aplicaciones generadas de su investigación básica le hicieron merecedor de la Medalla de Oro de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual como uno de los tres inventores más destacados de México.

INOCENCIO HIGUERA CIAPARA

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco
inohiguera@gmail.com

Nació en la ciudad de Guaymas, Sonora, en 1952. Doctorado en Ciencias Alimentarias por

la Universidad de Cornell, EUA. Investigador y director general del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., en Hermosillo, Sonora, de 1981 a 2002. En 2003 fue designado director adjunto de Desarrollo Regional en el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), y posteriormente, director adjunto de Desarrollo Científico y Académico, puesto que ocupó hasta enero de 2007. Miembro de las juntas directivas de diversas instituciones como El Colegio de Sonora, el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C., el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., y recientemente, del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE, Costa Rica). Fue director general del Centro de Investigación Científica de Yucatán de 2008 a 2013 y actualmente es director general del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Su trabajo de investigación ha estado enfocado al área de la ciencia y la tecnología de alimentos, desde el punto de vista de la inocuidad en toda la cadena agroalimentaria. Ha sido miembro del grupo de expertos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) para la evaluación de riesgos microbiológicos en alimentos, operaciones postcosecha de soya, así como en temas de innovación y adición de valor en la agroindustria. También ha realizado aportaciones relevantes al tema de los biopolímeros y sus aplicaciones a la medicina y al sector alimentario. La aportación científica del Dr. Higuera se resume en la producción de más de 110 artículos de investigación original publicados en revistas especializadas y memorias de circulación internacional con arbitraje, 20 capítulos de libro, siete libros en coedición, la dirección de 13 tesis

de posgrado —la mayoría de doctorado—, dos patentes nacionales otorgadas y cinco en trámite. Ha dictado 30 conferencias por invitación en México, Estados Unidos, España, Francia y Canadá. Ha realizado intervenciones ante la Cámara de Senadores en defensa de la ciencia y la tecnología, y ha recibido varias distinciones entre las que destacan el Premio Nacional en Tecnología de Alimentos, la presidencia de la Red Nacional de Inocuidad Alimentaria y la coordinación del primer Foro Internacional sobre Análisis de Riesgos Microbiológicos en Alimentos en México. Es miembro del Consejo Consultivo de la Incubadora de Empresas en Biotecnología en el Parque de Innovación e Investigación Tecnológica de Nuevo León y del Sistema Nacional de Investigadores desde 1987, nivel II, además de ser miembro *Ad Honorem* de diversas comisiones científicas.

FRANCISCO ALFONSO LARQUÉ SAAVEDRA

Centro de Investigación Científica de Yucatán
larque@cicy.mx

Es biólogo por la Facultad de Ciencias de la UNAM, maestro en Ciencias (Botánica agrícola) por el Colegio de Postgraduados y doctor por la Universidad de Londres, Reino Unido. Ha hecho estancias de investigación en las universidades de Stanford y de Texas, Estados Unidos, y en Cambridge, Lancaster y Essex, Reino Unido. Ha recibido becas del Consejo Británico, The Royal Society, Fulbright y el Conacyt, entre otras. Es investigador nacional emérito del Sistema Nacional de Investigadores y miembro titular de la Academia Mexicana de Ciencias. Es miembro del Consejo Consultivo de Ciencias desde el año 2000, doctor *Honoris Causa* del Colegio de Postgraduados en Ciencias

Agrícolas (2015), e investigador del Centro de Investigación Científica de Yucatán. Ha publicado más de 130 artículos científicos, 23 capítulos en libros, y ha editado y compilado 19 libros. Ha graduado a más de 100 estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado. Cuenta además con tres patentes, tres títulos de registro de marca y cuatro desarrollos tecnológicos en el campo de bioproduktividad, transferidos al sector social. Ha escrito cerca de 100 artículos de divulgación de la ciencia en los que ha enfatizado la descentralización de la ciencia en México, los laboratorios naturales para la ciencia, proyectos bandera para la ciencia, entre otros. Es fisiólogo vegetal, pionero a nivel mundial del estudio de la aspirina en plantas. Su trabajo es un ejemplo dentro de las ciencias agrícolas de cómo la ciencia básica pasa del laboratorio a la publicación científica, de ésta a la patente, y de ésta al uso comercial. De hecho, Larqué logró registrar las primeras dos patentes en el sector agrícola de nuestro país por investigaciones realizadas en México. Ha participado en desarrollos tecnológicos que han recibido reconocimientos por su trascendencia en la producción de alimentos que integran el uso de la biotecnología, y en la fisiología vegetal en beneficio del desarrollo rural por sus trabajos con plantas como el maíz, henequén y con los hongos comestibles. En años recientes (2010–2017) ha estado impulsando la iniciativa de incorporar el sector forestal a la cruzada contra el hambre y el cambio climático como producto de los resultados de su investigación con el árbol *Brosimum alicastrum*, especie con altísima bioproduktividad, con la cual plantea cómo la biodiversidad puede ser una alternativa viable para reducir la pobreza extrema y contribuir al bienestar social, reduciendo significativamente la importación de granos que actualmente reba-

