
CULTIVOS TRANSGÉNICOS: ENTRE LOS RIESGOS BIOLÓGICOS Y LOS BENEFICIOS AMBIENTALES Y ECONÓMICOS

Gm Crops: Between Biological Risk and Environmental and Economics Benefits

ALEJANDRO CHAPARRO GIRALDO¹, Ph. D.

¹Profesor Asociado. Director del Grupo de Ingeniería Genética de Plantas, Departamento de Biología e Instituto de Genética, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá achaparrog@bt.unal.edu.co

Presentado 3 de marzo de 2011, aceptado 18 de mayo de 2011, correcciones 1 de julio de 2011.

RESUMEN

Los cultivos transgénicos, biotecnológicos o genéticamente modificados (GM) son el resultado de la aplicación de la tecnología del ADN recombinante en agricultura. Este tipo de organismos se constituyen con la transferencia de genes foráneos (transgenes) de cualquier origen biológico (animal, vegetal, microbiano, viral) al genoma de especies cultivadas de plantas. Los cultivos GM se utilizan en el mundo desde 1996 y en diciembre de 2010 se llegó a mil millones de hectáreas, sembradas en todo el periodo. En solo el pasado año 2010 se sembraron 148 millones de hectáreas, cultivadas por 15,4 millones de agricultores en 29 países. Los cultivos GM que se usan en agricultura global son principalmente soya, algodón, maíz y colza, que expresan transgenes derivados de bacteria y que confieren resistencia a insectos lepidópteros (RIL) o, tolerancia a algunos herbicidas (TH) como glifosato y glufosinato de amonio. Las primeras variedades transgénicas contenían solo un transgen de interés, o evento simple, mientras que las variedades actuales expresan varios transgenes, o eventos apilados, que en algunos casos confieren resistencia a diferentes especies de insectos lepidópteros y coleópteros, así como tolerancia a dos tipos diferentes de herbicidas. Para el año 2009 se sembraron en Colombia, 18.874 hectáreas de cultivos GM de algodón, 16.793 hectáreas de cultivos GM de maíz, y cerca de cuatro hectáreas de cultivos GM de clavel y rosas. Maíz y algodón se sembraron en los departamentos de Sucre, Cesar, Córdoba, Huila y Tolima. Solo maíz en los departamentos de Antioquia, Valle del Cauca, Meta, Cundinamarca y Santander, y clavel y rosas en el departamento de Cundinamarca. Las variedades transgénicas de maíz y algodón, expresan características RIL y TH, como eventos simples o como eventos apilados. En el caso de clavel y rosa, se trata de genotipos que expresan color azul. Desde la academia se ha tratado de organizar el debate sobre la adopción de los cultivos GM, alrededor del análisis ponderado de los riesgos biológicos y beneficios ambientales y económicos. Los riesgos biológicos se definen por los posibles efectos negativos sobre consumidor humano o ambiente en que se liberan. Los beneficios ambientales tienen que ver con los efectos de la reducción en el uso de agroquímicos (insecticidas y herbicidas), y beneficios económicos con la reducción en las pérdidas debidas al ataque de insectos y a la competencia de malezas, así como a la reducción de costos de producción.

Palabras clave: cultivos transgénicos, riesgos biológicos, beneficios ambientales, beneficios económicos.

ABSTRACT

The transgenic crops were the result of the application of recombinant DNA technology in agriculture. These crops were developed by transfer of foreign genes (transgenes) from any biological origin (animal, plant, microbial, viral) to the genome of cultivated species of plants. The crops genetically modified (GM) have been used in the world since 1996; up to December 2010 they counted to a billion hectares planted throughout the period. In just the past year 2010 148 million hectares were planted, grown by 15.4 million farmers in 29 countries. GM crops that are used in global agriculture are mainly soybean, cotton, corn and canola, which express transgenes derived from bacteria, and confer resistance to lepidopteran insects (ILR) or herbicide tolerance (HT; glyphosate and glufosinate ammonium). The first transgenic varieties containing only a single transgene, or simple event, while the current varieties express several transgenes, or stacked, conferring resistance to different species of Lepidoptera and Coleopteran insects and tolerance to two different herbicides. In 2010 were planted in Colombia, 18.874 hectares of GM cotton, 16.793 hectares of GM corn, and 4 hectares of GM carnations and GM roses. GM corn and GM cotton were planted in Sucre, Cesar, Cordoba, Huila and Tolima. GM corn was planted in Antioquia, Valle del Cauca, Meta, Cundinamarca and Santander. Carnations and roses were planted in Cundinamarca. GM maize and GM cotton expressing ILR and HT features, as simple events or stacked. In the case of GM carnation and GM roses, these genotypes that express the color blue. Academia has tried to organize the debate on the adoption of GM crops around the analysis of biological risks and environmental vs environmental and economic benefits. Biological hazards are defined by the possible negative effects on human consumers or negative effects on the environment. The environmental benefits are related to reduce use of agrochemicals (insecticides and herbicides), and the economic benefits from the reduction in losses due to insect and weed competition to reduction of production costs.

Key words: GM crops, biological risk, environmental benefits, economic benefits.

INTRODUCCIÓN

Mediante la utilización conjunta de genética mendeliana y estadística a comienzos del siglo XX, se construyó la ciencia y arte del mejoramiento genético de cultivos. Mediante la intensiva explotación del llamado vigor híbrido, se incrementaron significativamente los rendimientos de cereales, al mismo tiempo que hibridaciones intervarietales e inter-específicas, acompañadas de manipulaciones citogenéticas, fueron útiles para mover genes de resistencia a enfermedades y a insectos plagas desde donadores foráneos hacia las variedades cultivadas (Jauhar, 2006).

El mejoramiento de plantas fue posteriormente acelerado, con el desarrollo de la tecnología de ADN recombinante, que permite la transferencia de genes foráneos al genoma de especies cultivadas. La implementación exitosa de transgénesis para combatir insectos

tos plagas y enfermedades de cultivos importantes como arroz (*Oryza sativa* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), maíz (*Zea mays* L.) y algodón (*Gossypium hirsutum* L.) fueron logros notables, así como la biofortificación de cultivos es otro desarrollo importante en la lucha contra el hambre y la desnutrición. El arroz dorado, genéticamente enriquecido con vitamina A y hierro, por ejemplo, tiene el potencial real de salvar millones de vidas. Otra aplicación interesante de la tecnología transgénica es la producción de vacunas bebibles contra enfermedades mortales (Jauhar, 2006).

Actualmente se tienen protocolos eficientes y confiables para una variedad de plantas: cereales, leguminosas, forrajes, cultivos oleaginosos, cultivos para fibras, ornamentales y especies forestales. La transformación genética ofrece acceso directo a un banco de genes ilimitado, antes inaccesibles a los mejoradores genéticos (Jauhar, 2006).

La mayor parte del mejoramiento genético de cultivos y el consecuente incremento de rendimientos, fue resultado del mejoramiento convencional. Esas herramientas, aunque lentas y algunas veces tediosas, van a continuar jugando un papel muy importante en los programas de fitomejoramiento. Por otra parte, la tecnología GM tiene la habilidad de cambiar el genotipo de una planta en un tiempo relativamente corto, y puede ayudar a diseñar plantas más nutritivas, entre otros rasgos de interés. Sin embargo, esta nueva tecnología únicamente complementa, no reemplaza, el mejoramiento convencional de plantas. Las tecnologías convencionales y modernas deben ir de la mano para acelerar el mejoramiento de plantas y contribuir a garantizar la seguridad alimentaria global (Jauhar, 2006).