sa las 4,000 toneladas diarias. En 2016 publicó el artículo por invitación “Biotecnología prehispánica en Mesoamérica”, que es una contribución original que agrupa a diferentes tecnologías prehispánicas en un nodo que los expertos no sólo del área biológica sino de las áreas de humanidades están interesados en validar. En 2016 estableció el museo vivo sobre las plantas de los libros sagrados de los mayas, en el Banco de Germoplasma que coordina. El Dr. Larqué fue director del Centro de Botánica, director académico y secretario general del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas y director general del Centro de Investigación Científica de Yucatán. En su calidad de director fundador, durante cinco años impulsó el establecimiento del Parque Científico Tecnológico de Yucatán (2009–2014). Es asesor del Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico de Yucatán (SIIDETEX) y coordinador del Banco de Germoplasma y del Jardín Botánico Ornamental del Centro de Investigación Científica de Yucatán del citado parque. Recibió el Premio Nacional de Ciencias y Artes, otorgado por el Gobierno de la República (2000), el Premio Nacional al Mérito en Ciencia y Tecnología de Alimentos (1988), el Premio Nacional de Investigación en Alimentos (1987), el Premio en Ciencia y Tecnología de Alimentos (1992), la Presea Estado de México (1987), el Premio Centeotl de las Fundaciones Produce del país (2009), el Premio TWAS (The World Academy of Sciences) en Ciencias Agrícolas (2010) y el Premio a la Seguridad Alimentaria y la Sustentabilidad, otorgado por el CIMMYT y Cargill México (2017). Asimismo, ha recibido el reconocimiento del mérito municipal de su natal Texcoco, entre otros.

AGUSTÍN LÓPEZ-MUNGUÍA CANALES

Instituto de Biotecnología
 Universidad Nacional Autónoma de México
 agustin@ibt.unam.mx

Es ingeniero químico por la UNAM (1974), maestro en Bioingeniería por la Universidad de Birmingham, Reino Unido (1974–1975), y doctor por el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Toulouse, Francia, grado con el que regresó a México en 1980 para incorporarse como profesor a la Facultad de Química de la UNAM. Permaneció en el Departamento de Alimentos durante el periodo 1980–1989, año en el que es invitado a formar un grupo de investigación en tecnología enzimática en el entonces Centro de Investigación sobre Ingeniería Genética y Biotecnología, hoy Instituto de Biotecnología de la UNAM, en el que actualmente realiza investigación, ocupando la categoría de investigador titular C de tiempo completo. Es además miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel III, en el área Químico-biológica. Es miembro de diversas sociedades científicas, como la Academia Mexicana de Ciencias (miembro titular), la Academia de Ciencias de Morelos, la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería (miembro fundador), la Sociedad Mexicana de Bioquímica, la Sociedad Mexicana de Divulgación de la Ciencia, la American Chemical Society y el Institute of Food Scientists. Ha logrado consolidarse como investigador en el área de la biotecnología industrial, en particular en aspectos relacionados con procesos de producción y aplicación de enzimas en el sector alimentario y farmacéutico. Por su originalidad y trascendencia industrial, destaca el desarrollo de procesos de extracción de productos naturales mediante tecnologías biológicas. También, sus trabajos se han dirigido a la búsqueda de enzi-

mas con capacidad de sintetizar carbohidratos de interés alimentario y farmacéutico. Ambas líneas han dado lugar a publicaciones, patentes nacionales e internacionales y a convenios de desarrollo tecnológico con la industria. En particular, los trabajos realizados sobre aplicación de enzimas en la industria de la tortilla, la industria azucarera y la de colorantes son importantes por su repercusión en el contexto nacional. Desarrolló un proceso enzimático para la industria tequilera y trabaja en la síntesis de inulina, un proyecto atractivo desde la perspectiva industrial. Fue secretario académico del Instituto de Biotecnología de la UNAM de 1997 a 2000 y de 2003 a 2011. Con respecto a su labor docente y de formación de recursos humanos, ha dirigido 39 tesis de licenciatura, 31 de maestría y 10 de doctorado. Ha impartido más de 70 cursos cortos a nivel nacional e internacional. Desde 1980 y hasta la fecha imparte semestralmente un curso optativo en la licenciatura de Química de Alimentos, en la Facultad de Química de la UNAM, y participa además en el posgrado en Ciencias Bioquímicas que ofrece el Instituto de Biotecnología de la UNAM. Ha presentado trabajos en más de un centenar de congresos nacionales e internacionales, además de haber impartido más de 300 conferencias, una buena parte de ellas en plenarias, así como en escuelas y eventos de divulgación de la ciencia como el programa Domingos en la Ciencia, de la AMC, o la Semana de la Ciencia y la Tecnología. Cuenta con cerca de una docena de patentes nacionales e internacionales, y con más de 60 presentaciones en congresos. Ha publicado más de 125 artículos de investigación en revistas arbitradas nacionales e internacionales y 12 capítulos en libros que lo ubican con un Factor H de 23 con 1,700 citas. Tiene una intensa actividad en materia de divulgación científica. Es editor y autor del

libro *Biotecnología alimentaria*, de Editorial Limusa (1993), y de los libros de divulgación *Alimentos: del tianguis al supermercado* (1995) y *Alimentos transgénicos* (2001), ambos dentro de la colección Viaje al Centro de la Ciencia, de ADN Editores y el Conaculta, así como de *La biotecnología* (2000), dentro de la colección Tercer Milenio, también del Conaculta. Por su trayectoria, ha recibido diversas distinciones, entre ellas el Premio Nacional de Ciencias y Artes que otorga el Gobierno de República (2003); el Premio Universidad Nacional en investigación en innovación tecnológica y diseño industrial que otorga la UNAM (2000); el Premio de Investigación Científica en el área de Investigación Tecnológica que otorga la AMC (1990); y el Premio Nacional en Ciencia y Tecnología de Alimentos del Conacyt (1992).

OCTAVIO TONATIUH RAMÍREZ REIVICH

Instituto de Biotecnología
 Universidad Nacional Autónoma de México
 tonatiuh@ibt.unam.mx

Es ingeniero químico por la UNAM, donde se graduó con mención honorífica en 1985. Obtuvo la maestría (1987) y el doctorado en Ingeniería Química y Bioquímica (1990) en la Universidad de Drexel (Filadelfia, EUA). En 1984 inicia su carrera profesional en la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal y en 1990 comienza su carrera como investigador en el Instituto de Biotecnología de la UNAM, donde ocupó las jefaturas del Departamento de Bioingeniería y del Departamento de Medicina Molecular y Bioprocesos, y posteriormente su dirección, de marzo 2013 a la fecha. Actualmente es investigador titular C, PRIDE D y desde 1999 tiene el nivel III del Sistema Nacional de Investigadores. El campo de especialización del Dr. Ramírez

es la ingeniería bioquímica, siendo pionero en México en estudios de bioingeniería del cultivo de células de eucariotes superiores, particularmente células de mamíferos e insectos. Trabaja en fragilidad celular, diseño de biorreactores e integración de bioprocesos, glicosilación de proteínas recombinantes y ensamblaje de partículas pseudo-virales con aplicaciones en vacunas, terapia génica y nanobiotecnología. Inició en México la aplicación de métodos computacionales modernos para control de bioprocesos, entre los que destacan el cultivo de células animales y fermentaciones con microorganismos recombinantes. En el área de escalamiento descendente, ha realizado un trabajo sobresaliente estudiando la respuesta celular y molecular a gradientes ambientales presentes en reactores industriales, sentando la base para el diseño de nuevas cepas y líneas celulares para contender con estos problemas. Adicionalmente, su labor ha trascendido de forma significativa al campo aplicado a través de una estrecha vinculación con más de una veintena de empresas y organizaciones tanto nacionales como extranjeras, con las que ha contribuido a establecer hitos nacionales en la producción y caracterización de proteínas recombinantes terapéuticas y profilácticas, tanto de uso humano como veterinario, cerrando así círculos virtuosos entre el trabajo académico y el bienestar social. Las investigaciones del Dr. Ramírez han resultado en 96 publicaciones internacionales en revistas con arbitraje, 15 capítulos en libros o enciclopedias internacionales y 37 contribuciones *in extenso* en memorias internacionales, artículos o capítulos de libros nacionales. Además, ha editado dos libros internacionales. Sus trabajos han recibido más de 1,700 citas ajenas y tiene un índice h de 23, de acuerdo con Scopus, y 3,376 citas e índice h de

36, de acuerdo con Google Académico. Cuenta también con cuatro patentes otorgadas y dos depositadas. Ha participado en el desarrollo de cinco tecnologías desarrolladas en la UNAM y transferidas al sector empresarial, así como múltiples desarrollos tecnológicos y la creación de empresas de base tecnológica. Ha titulado a 10 alumnos de doctorado, 26 de maestría y nueve de licenciatura. Entre los reconocimientos más importantes, Ramírez ha recibido el Premio Universidad Nacional, el Premio de Investigación de la Academia Mexicana de Ciencias, la distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos, el Premio Sigma Xi y el Premio al Mérito Académico (en dos ocasiones), otorgado por la Universidad de Drexel, EUA, así como el Premio Carlos Casas Campillo, sólo por mencionar algunos. Además, es miembro del grupo ganador del Premio Nacional de Tecnología, 1999, y del Premio ADIAT a la Innovación Tecnológica, 2005, ambos en colaboración con una de las empresas con las que se ha vinculado. Es miembro del Comité Editorial de varias revistas científicas extranjeras, entre ellas, *Biotechnology and Bioengineering*, la más importante en el campo de la bioingeniería. Es editor asociado del *Biochemical Engineering Journal* y árbitro de más de un centenar de artículos en más de una treintena de revistas científicas diferentes. Ha sido miembro de múltiples cuerpos colegiados y comisiones evaluadoras *ad hoc*, tanto nacionales como internacionales, por ejemplo, del Foro Consultivo Científico y Tecnológico, y de la Comisión Dictaminadora del Centro de Energía de la UNAM. Fue secretario nacional de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, presidente del Cell Culture Engineering (EUA), miembro del Comité de Biotecnología de la AMC y del Comité de Productos Biotecnológi-

cos de la Farmacopea Mexicana, entre otros. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y de la Academia de Ciencias de Morelos.