CULTIVOS GM EN EL MUNDO

Los dos rasgos principales que se han introducido a los cultivos GM liberados comercialmente son resistencia a insectos y tolerancia a herbicidas. Unos pocos cultivos han sido liberados con la característica de resistencia a virus (papaya, papa y calabaza), usando genes derivados de los mismos virus (CERA, 2010).

La fuente de toxinas insecticidas producidas por plantas transgénicas comerciales, es la bacteria del suelo *Bacillus thuringiensis* (Bt). Las cepas Bt muestran diferentes efectos de su actividad insecticida hacia insectos plagas, y constituye una reserva de genes que codifican para proteínas insecticidas, las cuales son acumuladas en inclusiones cristalinas producidas en la esporulación bacteriana (proteínas Cry y proteínas Cyt) o expresadas durante el crecimiento bacteriano (proteínas Vip; Gatehouse, 2008). Diferentes genes derivados de Bt han sido transferidos exitosamente a algodón, maíz, tomate y papa (CERA, 2010).

La enzima 5-enolpiruvil-shikimato-3-fosfato sintetasa (EPSPS) es parte de la vía del shikimato que resulta en la producción de aminoácidos aromáticos y otros compuestos aromáticos en plantas. Cuando las plantas convencionales son tratadas con el herbicida glifosato, éstas no pueden producir los aminoácidos aromáticos que necesitan para sobrevivir. La enzima está presente en todas las plantas, bacterias y hongos, pero no en animales los cuales no sintetizan sus propios aminoácidos aromáticos. Debido a que la vía de biosíntesis de aminoácidos aromáticos no existe en mamíferos, aves y peces, glifosato no causa toxicidad en estos organismos. La enzima EPSPS está normalmente presente en alimentos derivados de fuentes vegetales y bacterianas (Williams *et al.*, 2000). Las variedades GM de soya contienen una forma de EPSPS tolerante a glifosato

aislada de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens* cepa CP4 (*cp4 epsps*). El gene que codifica para esta enzima fue transferido al genoma de la planta, confiriéndole la característica de tolerancia al herbicida (Windels, *et al.*, 2001). El mismo gene fue posteriormente introducido a maíz, algodón, remolacha azucarera, colza o canola, nabo, achicoria, clavel, lino, alfalfa, tabaco, arroz y trigo (CERA, 2010).

La tolerancia al herbicida glufosinato de amonio (PPT) es otro rasgo GM transferido a cultivos agrícolas, mediante la introducción del gen *pat* derivado de la bacteria común del suelo *Streptomyces viridochromogenes* y que codifica una enzima PPT-acetiltransferasa. El herbicida PPT normalmente actúa inhibiendo la enzima glutamina sintetasa, lo que causa acumulación anormal de amonio en plantas. La forma acetilada de PPT es inactiva (Oberdoerfer, *et al.*, 2005). Este rasgo ha sido transferido exitosamente a varios cultivos: remolacha azucarera, canola, soya, arroz y maíz (CERA, 2010). La tecnología de tolerancia a herbicidas proporciona a los agricultores un sistema alternativo que efectivamente controla un espectro amplio de malezas, incluyendo aquellas de difícil control. La tecnología reduce la cantidad de herbicida necesaria para el control de malezas, maximiza la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas de las variedades GM y reduce el consumo de recursos agrícolas en el campo. Todo ello significa menos uso de maquinaria y equipo, así como menos esfuerzo para los agricultores.

En 2010 se sembraron 148 millones de hectáreas de cultivos GM, por 15,4 millones de agricultores en 29 países. Se destaca la adopción de estos cultivos en tres países nuevos (Pakistán, Myanmar y Suecia) y, el retorno a la siembra de cultivos GM en Alemania. Esta área significa un aumento de 10% respecto a 2009. De los agricultores que usaron la tecnología GM en 2010, 14,4 millones fueron pequeños agricultores de países subdesarrollados. China (6,5 millones) e India (6,3 millones) tienen el mayor número de pequeños agricultores que utilizan cultivos GM (James, 2010). En la Tabla 1 se resume la información para cada país.

En América, Brasil presentó el incremento anual absoluto más alto del mundo en la siembra de cultivos transgénicos, sumando cuatro millones de hectáreas en 2010 (un incremento de 19%), alcanzándolo un total de 25,4 millones de hectáreas. Por otra parte, Argentina aprobó tres nuevas variedades de maíz GM para alimentación, forraje y siembra comercial. En México se aprobaron las primeras pruebas de campo de maíz GM doble gen (RIL x TH) en 2010, y ha venido produciendo soya GM y algodón GM desde hace varios años. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos desreguló la alfalfa GM y parcialmente la remolacha azucarera GM (James, 2010).

En África, Kenya espera la primera plantación comercial para 2012 de algodón GM. Mientras que en Burkina Faso, la siembra de algodón transgénico aumentó 65% y los agricultores reportaron que han triplicado los aumentos en rendimiento (James, 2010). En Asia, Pakistán y Myanmar sembraron algodón GM por primera vez. 600.000 agricultores en Pakistán y 375.000 en Myanmar cultivaron algodón GM con resistencia a insectos lepidópteros. En Filipinas se aprobaron los protocolos para ensayos en campo de cultivos GM y las pruebas de campo para berenjena GM y arroz dorado (James, 2010). La Unión Europea aprobó cultivo comercial de papa Amflora, la primera autorización de este tipo en 13 años. Maíz, es el segundo cultivo GM aprobado y se cultiva en Suecia, Alemania y República Checa. En ese territorio se han aprobado 34 productos GM para importación: seis variedades de algodón, 21 variedades de maíz, tres varie-

Posición	País	Área (millones hectáreas)	Cultivos GM
1	Estados Unidos	66,8	Maíz, soya, algodón, colza, remolacha azucarera, alfalfa, papaya, calabaza.
2	Brasil	25,4	Soya, maíz, algodón
3	Argentina	22,9	Soya, maíz, algodón
4	India	9,4	Algodón
5	Canadá	8,8	Colza, maíz, soya, remolacha azucarera
6	China	3,5	Algodón, papaya, álamo, tomate, pimiento dulce.
7	Paraguay	2,6	Soya
8	Pakistán	2,4	Soya
9	Sur África	2,2	Maíz, soya y algodón
10	Uruguay	1,1	Soya, maíz
11	Bolivia	0,9	Soya
12	Australia	0,7	Algodón y colza
13	Filipinas	0,5	Maíz
14	Myanmar	0,3	Algodón
15	Burkina Faso	0,3	Algodón
16	España	0,1	Maíz
17	México	0,1	Algodón, soya
18	Colombia	<0,1	Algodón, maíz, clavel y rosas
19	Chile	<0,1	Maíz, soya, colza
20	Honduras	<0,1	Maíz
21	Portugal	<0,1	Maíz
22	Republica Checa	<0,1	Maíz, papa
23	Polonia	<0,1	Maíz
24	Egipto	<0,1	Maíz
25	Eslovaquia	<0,1	Maíz
26	Costa Rica	<0,1	Algodón, soya
27	Rumania	<0,1	Maíz
28	Suecia	<0,1	Papa
29	Alemania	<0,1	Papa

Tabla 1. Área global de cultivos GM en 2010 por país (millones de hectáreas). Tomado y adaptado de James, 2010.

dades de semillas oleaginosas, tres variedades de soya y una variedad de remolacha azucarera (James, 2010).