SERGIO REVAH MOISEEV

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Cuajimalpa
srevah@correo.cua.uam.mx

Es profesor investigador titular C de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Unidad Cuajimalpa. En el periodo 2009–2013 fue director de la División de Ciencias Naturales e Ingeniería, y en 2005–2009 fundó y dirigió por cuatro años el Departamento de Procesos y Tecnología. Hasta septiembre de 2005, perteneció al Área de Ingeniería Química del Departamento de Procesos e Hidráulica de la UAM-Iztapalapa. Es ingeniero químico por la UNAM (1976), maestro en Ciencias en Tecnología de Alimentos por la Universidad de California-Davis (1978) y doctor en Bioprocesos por la Universidad de Tecnología de Compiègne, Francia (1986). Inició su carrera académica en la UAM, trabajando inicialmente con proyectos en procesos biotecnológicos en alimentos y posteriormente en aplicaciones al mejoramiento ambiental. En el campo del control de contaminación por procesos biotecnológicos, el laboratorio del Dr. Revah es reconocido mundialmente y ha sido el lugar en donde se han formado numerosos profesionales de varias nacionalidades a nivel licenciatura y posgrado. Como resumen de los logros del Dr. Revah está el haber dirigido cinco tesis de licenciatura, 40 de maestría y 20 de doctorado. Además, ha participado en más de 250 presentaciones en congresos y reuniones académicas. Tiene varias patentes y ha publicado más de 125 artículos en revistas arbitradas internacionales, 15 en revistas nacionales,

20 capítulos de libro y siete artículos de difusión. Ha sido profesor invitado en universidades de Francia, Canadá, España, Estados Unidos, Chile y Colombia. Ha participado en los comités científicos de los principales congresos de su campo; ha organizado tres eventos internacionales a la fecha, participa en varios comités editoriales y ha revisado artículos para las principales revistas de ciencia. Para apoyar su investigación ha logrado el apoyo de instituciones académicas nacionales, como el Conacyt, el Instituto Mexicano del Petróleo, el Instituto Nacional de Ecología y el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Ciudad de México; e internacionales, como la AIEA, la OEA, la UE, la AECDI (España), y el Conicyt (Chile), entre otros. Ha participado en numerosos comités de apoyo académico como de evaluación del SNI, el de proyectos y cátedras en el Conacyt y, a nivel internacional, formó parte del Consejo Científico del IRD de Francia por cuatro años. En aspectos de vinculación ha realizado proyectos con empresas nacionales e internacionales. Además ha participado en la formación de dos exitosas compañías de base tecnológica. Ha obtenido diversos reconocimientos, como ser miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel III, desde 1996, y haber recibido el Premio Ciba-Geigy en Tecnologías Ambientales, el Premio en Ciencia y Tecnología Manuel Noriega Morales de la Organización de Estados Americanos, y el Premio Nacional de Ciencias y Artes 2010 en el campo de la tecnología, otorgado por el Gobierno de la República. Es profesor distinguido de la UAM (2015) y recientemente recibió la Medalla al Mérito en Ciencias y Artes en Biotecnología que otorga la Asamblea Legislativa de la Ciudad de México (2016). Es miembro titular de la Academia Mexicana de Ciencias y pertenece al Consejo Consultivo de Ciencias.

XAVIER SOBERÓN MAINERO

Instituto de Biotecnología
Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto Nacional de Medicina Genómica
Secretaría de Salud
soberon@ibt.unam.mx

Nació en la Ciudad de México en 1955. Tiene un doctorado en Investigación Biomédica por la Universidad Nacional Autónoma de México y es químico por la Universidad Iberoamericana. Desde 1981 es investigador del Instituto de Biotecnología de la UNAM, en donde además participó en la instalación y consolidación de la ingeniería genética y la biotecnología. Realizó estancias de investigación en el City of Hope Medical Center de Los Angeles, así como en la Universidad de California de San Francisco y de San Diego, en Estado Unidos. Su investigación se ha centrado en la síntesis química del ADN y sus aplicaciones en el estudio de las proteínas y en la biocatálisis, así como en el desarrollo de biofármacos y vacunas; recientemente su investigación se ha dirigido al estudio de la diversidad genómica en poblaciones mexicanas y su aplicación a la salud. Cuenta con tres patentes que cubren aplicaciones del ADN sintético en el desarrollo de nuevos biocatalizadores, así como la ingeniería metabólica. Coordinó la instalación, el desarrollo y la operación de las unidades de síntesis y secuenciación de macromoléculas y la de cómputo del Instituto de Biotecnología de la UNAM. Ha publicado cerca de 80 trabajos de investigación original y de análisis y divulgación científica en revistas de circulación internacional. Ha sido profesor en los programas de maestría y doctorado en Ciencias Biomédicas y en Ciencias Bioquímicas de la UNAM, además de haber dirigido cerca de 30

tesis de licenciatura y posgrado. Contribuyó a crear la licenciatura en Ciencias Genómicas de la UNAM, donde también es profesor. Fue director del Instituto de Biotecnología de la UNAM durante dos cuatrienios (1997 y 2005). Fue presidente de la Academia de Ciencias de Morelos en el periodo 2004–2006 y director del Sistema Nacional de Investigadores de 2008 a 2009. Entre las distinciones que le han sido otorgadas destacan el Premio Nacional de Química (1999), el reconocimiento como Investigador Nacional nivel III, el reconocimiento como Investigador en Ciencias Médicas categoría F del Sistema de Investigadores de la Secretaría de Salud. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y de la Academia Nacional de Medicina. En 2017 fue nombrado miembro de la Junta de Gobierno del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias “Ismael Cosío Villegas”. Actualmente es director general del Instituto Nacional de Medicina Genómica de la Secretaría de Salud y desde el año 2013 fue nombrado miembro de la Junta de Gobierno de la UNAM.

IRINEO TORRES PACHECO

Universidad Autónoma de Querétaro
torresirineo@gmail.com

Es ingeniero agrónomo especialista en fitomejoramiento, egresado de la Facultad de Agrobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Maestro en Ciencias en Biología y doctor en Ciencias en Biotecnología, por el Departamento de Ingeniería Genética del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav). Ha realizado estancias de investigación en la Universidad de Arizona, EUA, en la Universidad Católica de Chile, en la Universidad de Almería, España, y en el Kibutz de Shefayim, en

Israel. Ha publicado más de 70 artículos científicos indizados en temas como agricultura, bioquímica, genética, inmunología, microbiología, medicina, computación, bioelectrónica y química, en 39 diferentes revistas científicas de diversas partes del mundo. Ha publicado cuatro libros y 14 capítulos en libros sobre biotecnología, aflatoxinas e ingeniería de biosistemas. Fue profesor en la Facultad de Agrobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Es profesor invitado en la Facultad de Estudios Superiores de Iztacala y en la Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán de la Universidad Nacional Autónoma de México. También ha sido profesor en el Instituto Tecnológico Nacional en el plantel Agropecuario de Morelia y en el Tecnológico de Celaya. Fue investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en donde además se desempeñó como coordinador nacional de Investigación en Hortalizas, coordinador nacional de Investigación en Biotecnología y director general de la Región Centro. Fue miembro y coordinador del Comité de Agricultura y Biotecnología del Sistema Nacional de Evaluación Científica y Tecnológica del Conacyt. Fue miembro fundador y coordinador del Consejo Consultivo del organismo federal denominado Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (CibioGem). Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores, nivel II, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Es profesor investigador y coordinador del cuerpo académico de Ingeniería de Biosistemas en la de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), en donde también fue director de Investigación y Posgrado, y actualmente es el secretario académico y secretario del Consejo Universitario.

JAIME MIGUEL URIBE DE LA MORA

Probiomed S.A. de C.V.

jaime.uribe@probiomed.com.mx

1962–1968. Ingeniero químico y maestro en Economía por la Universidad Iberoamericana.

1962–1970. Inicia su carrera como auxiliar de laboratorios de control en Ingeniería Química Mexicana S.A. Posteriormente, se desempeña como representante de ventas en Christianson S.A. de C.V., analista químico de control de calidad en la fábrica de papel Loreto y Peña Pobre, ingeniero de proceso y ventas industriales en Kimberly Clark, subgerente en Manufacturera Aztlán y Mercadotecnia Industrial S.A. de C.V., y director general en Plastifin S.A.

1970. Socio fundador, junto con otro mexicano y tres empresarios extranjeros, de Productos Químicos Finos (Proquifin S.A. de C.V.), actual propietaria de Probiomed, que inició con la fabricación de ingredientes farmacéuticos activos por síntesis química y procesos biológicos estando a cargo de la jefatura de producción.

1972. Toma la dirección general de la empresa y, aprovechando los programas de fomento industrial del gobierno, busca la integración de las cadenas productivas mediante alianzas con la academia y centros de investigación en México y en el extranjero. Al mismo tiempo, inicia el desarrollo para la fabricación de ingredientes farmacéuticos activos por procesos biológicos, como la gonadotropina coriónica, a partir de orina de mujeres embarazadas, y la heparina, a partir de la mucosa intestinal de cerdo, construyendo una nueva planta en Tenancingo, Estado de México, región que había sido designada como única área de prioridad estatal por el gobierno de esa entidad.