Para el futuro de los cultivos GM se hacen varios pronósticos. Se espera que otros 12 países adopten la tecnología hacia 2015, para llegar a 40 países usuarios de tecnología GM. Esto puede significar que se duplique el número de agricultores a 20 millones y que la superficie global se duplique a 200 millones de hectáreas. En relación con nuevos desarrollos se prevé el lanzamiento de maíz tolerante a sequía en 2012, de arroz dorado en 2013 y de arroz Bt antes de 2015. Este último avance podría beneficiar mil millones de familias pobres solo en Asia (James, 2010).

CULTIVOS GM EN COLOMBIA

En Colombia se han liberado comercialmente diferentes tecnologías transgénicas en los cultivos de maíz y algodón: resistencia a insectos lepidópteros resultado de la expresión de genes *cry* derivado de Bt, tolerancia al herbicida glifosato resultado de la expresión del gene *cp4 epsps* derivado de *A. tumefaciens* y, los cultivares doble gen que contienen las dos tecnologías en diferentes versiones. En el caso de maíz, asimismo se ha liberado la tecnología de tolerancia al herbicida glufosinato de amonio resultado de la expresión del gene *bar* derivado de *Streptomyces hygroscopicus*. Para el caso de algodón las autorizaciones incluyen el uso para la producción de alimentos para animales, en tanto que en el caso de maíz incluye el uso para alimentación directa o procesamiento para el consumo humano a animal. También se han liberado comercialmente clavel y rosa transgénicos con fenotipos de color azul para las flores, al igual que crisantemo con el mismo fenotipo para siembra experimental. En el mercado internacional, el valor alcanzado por las rosas azules está entre 40 a 50 dólares la unidad. Según Agrobio, 2009, para 2009 se sembraron en cultivos transgénicos en Colombia, 18.874 hectáreas de algodón, 16.793 hectáreas de maíz y cuatro hectáreas de clavel y rosa. Maíz y algodón se sembraron en los departamentos de Sucre, Cesar, Córdoba, Huila y Tolima. Solo maíz en los departamentos de Antioquia, Valle del Cauca, Meta, Cundinamarca y Santander, y clavel y rosas en el departamento de Cundinamarca.

Otros productos que han recibido diferente tipo de autorizaciones son: para consumo de animales domésticos, arroz con tolerancia al herbicida glufosinato de amonio (2008) y, remolacha azucarera con tolerancia al herbicida glifosato (2010); liberación comercial para la siembra de soya con tolerancia al herbicida glifosato (2009). Por otro lado, el Instituto Colombiano agropecuario (ICA) ha concedido autorizaciones para centros de investigación que realizan trabajos en ingeniería genética: al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) para trabajar en diversos fenotipos de yuca y arroz; al Centro de Investigación de Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA) para trabajar en caña de azúcar con tolerancia al virus de amarillamiento de la hoja; al Centro Nacional de Investigación de Café para trabajos iniciales en café, tabaco enano y *Beauveria Bassiana*. Los documentos relativos a la normatividad colombiana sobre cultivos GM, se encuentran disponibles en la página web del Instituto Colombiano Agropecuario: <http://www.ica.gov.co/Normatividad/Indice-de-Normatividad.aspx>.

En Colombia el marco general en bioseguridad para organismos genéticamente modificados incluidos cultivos transgénicos, lo otorga el Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología del Convenio sobre la Diversidad Biológica, a través de la Ley 740 de 2002, con la cual se ratificó el protocolo. Con el fin de garantizar niveles adecuados de seguridad en el uso de organismos vivos modificados, el gobierno nacional emitió en 2005 el decreto 4525 por el cual se reglamenta la Ley 740 de 2002 y se establece el marco regulatorio y procedimental de Organismos Vivos Modificados (OVMs), para Colombia. El decreto 4525 aplica a movimiento transfronterizo, tránsito, manipulación y utilización de OVMs, que puedan tener efectos adversos para medio ambiente y diversidad biológica, teniendo en cuenta los riesgos para salud humana, productividad y producción agropecuaria. El desarrollo de actividades con OVMs en el territorio nacional requiere que se solicite autorización previa a la autoridad competente. Esta autorización deberá a su vez otorgarse mediante acto administrativo en el

cual se especifiquen datos sobre el organismo vivo modificado que se usará, resultados de la evaluación y gestión de riesgo y las medidas que deben adoptarse para prevenir, mitigar y controlar efectos adversos.

PAÍSES SUBDESARROLLADOS Y CULTIVOS GM

Con el propósito de analizar los efectos complejos del uso de cultivos GM en países subdesarrollados, se analizará con base en la literatura, el problema de la adopción de algodón GM en Argentina, bioseguridad en Brasil y las estrategias para impulsar la investigación en China.

Qaim *et al.*, 2003, publicaron un trabajo sobre la adopción de algodón GM en Argentina, mediante encuestas a productores en las dos mayores provincias argentinas productoras de algodón, Chaco y Santiago del Estero, responsables de cerca de 90% de la producción total del cultivo. Como el número de adoptantes fue mucho menor que el número de no adoptantes, se empleó la técnica de muestreo aleatorio estratificado. Al final se entrevistaron en el primer semestre de 2001, 299 agricultores, 89 adoptantes, 210 no adoptantes. Los resultados se presentan en la Tabla 2. En media, los agricultores adoptantes usan 50% menos de insecticida que los agricultores convencionales. Como esta reducción ocurre con el uso de los insecticidas más tóxicos, tiene un efecto concomitantemente positivo sobre ambiente y salud de los agricultores. También se reporta un incremento significativo en los rendimientos en las fincas de los agricultores adoptantes. Pero los impactos tecnológicos críticamente dependen de las condiciones subyacentes. En general, efectos en los rendimientos pueden ser altos, en situaciones donde la presión de plagas es severa y, el daño al cultivo no es efectivamente controlado por insecticidas químicos u otras alternativas (Qaim *et al.*, 2003). Pocos agricultores grandes habían adoptado, en esos años, la tecnología Bt en algodón en Argentina. Esta baja adopción se presume debida a los altos precios de la semilla transgénica. Sin embargo, los ahorros potenciales en insecticidas son más significativos para este tipo de agricultores. Los efectos sobre rendimiento, son más importantes para los agricultores pequeños. Muchos de ellos no usan insecticidas y son los que mayores pérdidas sufren. La ganancia neta en rendimientos predicha en este estudio, para agricultores grandes fue de 19%, mientras que para los agricultores pequeños fue de 41%. La difusión amplia de tecnología GM en algodón, con semillas a precios razonables, no solamente extiende beneficios agronómicos y ambientales, sino que puede implicar efectos sociales progresivos (Qaim *et al.*, 2003).

	Adoptantes Bt	No adoptantes / Convencionales
n.º aplicaciones	2,84	5,07
Insecticida (Kg / Ha)	2,3	4,03
Ingrediente activo (Kg / Ha)	0,78	1,8
Producción semilla (Kg / Ha)	2,125	1,606

Tabla 2. Resultados de las aplicaciones de insecticidas con la adopción de algodón GM con resistencia a insectos en Argentina. Adaptado de Quain *et al.*, 2003.

Un trabajo posterior que recoge el análisis de 10 años de implementación de la tecnología transgénica en Argentina (Trigo y Cap, 2006), muestra cambios importantes en relación

con algodón GM. Entre 1998 y 2005 se pasó de sembrar 82 hectáreas a sembrar 57.720 hectáreas, y la adopción de algodón con tolerancia a glifosato. Los beneficios económicos acumulados corresponden a 20,81 millones de dólares, que se repartieron así: 86% para productores, 9% para proveedores de la tecnología y 5% para el estado nacional. En la página *web* del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, consultada el 25 de abril de 2011, se informa que se ha autorizado para comercialización, tanto algodón Bt, como algodón RR y algodón BT x RR, desde 2009 (<http://www.minagri.gob.ar/site/index.php>). La adopción de algodón transgénico en Argentina, llega a 80% para 2010, lo que permite afirmar que para ese momento ha sido adoptado por todos los sectores productivos, incluidos grandes productores (James, 2010).

Brasil tiene un marco legal de bioseguridad operativo, compatible con el desarrollo de la biotecnología moderna, con uso sostenible de su biodiversidad y, preservación de ecosistemas y salud humana. El país ha adoptado una comisión de asesoramiento en bioseguridad (CTNbio), que maneja temas regulatorios y administrativos. Desde 2005, la comercialización de productos GM puede ser sujeta a ratificación por un consejo superior que evalúa aspectos socioeconómicos. A más de 100 instituciones se han concedido certificados de calidad en bioseguridad (CQB). La CTNbio tiene varios desafíos, especialmente relacionados con la percepción pública negativa asociada a plantas transgénicas. Existen algunos problemas en relación con el estado actual de la tecnología GM: tiempos muy largos de revisión de las solicitudes, uso ilegal de semillas, prohibición de uso de tecnología de restricción de la expresión, etiquetado restrictivo de productos GM. Los productos que contienen OGMs o sus derivados son legalmente sujetos a etiquetado; sin embargo, estas etiquetas son escasas en los productos GM comercializados. En contraste con los cultivos GM, productos recombinantes aplicados a salud e industria han sido aceptados por los consumidores brasileños.

Usualmente, los beneficios potenciales de la biotecnología en el mejoramiento del rendimiento en cultivos de países subdesarrollados no son tenidos en cuenta por los gobiernos locales. Por otra parte, recientemente los programas de investigación en biotecnología, son área de interés que recibe inversión pública. Muchos incentivos gubernamentales se han ofrecido para desarrollo de biocombustibles. En esta área, Brasil disputa con Estados Unidos el primer lugar en producción de bioetanol. También, el país estableció instrumentos legales que protegen derechos de propiedad intelectual, lo cual lo hace más atractivo para inversión foránea (Mendoza - Hagler *et al.*, 2008). La situación con respecto a los problemas derivados de tiempos largos de los procesos regulatorios en Brasil, parecen haber sido solucionados recientemente, dado que Brasil se ha convertido en el motor de crecimiento en cultivos GM en el mundo. Solo en 2010 creció el área de cultivos GM en cuatro millones de hectáreas (James, 2010).

A pesar de los avances obtenidos en áreas claves, ciencias de la vida y biotecnología, China está aún enfrentando múltiples problemas. Insuficiente talento y falta de innovación, infraestructura relativamente débil, pobre coordinación que lleva a duplicación de proyectos, escasa inversión en investigación y desarrollo de las empresas, débil articulación entre investigación científica y aplicación industrial y, un enorme sistema legal a la saga del desarrollo científico y tecnológico. Para afrontar el reto de una nueva era para las ciencias de la vida y la biotecnología, responsables políticos asesorados por la comunidad científica, han implementado estrategias efectivas para construir capacidad

en años recientes: a. coordinación de esfuerzos administrativos, b. concentración de instituciones de investigación y construcción de una fuerte relación con las fuentes de financiación, c. reclutamiento de talento, d. priorización de bioseguridad y bioética, e. protección de derechos de propiedad intelectual, f. establecimiento de un sistema estándar para la industria biotecnológica y, g. establecimiento de relaciones internacionales de cooperación (Chen, *et al.*, 2007).

China tiene un proceso de aprobación comercial de cultivos GM, complejo. Cada cultivo se somete a cinco etapas de pruebas: investigación en laboratorio, pruebas a pequeña, mediana y larga escala y, certificación en bioseguridad. Cultivos GM importados deben cumplir el mismo proceso de aprobación, luego de recibir aprobación en el extranjero. La comisión de seguridad de ingeniería genética agrícola (AGESC) debe completar las pruebas. En las dos etapas iniciales, investigadores de las compañías deben entregar todos los materiales, datos y resultados experimentales. Las tres etapas finales son contraladas por un sistema de aprobación algo opaco. Luego de recibir el certificado de bioseguridad en la etapa final, el solicitante puede entonces producir y vender los tipos de cultivo GM aprobados. En 2007 se estaban probando para comercialización las siguientes características y cultivos: tolerancia a herbicidas (algodón), mejoramiento de calidad (trigo), resistencia a sequía (tabaco), resistencia a virus (soya, maíz), resistencia a insectos (tabaco, soya, maíz). En China estaban aprobados para siembra comercial a gran escala algodón resistente a insectos; a mediana escala, álamo negro, papaya, petunia, ají dulce y tomate; con propósitos no comerciales, col, maíz, pimiento, papa, ají rojo, arroz, soya, tabaco y sandía (Oliver y Hankis, 2007).

Las agendas de investigación de países subdesarrollados deben focalizarse sobre una amplia base de cultivos importantes para las comunidades rurales, buscando incrementos importantes en rendimiento y valor nutricional. Una tecnología impulsada por las necesidades sociales no puede llevarse a cabo por parte del sector privado de la economía, puesto que se hace sobre cultivos de bajo valor comercial. Los gobiernos deben tomar la responsabilidad de invertir en investigación pública, crucial para cerrar la brecha alimentaria entre ricos y pobres (WHO, 2004).

EVENTOS APILADOS

Uno de los mayores obstáculos técnicos que impide avance en ingeniería genética de plantas es la dificultad para expresar o manipular múltiples genes. En la frontera de la ciencia, una variedad de métodos convencionales y novedosos están siendo empleados para introducir múltiples genes en plantas (Halpin, 2005). En los últimos años se ha reportado un rápido incremento en cultivos GM con eventos apilados. Muchos de estos productos se desarrollaron por mejoramiento convencional, mediante cruce entre plantas transgénicas que contienen eventos simples o dobles. Muchas compañías biotecnológicas construyeron productos con características apiladas con un número de genes creciente que, confieren tolerancia a insectos y herbicidas para controlar un rango amplio de insectos plaga y malezas (Que, *et al.*, 2010; Tabla 3).