1975. Bajo su dirección, Proquifin se convierte

en la primera empresa que cumple al 100% con los programas de integración nacional, sustitución eficiente de importaciones, exportaciones y descentralización.

1980. Proquifin se consolida en la fabricación de ingredientes farmacéuticos activos, llevando toda su producción a Tenancingo, fuera de la Ciudad de México, y sus exportaciones se incrementan sustancialmente.

Con la apertura comercial y la competencia cada vez más agresiva de productos provenientes principalmente de China, India y Corea, entre 1986 y 1989, toma la decisión de llevar a cabo una estrategia de integración vertical, adquiriendo los laboratorios farmacéuticos Chemia, Helber, Galen y Proquigama, para comercializar ya no sólo ingredientes farmacéuticos activos, sino también medicamento producto terminado. En este periodo fue vicepresidente y director general de Helber de México, Laboratorios Chemia, Laboratorios Galen y Proquigama, que posteriormente se fusionarían con Probiomed, quedando Proquifin como empresa *holding*.

1989. Decide centrarse en el desarrollo de productos biofarmacéuticos utilizando tecnologías de ADN recombinante.

1994. Funda Probiomed, la primer empresa de biotecnología en México. Incrementa las inversiones en investigación y desarrollo, y realiza alianzas estratégicas en México con el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma de Nuevo León, y con empresas y centros de investigación en el extranjero.

1998. Lleva a Probiomed a iniciar la comercialización de medicamentos biotec-

nológicos fabricados en su totalidad en México, logrando tener el porcentaje de integración nacional y el valor agregado manufacturero más alto, no sólo de la industria farmacéutica, sino de toda la industria en el país.

1999. Recibe, para Probiomed, el Premio Nacional de Tecnología e Innovación, otorgado por primera vez en México, de manos del presidente Ernesto Zedillo.

2004. Recibe, para Probiomed, el reconocimiento de Canifarma por ser la empresa que mayor investigación básica realiza en nuestro país.

2006. Recibe, para Probiomed, el Premio ADIAT a la Innovación Tecnológica.

Fue presidente de la Asociación Nacional de Fabricantes de Medicamentos A.C. (Anafam, 2008–2009), de la que desde el término de su periodo hasta la fecha es invitado permanente, y de la Cámara Nacional de la Industria Farmacéutica (Canifarme, 2009–2010).

2012–2015. Es nombrado uno de los 300 líderes más influyentes de México por la revista *Líderes Mexicanos*.

Actualmente es presidente de Probiomed, Proquifin y de la Fundación Probiomed, así como patrono de la Fundación Carlos F. Uribe Hidalgo. Probiomed es hoy la única biofarmacéutica en el país que desarrolla sus productos desde el gen hasta el medicamento y cuenta con 16 registros de biotecnológicos en el mercado más cinco en desarrollo para el tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas de gran impacto y carga social como cáncer, insuficiencia renal crónica, artritis reumatoide, esclerosis múltiple y diabetes. La empresa exporta a 14 países en cuatro continentes, tiene tres plantas de manufactura, más de 900 colaboradores y genera empleos de alta especialización, contribuyendo al crecimiento de la ciencia y la tecnología, factor crítico para la competitividad de México.

JORGE MANUEL VÁZQUEZ RAMOS

Facultad de Química

Universidad Nacional Autónoma de México

jorman@unam.mx

Nacido en la Ciudad de México en 1953. Egresado de la licenciatura de Químico Farmacéutico Biólogo, obtiene el grado de licenciado en 1976, recibiendo mención honorífica y el diploma y la medalla Belisario Domínguez, estos últimos otorgados por el Gobierno de la República a los mejores estudiantes a nivel licenciatura; posteriormente realiza estudios de doctorado en la Universidad de Oxford, Reino Unido, en donde obtiene el grado de doctor en Bioquímica Microbiana en 1981. Es profesor titular C de tiempo completo de la Facultad de Química de la UNAM, con categoría de prima de desempeño (PRIDE) nivel D (máximo nivel) desde 1993. Recibió el reconocimiento de Catedrático Universitario nivel 2 (máximo nivel) por la UNAM. En la Facultad de Química ha sido miembro del Comité de la Carrera de Químico Farmacéutico Biólogo y jefe del Departamento de Bioquímica, coordinador del posgrado en Ciencias Químicas (Bioquímica), miembro del Consejo Técnico, secretario académico de Investigación y Posgrado y actualmente es director de la Facultad de Química. Ha sido miembro de las comisiones dictaminadoras de la Facultad de Veterinaria, de la Escuela Nacional de Enfermería y Obstetricia y del Instituto de Fisiología Celular de la UNAM; fue miembro del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Bioquímicas y coordinador del Posgrado en Ciencias Bioquímicas de la UNAM, nombrado por el rector. Miembro titular del Comité Académico de Área de las Ciencias Biológicas, Químicas y de la Salud (CAACBQYS), miembro designado (por CAACBQYS) del Comité