La emergencia de malezas tolerantes a glifosato en muchas regiones del mundo requiere el uso de características de tolerancia a herbicidas adicionales o, alternativas para el control completo de malezas en el futuro, especialmente en cultivos dicotiledóneos como canola, soya y algodón. En estos cultivos existen muy pocas opciones disponibles de her-

Empresa	Cultivo	Genes	Características
Bayer CropScience	Canola	<i>bar</i> , barnase, barstar	TH, restauración de la fertilidad
Monsanto	Canola	CP4 EPSPS, <i>gox</i>	TH (glifosato)
Bayer CropScience	Algodón	<i>bar</i> , Cry1Ac, Cry2Ab	TH (glufosinato) , RIL
Dow AgroSciences	Algodón	<i>pat</i> , Cry1Ac, Cry1Fa	TH (glufosinato), RIL
Dow AgroSciences	Algodón	<i>pat</i> , Cry1Ac, Cry1Fa, CP4 EPSPS	TH (glufosinato y glifosato), RIL
Monsanto	Algodón	Cry1Ac, CP4 EPSPS	TH (glifosato), RIL
Monsanto	Algodón	CP4 EPSPS, Cry1Ac, Cry2Ab	TH (glifosato), RIL
Dow AgroSciences and Pioneer Hi-Bred	Maíz	Cry 1Fa, <i>pat</i>	TH (glufosinato), RIL
Dow AgroSciences and Pioneer Hi-Bred	Maíz	Cry34Ab1/Cry35Ab1, <i>pat</i>	TH (glufosinato), RIC
Dow AgroSciences and Pioneer Hi-Bred	Maíz	Cry 1Fa, Cry34Ab1, Cry35Ab1, <i>pat</i>	TH (glufosinato), RIL, RIC
Dow AgroSciences and Pioneer Hi-Bred	Maíz	<i>pat</i> cp4 epsps, ry34Ab1, Cry35Ab1, Cry1Fa2	TH (glifosato y glufosinato), RIL , RIC,
Monsanto	Maíz	Cry1A.105, Cry2Ab2	RIL
Monsanto	Maíz	cp4 epsps, Cry3Bb1	RIC
Monsanto	Maíz	Cry1Ab, Cry3Bb1, CP4 EPSPS	TH (glifosato), RIC, RIL
Monsanto	Maíz	Cry1A.105, Cry2Ab2, Cry3Bb	RIC, RIL
Monsanto and Dow AgroSciences	Maíz	PAT, CP4 EPSPS, Cry1Fa2, Cry1A.105, Cry2Ab, Cry3Bb1, Cry34Ab1, Cry35Ab1	TH (glifosato y glufosinato), RIC, RIL
Syngenta	Maíz	Cry1Ab, <i>pat</i> , mutant maize EPSPS	TH (glifosato y glufosinato), RIL
Syngenta	Maíz	Cry1Ab, mCry3Aa, <i>pat</i>	TH (glufosinato) RIC, RIL
Syngenta	Maíz	<i>pat</i> , Cry1Ab, mCry3Aa, mutant maize EPSPS	TH (glifosato y glufosinato), RIC, RIL,

Tabla 3. Variedades GM que expresan eventos apilados. Tomado y adaptado de Que *et al.*, 2010.

bicidas. El apilamiento de genes en maíz es mucho más complejo. En Estados Unidos se necesitan para maíz, al menos 8 genes para combinar control de malezas y control de las cuatro mayores plagas: *Diabrotica virgifera*, *Ostrinia nubilalis*, *Helicoverpa zea*, *Diatraea grandiosella* (Que, *et al.*, 2010). Adicional a la tolerancia a herbicidas y resistencia a insectos, existen varias características agronómicas y de calidad que la industria biotecnológica agrícola tiene en desarrollo: mejoramiento de rendimiento, tolerancia a sequia, eficiencia en utilización de nitrógeno, resistencia a enfermedades, control de fertilidad, calidad de grano (composición de aminoácidos y aceites, contenido proteico), y procesamiento del grano (fitasa para alimentación animal, amilasa para producción de etanol). Características agronómicas complejas tales como mejoramiento al rendimiento y tolerancia a sequia, pueden necesitar múltiples genes para una expresión robusta (Que, *et al.*, 2010). La generación de apilamiento molecular de múltiples características presenta varios desafíos: diseño de casetes, ensamblaje de vectores, transformación de plantas, análisis

de expresión génica. Varias tecnologías están en desarrollo para resolver esos problemas (Que, *et al.*, 2010). En la Tabla 4, estas tecnologías se enuncian. La adopción de estas novedosas tecnologías de apilamiento de genes depende de varios factores: rendimiento técnico, costo de desarrollo, necesidades de los agricultores, ambiente regulatorio y decisiones individuales de las empresas biotecnológicas. Uno de los problemas es que las características que los agricultores necesitan son diferentes para cada región, dado que plagas y malezas tienen distribución única para cada locación geográfica. Otro problema es la flexibilidad del programa de mejoramiento, puesto que debe considerarse cuando se trabaja con germoplasmas y genes entre varias empresas, el manejo de licencias cruzadas de patentes con otra empresa de semillas sobre caracteres GM. Para los programas de resistencia a insectos, es importante considerar los requerimientos del manejo de la resistencia mientras se diseña el vehículo de apilamiento molecular. También, para semillas híbridas como maíz, se debe considerar si algunos caracteres deberían colocarse en hembras o machos, de acuerdo con los objetivos futuros del programa de mejoramiento (Que, *et al.*, 2010). El apilamiento de transgenes presenta muchos desafíos interesantes, tanto científicos como de táctica empresarial, que van a requerir inputs desde los investigadores moleculares y genómicos, hasta los mejoradores convencionales y, las agencias reguladoras para elegir la solución más efectiva (Que, *et al.*, 2010).

Empresas desarrolladoras	Tecnología	Empresas asociadas	Sitio web
Cellectis	Integración específica mediada por meganucleasa y por recombinación homóloga	BASF Plant Science, Monsanto, Limagrain, Bayer CropScience, DuPont (Pioneer Hi-Bred)	http://www.cellectis.com/
Precision Biosciences	Ingeniería de proteínas para crear meganucleasas para mediar la integración sitio específica de transgenes	DuPont (Pioneer , Hi-Bred) Bayer CropScience	http://www.precisionbiosciences.com/
Sangamo BioSciences	Nucleasas de dedos de Zinc con alta especificidad	DowAgrosciences	www.sangamo.com/
Chromatin, Inc.,	Minicromosomas	DowAgrosciences, Syngenta, Monsanto, Bayer CropScience	http://www.chromatininc.com/

Tabla 4. Tecnologías para el apilamiento molecular de genes. Tomado y adaptado de Que *et al.*, 2010.

RIESGOS BIOLÓGICOS POTENCIALES DEL USO DE LOS CULTIVOS GM

A pesar de las altas tasas de adopción, subsisten preocupaciones acerca del impacto de los cultivos GM sobre el ambiente. Una aproximación razonable es comparar beneficios y riesgos potenciales del nuevo cultivo GM con los de su contraparte convencional. La evaluación efectiva de riesgo y los mecanismos de monitoreo son prerrequisitos básicos de cualquier marco jurídico orientado a asegurar uso seguro de organismos recombinantes en agricultura (Singh, *et al.*, 2006). Los riesgos potenciales asociados con cultivo y uso de plantas GM, incluyen cinco tipos diferentes de riesgos (Singh, *et al.*, 2006).

1. **Introducción de proteínas con efectos adversos para salud.** La alergia causada por consumo de alimentos, se define como una respuesta inmune adversa a proteínas contenidas en alimentos, que afecta alrededor de 6% de niños y 4% de adultos. Las

reacciones alérgicas inducidas por alimentos producen variedad de síntomas que afectan piel, tracto gastrointestinal y tracto respiratorio. Aunque algunos alimentos provocan estas reacciones, relativamente pocos alimentos son responsables de la mayoría de reacciones alérgicas alimentarias significativas: leche, huevo, cacahuete, nueces, pescado y mariscos (Scott y Sampson, 2006).

Los productos génicos que normalmente no inducen alergias no se convierten en alérgicos de repente si son expresados en una planta GM. Si el producto es conocido como alérgico, entonces también será alérgico en una planta GM (Singh, *et al.*, 2006).

La toxicidad es la capacidad o propiedad de causar efectos adversos sobre salud. En relación con los CGM es necesario realizar pruebas de toxicidad, cuando una planta produce un componente endógeno a nivel mayor del normal, como resultado de la expresión del transgene o, cuando el producto transgénico es reconocido por su toxicidad (Singh, *et al.*, 2006).

Otro asunto lo constituye el problema de la transferencia horizontal de genes, que pueden tener o no efectos adversos en el organismo receptor. Por ejemplo, la transferencia de genes que confieren tolerancia a antibióticos, a bacterias habitantes del tracto digestivo. El panel científico de revisión de cultivos GM concluyó que la transferencia de ADN de plantas GM a bacteria es poco probable que ocurra debido a una serie de barreras bien establecidas e ilustran su posición mediante evidencia experimental. La revisión también concluye que el ADN transgénico no es diferente de otro ADN consumido como parte de la dieta y tendrá un destino similar (Heritage, 2004). Los alimentos GM disponibles en el mercado internacional han sido objeto de evaluación de riesgo y no es probable que presenten riesgo para la salud humana diferentes a los causados por su contraparte convencional. El riesgo potencial de OGMs y alimentos GM debe ser evaluado caso a caso teniendo en cuenta las características de cada uno y el ambiente donde es utilizado. Las guías de evaluación de riesgo para alimentos GM han sido elaboradas por el *Codex Alimentarius*. Se están desarrollando nuevas metodologías para la construcción de OGMs que reduzcan significativamente los riesgos potenciales derivados de la integración al azar de transgenes, resultante de los métodos actuales (WHO, 2004).

2. **Efectos negativos en especies no blanco.** El riesgo ecológico de la liberación de plantas Bt puede producir efectos tóxicos sobre organismos que no son plaga, pero son predadores y parásitos de insectos plaga y son de hecho, benéficos para la agricultura (Singh *et al.*, 2006). Un buen modelo para analizar efectos negativos de cultivos GM sobre especies no blanco, son los estudios del efecto de maíz GM con tolerancia a insectos lepidópteros sobre la mariposa monarca. Angharad *et al.*, 2002, reportaron una serie de estudios realizados para evaluar rigurosamente el impacto de polen de maíz GM sobre larvas de mariposa monarca para cuantificar, riesgo. Los resultados mostraron que el cultivo a gran escala de híbridos de maíz Bt no produce gran riesgo para las mariposas monarcas.

Al analizar los riesgos del uso de cultivos Bt, es necesario compararlos con los efectos de la agricultura convencional. Es importante tener en cuenta los daños causados a ambiente y salud humana por el uso extensivo de agroquímicos, más aún cuando en los cultivos de maíz de Estados Unidos es donde se aplica mayor cantidad de insect-

ticidas (Pimentel y Raven, 2000). Se ha observado que los efectos de pesticidas sobre supervivencia de larvas de mariposa monarca exceden el daño que podría causar el polen Bt (Stanley-Horn, 2001). Se puede considerar que el maíz Bt es más amigable ambientalmente, que el maíz convencional. Es importante plantear algunas alternativas para manejar el riesgo de efectos negativos de cultivos Bt sobre insectos no blanco (Wisniewsky, *et al.*, 2002): a. Utilización de promotores que inducen expresión de la proteína Bt en tejidos diferentes a granos de polen, por ejemplo promotores específicos para tejidos fotosintéticos; b. Liberación de híbridos con bajos niveles de expresión de proteína Bt; y c. Manejo de cultivos para disminuir tiempo de solapamiento entre eclosión de huevos de la mariposa monarca y el periodo de anthesis de maíz Bt.

3. **Aumento de propiedades invasivas de malezas.** Es posible que la liberación de cultivos GM se traduzca en nuevas malezas agrícolas, y por lo tanto, añadirían un nuevo problema a los agricultores. Algunos cultivos, tales como *Medicago sativa*, *Brassica napus*, *Brassica rapa*, *Helianthus annuus* y *Oryza sativa* tienen características similares a las malezas. Los caracteres transgénicos novedosos podrían hacer que el cultivo se vuelva maleza invasiva (Regal 1994). Frente a este problema una mezcla de herbicidas que contenga más de cinco ingredientes activos puede ser usado para control de malezas (Bennett, *et al.*, 2004).

Algunas especies o poblaciones relacionadas con cultivos GM se comportan normalmente como maleza, lo que podría generar la posibilidad de transmisión incontrolada del transgén. El arroz rojo es un tipo de arroz que invade cultivos de arroz comercial, este puede cruzarse con una variedad de arroz GM. Estas características lo hacen un posible receptor y transmisor del transgén. Pero su introgresión, es decir el movimiento de un gen entre especies mediante hibridación y retrocruzamientos, estará limitada por la presión de selección (Garnier y Lecomte, 2006). Sí bien se han detectado procesos de hibridación entre plantas transgénicas y no transgénicas, *Brassica napus* transgénica (resistente a herbicidas) x *B. oleracea*; *B. napus* transgénica x *Sinapsis arvensis*; *Brassica napus* transgénica x *Hirschfeldia incana*; *Oryza sativa* spp. japonica x *Oryza sativa* spp. indica, hasta el momento no se ha comprobado ninguna introgresión (Jia, *et al.*, 2007).

Es necesario analizar cada caso en particular. Celis *et al.*, 2004, indican que en el caso de papa (*Solanum tuberosum*) la posibilidad de flujo genético (hibridación) de papa hacia sus parientes silvestres en centros de diversidad como Perú y Bolivia es alta. Se deben hacer estudios detallados para determinar medidas de seguridad que minimicen la posibilidad de introgresión. En Europa, papa es considerado un cultivo con baja probabilidad de flujo genético, por lo cual su liberación no presentaría mayores problemas (Eastham y Sweet, 2002).

Se pueden utilizar varias estrategias para reducir escape del transgén por polinización y dispersión de semillas. Algunas son prácticas agronómicas, comunes entre los mejoradores genéticos convencionales, puesto que son utilizadas como mecanismos para evitar la mezcla de semillas y mantener la pureza en campo de linajes mejorados (Andow y Zwahlen, 2006). Las otras se relacionan con modificaciones genéticas en el cultivo GM, y van desde la expresión específica de un gen que codifica para una citotoxina que destruye tejidos florales o los hace no funcionales (Brunner, *et al.*,

2007), hasta transformación de cloroplastos y tecnologías de restricción de uso genético (Lee y Natesan, 2006).