Académico del Bachillerato, miembro del Colegio Académico para la Reforma del Reglamento General de Estudios de Posgrado, representante del rector de la UNAM ante el Consejo Directivo del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., de Hermosillo, Sonora. En la Facultad de Química ha impartido las siguientes materias a nivel licenciatura: Laboratorio de Microbiología General, Teoría de Fisiología y Bioquímica de Microorganismos, de Bioquímica III (Seminario de Bioquímica), de Bioquímica I, de Genética y Biología Molecular. En el posgrado: Biología Molecular y Seminario de Investigación y Bibliografía (anuales) y cualquiera de los siguientes tópicos (semestral): Temas Selectos de Biología Molecular, Temas Selectos de Bioquímica Vegetal, Bioquímica de la Germinación de Maíz, Biología Molecular del Ciclo Celular, o Ciclo Celular y Apoptosis. Fuera de la UNAM impartió cursos de biología molecular, microbiología y genética molecular, en la UAM Iztapalapa a nivel licenciatura, y genética de procariotes a nivel posgrado. Cursos en la maestría en Biología Molecular del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), así como bioquímica de la germinación de semillas y ciclo celular y su regulación, en la maestría del Instituto de Investigación Químico-Biológica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Ha publicado 59 artículos originales, siete capítulos en libros y memorias en extenso, 15 artículos de difusión y ha editado dos libros. Ha graduado a 42 estudiantes de licenciatura, 27 de maestría y 10 de doctorado. Ha dirigido el trabajo de cinco posdoctorados asociados a su grupo. Ha impartido más de 60 conferencias en congresos y reuniones científicas nacionales e internacionales, y ha presentado más de 150 trabajos en congresos académicos nacionales e internacionales. Recibió

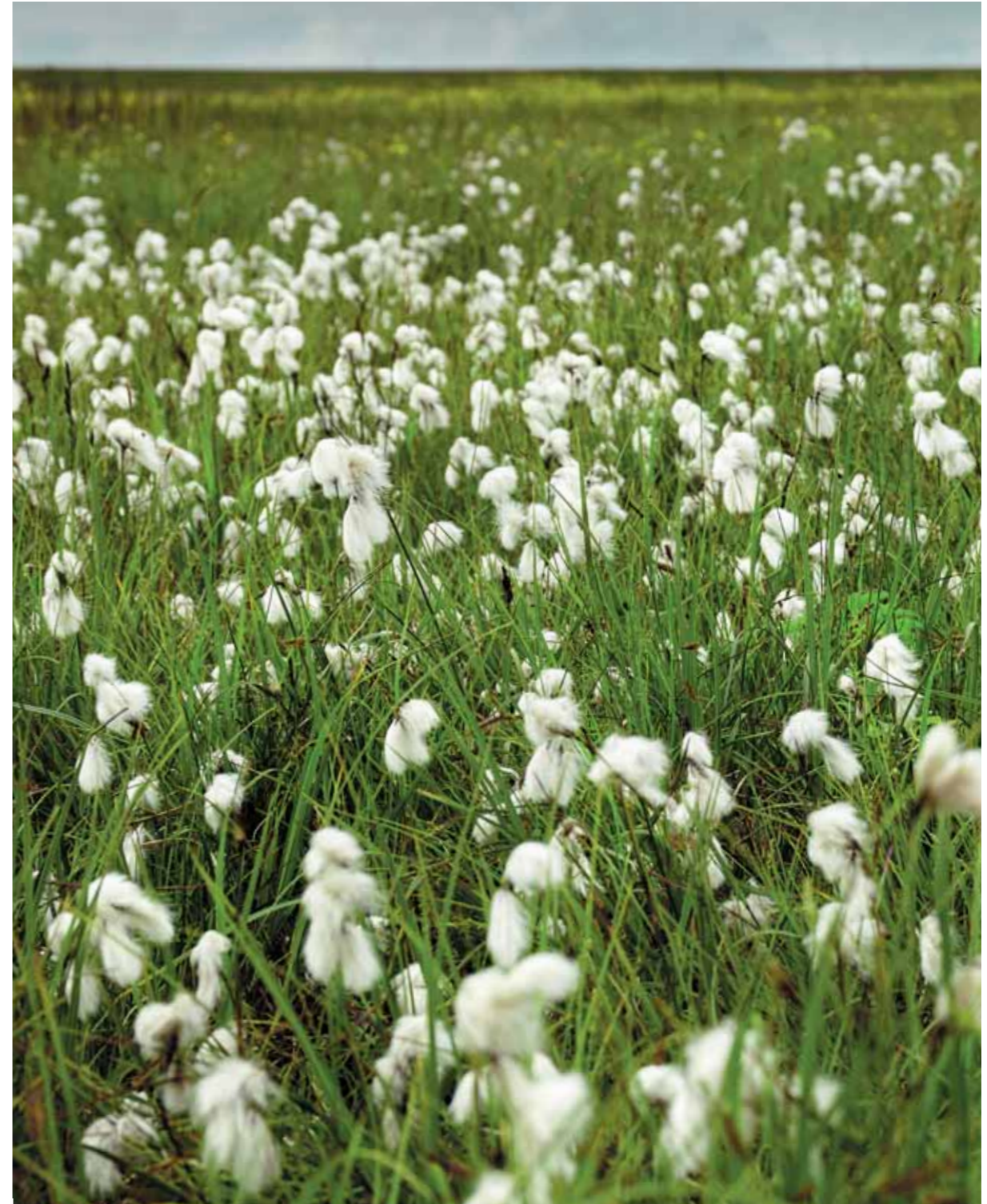
el primer lugar del Premio PUAL, categoría Investigación, otorgado por el Programa Universitario de Alimentos, de la UNAM. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel III (máximo nivel) desde 1999. Ha sido árbitro de las revistas científicas *Agrociencia* (México), *Revista de la Sociedad Química de México*, *Seed Science Research* (Reino Unido), *Plant Physiology and Biochemistry* (Francia), *Physiologia Plantarum* (Suecia), *Plant Molecular Biology* (Holanda), *Planta* (Alemania), *Journal of Experimental Botany* (Reino Unido), *Biochemistry and Biophysics Acta* (Holanda). Además, es editor de la revista *Fitotecnica Mexicana*. Ha sido miembro de comisiones evaluadoras de proyectos en el Conacyt; también ha arbitrado proyectos de investigación para el Concyt, Argentina, para el Centro Nacional de Investigación Científica de España, y para el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). Ha sido miembro del Consejo Directivo y miembro de la Comisión Dictaminadora del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), miembro de las Comisión Evaluadora del Área VI del Sistema Nacional de Investigadores, presidente de la Comisión Dictaminadora del Área VI del SNI, miembro del Consejo Consultivo del SNI, miembro del Comité de Admisión de la Sociedad Mexicana de Bioquímica, miembro de la Comisión Dictaminadora del Programa de Mejoramiento del Profesorado, PROMEP-SEP. Fue vicepresidente y posteriormente presidente de la Sociedad Mexicana de Bioquímica. Su línea de investigación es la regulación del ciclo celular en procesos de desarrollo en plantas, con especial énfasis en las proteínas ciclinas y cinasas dependientes de ciclinas.