4. **Resistencia de insectos.** La amplia dispersión de cultivos GM con resistencia a insectos plaga o enfermedades ha planteado la inquietud de si esa presión de selección sobre poblaciones de insectos plaga y de patógenos, deviene en mecanismos de resistencia. La resistencia a proteínas transgénicas por insectos plaga puede limitar la duración de la variedad GM (Singh, *et al.*, 2006). El desarrollo de resistencia de las plagas a estrategias de control, es un problema extendido desde la segunda guerra mundial, debido a la proliferación de prácticas agrícolas intensivas, que resultan en presión de selección. Se han reportado alrededor de 536 especies de artrópodos, 60 géneros de hongos fitopatógenos y 174 especies de malezas resistentes a algún tipo de pesticida o herbicida y, más de 17 especies de insectos han desarrollado resistencia contra toxinas Bt aplicadas por aspersión (Andow y Zwahlen, 2006). La estrategia más común para el manejo de resistencia a proteínas Bt en cultivos GM, consiste en el establecimiento de un área de plantas no transgénicas, denominada refugio, alrededor o dentro del campo transgénico. Países como Estados Unidos, exigen el uso de refugios en los campos transgénicos en un área entre el 5 - 20% del área total cultivada, dependiendo de la especie (Cerde y Wright, 2004). Las plantas refugio pueden estar organizadas de distintas formas dentro del campo. Sirven como una zona de protección para individuos susceptibles, con lo cual se espera que su genotipo amortigüe el incremento del número de individuos resistentes mediante hibridación. Nibouche *et al.*, 2007, hicieron un análisis sobre algodón Bollgard II®, el modelo estima un tiempo mayor de 15 años para la aparición de resistencia, si se utilizan refugios de algodón no-transgénico.

5. **Impacto sobre la biodiversidad.** Temores por la pérdida de biodiversidad es el punto focal de la oposición de varios grupos ambientalistas influyentes contra los cultivos GM (Singh, *et al.*, 2006). A raíz del debate causado por la supuesta presencia de transgenes en variedades criollas mejicanas, en 2003 se realizó un simposio internacional sobre el problema de flujo de genes, biodiversidad y los centros de origen. Major Goodman de la Universidad Estatal de Carolina del Norte (Estados Unidos), describió las posibles consecuencias de una introducción de maíz GM en México. Señaló que los cruzamientos entre variedades GM y variedades criollas, pueden compararse con los cruzamientos entre híbridos convencionales y variedades nativas, por lo que la teoría de genes neutrales o casi neutrales, desarrollada por Kimura podría ofrecer el modelo más apropiado. Por otra parte, aunque las variedades GM actuales no están diseñadas para cultivarse en México, en el futuro los investigadores desarrollarán maíz transgénico adecuado a condiciones tropicales. No hay ningún motivo científico para creer que un transgen es más perjudicial que cualquiera de los genes desconocidos empleados rutinariamente por los fitomejoradores convencionales (Iniciativa Pew sobre Alimentos y Biotecnología y la Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia, 2003).

Otra conclusión es que para evaluar el efecto que puede tener el maíz GM en la diversidad de maíz mexicano, es necesario crear un modelo preciso de los sistemas agrícolas empleados, las prácticas regionales y los conocimientos de los agricultores locales. Daniela Soleri de la Universidad de California - Santa Bárbara (Estados

Unidos), indicó que tanto quienes proponen como quienes se oponen a cultivos GM tienden a crear suposiciones sin base alguna en cuanto a los sistemas agrícolas tradicionales y sus prácticas. Estas suposiciones no pueden verificarse ni corregirse sin incluir en la discusión a los pequeños agricultores (Iniciativa Pew sobre Alimentos y Biotecnología y la Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia, 2003). Entre las mayores amenazas a la diversidad de maíz se hallan la pérdida de hábitat de especies silvestres, reemplazo de variedades tradicionales por las de mayor producción y deterioro de los bancos de semillas destinados a conservar la diversidad (Iniciativa Pew sobre Alimentos y Biotecnología y la Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia, 2003).

El flujo de genes típicamente ocurre a ratas evolutivamente significativas y a distancias significantes. La hibridación espontánea ocasionalmente tiene consecuencias importantes, como la estimulación de la evolución de invasores más agresivos, e incrementa el riesgo de extinción de especies raras. El mismo problema ha ocurrido para hibridación espontánea entre los cultivos y sus especies silvestres relacionadas. Estos nuevos datos tienen implicaciones para los cultivos transgénicos. Para muchos cultivos, el flujo de genes puede introducir transgenes en poblaciones silvestres. Dependiendo del transgen y la población específica, el flujo de genes puede tener el mismo impacto negativo observado en cultivos mejorados convencionales. El flujo idiosincrático natural puede frustrar los intentos de manejo y monitoreo. El flujo de transgenes dentro del cultivo, aunque raramente discutido, es igualmente digno de estudio (Ellstrand, 2003).

BENEFICIOS AMBIENTALES Y ECONÓMICOS DEL USO DE CULTIVOS GM

Según Singh, *et al.*, 2006, los beneficios potenciales de los cultivos GM pueden ser clasificados en las siguientes cuatro categorías:

1. **Reducción de costos de producción e incremento de rendimiento.** Los beneficios del uso de algodón resistente a insectos son: mejoramiento del control de insectos plaga, mejoramiento del rendimiento y rentabilidad, reducción de costos, reducción de riesgo en producción agropecuaria, mejoramiento económico para agricultores (Edge, *et al.*, 2001).

La aplicación de tecnología GM en agricultura reportó beneficios económicos netos por valor de 9,4 mil millones dólares en 2008 y de 52 mil millones de dólares para el periodo analizado de 1996 a 2008. El aumento de ingresos agrícolas en 2008 fue equivalente a añadir 3,65% al valor total de la producción mundial de los cuatro cultivos principales transgénicos de soya, maíz, canola y algodón (Brookes y Barfoot, 2010). El 50,5% (26,25 mil millones de dólares) del total de estos beneficios corresponde a ganancias por rendimiento, mientras el saldo resultante (49, 5% o 25,75 mil millones de dólares) de reducciones en el costo de producción. 66% del aumento en el rendimiento de los cultivos se deriva de cultivos resistentes a insectos y 34% de cultivos tolerantes a herbicidas (Brookes y Barfoot, 2010).

2. **Reducción de químicos tóxicos en el ambiente.** La reducción en el uso de químicos para el control de insectos plaga es el más evidente beneficio citado. Con la aplicación de cultivos GM se ha reducido el uso de plaguicidas (1996-2008) en 352 millones de kg (-8,4%) de ingrediente activo. Esto significó una disminución de 16,3% en

el impacto ambiental asociado al uso de herbicidas e insecticidas (Brookes y Barfoot, 2010). Los cultivos GM tolerantes a herbicidas han facilitado la adopción de sistemas de labranza mínima en muchas regiones, especialmente Brasil y Argentina. Lo cual ha contribuido a mejorar la calidad de los suelos, por reducción de la erosión y aumento en los niveles de humedad. Adicionalmente, la labranza mínima implica menor uso de maquinaria y por lo tanto de combustibles. En 2008, el ahorro de combustible fue equivalente a eliminar 15,6 mil millones kg de dióxido de carbono de la atmósfera o igual a retirar 6,9 millones de carros de las carreteras por un año (Brookes y Barfoot, 2010). Entre 1996 y 2008, los caracteres GM transferidos a los cultivos, han agregado a la producción mundial, 74 millones de toneladas de soya y 79,7 millones de toneladas de maíz. La tecnología también ha contribuido en una producción extra de 8,6 millones de toneladas de fibra de algodón y 4,8 millones de toneladas de canola (Brookes y Barfoot, 2010). El costo que los agricultores pagaron para tener acceso a la tecnología de modificación genética en 2008 fue igual a 27% de las ganancias totales obtenidas. Para los agricultores de los países en desarrollo el costo total de acceso a la tecnología fue equivalente a 15% de las ganancias totales, mientras que para los agricultores en los países desarrollados el costo fue 36% de las ganancias totales obtenidas de la tecnología (Brookes y Barfoot, 2010). Estas diferencias probablemente reflejan los efectos de agriculturas altamente formalizadas que tienen que cumplir con reglamentaciones estrictas en países desarrollados, lo que puede incrementar costos totales de acceso a tecnología transgénica para esos agricultores. Por otro lado, puede ser el resultado de pago de regalías sobre patentes utilizadas para el desarrollo de tecnología GM específica, sumado al mayor costo de mercado de la semilla GM en países desarrollados.