GUSTAVO VINIEGRA GONZÁLEZ

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Iztapalapa
vini@xanum.uam.mx

Médico cirujano por la Universidad Nacional Autónoma de México (1965). En 1967 obtuvo el grado de maestro en Ciencias (Bioquímica) por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (1967). Doctorado en Biofísica en la Universidad de California, en San Francisco (1971) y estudiante posdoctorado en la Universidad de Pennsylvania (1972). En 1972, como investigador titular A, crea el Departamento de Biotecnología del Instituto de Investigaciones Biomédicas en la UNAM. Desde 1977, es profesor titular C de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Desde 2008, consultor científico de Incubaempresas A.C. De 1967 a 1971, desarrolló en la Universidad de California, en San Francisco, el análisis matemático de la estabilidad de los circuitos bioquímicos retroalimentados. De 1972 a 1976, en la UNAM organizó y supervisó el grupo que registró el primer invento biotecnológico (el

proceso Biofermel), licenciado comercialmente por una universidad mexicana. De 1972 a 1976 coordinó y organizó el grupo franco mexicano (ORSTOM/IRD-UAM) que sentó las bases científicas para el escalamiento de los cultivos microbianos sobre soportes sólidos. Según Web of Science, sus 95 trabajos especializados han merecido más de 2,080 citas con un índice h de 29. Ha contribuido a la formación de más de 10 investigadores biotecnológicos independientes. Ha recibido numerosas distinciones: de 1982 a 1990, fue miembro de la Junta Directiva de la UAM; en 1985 recibió el Premio Nacional al Mérito en Ciencia y Tecnología de los Alimentos y fue admitido en la Academia Mexicana de Ciencias. En 1995 también fue nombrado profesor distinguido por acuerdo del Colegio Académico de la UAM. En 2001, doctor *Honoris Causa* de la Universidad Aix-en-Provence (Marsella, Francia). En 2002, investigador nacional emérito; representante del Área de Ingeniería y Tecnología del Foro Consultivo de Ciencia y Tecnología, y se le otorgó la Orden de las Palmas Académicas de Francia. En noviembre de 2013 fue nombrado profesor emérito de la UAM.





Transgénicos: grandes beneficios, ausencia de daños y mitos
se terminó de imprimir en Offset Rebosán SA de CV en julio de 2017.
La edición consta de 1,000 ejemplares.

ISBN 978-607-8379-28-6



Instituto de Biotecnología
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



El Colegio Nacional