El análisis de costos y beneficios de la adopción de alimentos GM, puede ser rápidamente estimado para agricultores y fabricantes que se pueden beneficiar de los productos GM en el corto plazo. Sin embargo, es de mayor interés, tener en cuenta el largo plazo y a la sociedad como un todo. Ello incluye aspectos tales como sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola, y el costo de mitigar efectos potenciales sobre salud y ambiente. Toda propuesta de desarrollo de productos GM debe considerar además de lo expuesto, la preservación de biodiversidad y respeto a la naturaleza, en el marco de consideraciones éticas objetivas y de equidad social, respetando las condiciones locales, y las necesidades y los deseos de las comunidades (WHO, 2004).

3. **Remediación y monitoreo ambiental.** Las plantas GM fueron propuestas como una herramienta para manejar y detectar contaminación ambiental (Monciardini, *et al.*, 1998). Muchas plantas son capaces de extraer metales pesados o degradar compuestos orgánicos (Rugh, 2004). Algunas especies que expresan altas habilidades para fitoremediación fueron caracterizadas a nivel fisiológico, bioquímico y molecular, para identificar procesos específicos que puedan ser mejorados vía manipulación genética. Se han reportado varios ejemplos de uso de plantas GM en fitoremediación. Rugh *et al.*, 2000, informan de una planta transgénica de *Arabidopsis thaliana* que expresa los genes MerB y MerA derivados de bacteria. El primero codifica la tienen enzima (reductasa organomercuríca) que convierte metilmercurio a Hg₂ y el segundo, la enzima (reductasa mercuríca) que convierte Hg₂ a Hg. La expresión de ambos genes resulta en la conversión completa de metilmercurio a mercurio metálico, y

produce una tolerancia 50 veces mayor a MeHg que plantas no transgénicas. Esta aplicación puede ser importante en suelo contaminado con mercurio, resultado, por ejemplo de la minería de oro. Bennet *et al.*, 2003, reportan sobreexpresión de las enzimas glutamincisteína sintetasa (ECS) y glutatión sintetasa (GS) en plantas transgénicas de *Brassica juncea*. Estas plantas se sembraron sobre suelos contaminados con metales pesados, provenientes de explotación minera. Las plantas ECS y GS acumularon 1,5 veces más cadmio y 2,0 veces más zinc que plantas control no transgénicas de la misma especie. French *et al.*, 1999, desarrollaron plantas de tabaco capaces de denitrificar GTN, uno de los contaminantes orgánicos más frecuentes, mediante la expresión del gen *onr* que codifica la enzima PETN reductasa, gen derivado de la bacteria *Enterobacter cloacae* PB2.

4. **Productos farmacéuticos basados en plantas.** Investigación con plantas GM ofrece la posibilidad de producción a gran escala de proteínas terapéuticas, altamente eficaces, seguras y puras (Fisher *et al.* 2003). Las proteínas recombinantes que actualmente son producidas en sistemas vegetales para aplicación clínica a gran escala pueden clasificarse en tres grandes áreas: terapéutica parental e intermedios farmacéuticos, anticuerpos monoclonales y vacunas bebibles. La terapéutica parental e intermedios farmacéuticos, incluye todas las proteínas utilizadas directamente como fármacos y compuestos necesarios para elaboración de estos. Se encuentran en el mercado tres productos generados en plantas transgénicas de maíz: avidina, β -glucuronidasa y tripsina bovina, esta última comercializada a gran escala. Se espera que en los próximos cinco años se comercialicen otros productos ya desarrollados como: aprotinina, colágeno, lipasa, lactoferrina, lisozima y brazeína (Horn, *et al.*, 2004). Los anticuerpos y sus derivados constituyen más de 20% de los productos biofarmacéuticos que se están desarrollando (Schillberg, *et al.*, 2003).

El objetivo de las vacunas bebibles es usar plantas GM para producir órganos vegetales (hojas, frutos), extractos crudos (polvo de proteína seca) o proteínas purificadas que en administración oral o parenteral liberen una o más proteínas de manera que disparen la respuesta inmune. Streatfield y Howard, 2003, reportan el desarrollo de distintas vacunas utilizando varios sistemas de producción (hojas, tubérculos, semillas, callos, cloroplastos, expresión transitoria mediada por virus) para control potencial de cerca de diecisiete enfermedades humanas que incluyen entre otras: diarrea, cólera, hepatitis B y C, cáncer y SIDA. Se está investigando en el desarrollo de autoantígenos con el objetivo de incluirlos como parte de terapias de tolerancia oral en el control de enfermedades como artritis, esclerosis múltiple, miastenia y diabetes tipo I, en las cuales el sistema inmune reconoce proteínas propias como extrañas (Sala *et al.*, 2003). Los métodos modernos de biotecnología son capaces de acelerar el desarrollo de productos alimenticios mejorados con una especificidad mayor que con las técnicas convencionales. Por ello, la evaluación de riesgo y los procedimientos para la adopción o rechazo de alimentos GM deben ser cada vez más innovadores (WHO, 2004).

CONCLUSIÓN

La tecnología GM aplicada a agricultura es una realidad en el mundo y en Colombia. No es una tecnología marginalmente utilizada como lo demuestran las cifras: 148 millo-

nes de hectáreas sembradas en 29 países, para diciembre de 2010. Si bien en la actualidad, tiene uso comercial esencialmente en cuatro cultivos (soya, algodón, maíz, colza), con dos características (resistencia a insectos lepidópteros, tolerancia a herbicidas), se ha avanzado hacia la liberación de variedades que contienen varios eventos, piramidando genes mediante el uso de hibridación convencional. Existen esfuerzos de investigación, principalmente de corporaciones multinacionales, para desarrollar métodos para el apilamiento molecular de genes, pero estas pesquisas están apenas en el inicio.

Con relación a los efectos en países subdesarrollos aquí analizados, es posible plantear algunas conclusiones. Es evidente el avance en la adopción de algodón GM en Argentina como resultado de la disminución en costos de producción e incremento en ganancias, si bien al comienzo los altos costos de las semillas hicieron más lenta la velocidad de la adopción. Argentina conjuntamente con Estados Unidos, fueron de los primeros países en adoptar tecnología GM en soya, y hoy más de 90% de la soya sembrada es de este tipo. Brasil ha venido dando pasos de gigante en la apropiación y adopción de tecnología GM, siendo el país que creció más en el pasado año 2009, con más de 4 millones de hectáreas, para un total de 25,4 millones de hectáreas, que lo ubican como subcampeón global en el uso de cultivos GM. Ello lo logra entre otras razones, dado al mejoramiento en los tiempos de gestión en los procesos de estudio de solicitudes de liberación comercial. China, que para 2010 cultivó 3,5 millones de hectáreas, estableció una serie de estrategias para enfrentar los problemas de la apropiación y adopción de tecnología GM: coordinar y concentrar instituciones de investigación, reclutar talentos, atender los temas de bioseguridad y bioética, proteger derechos de propiedad intelectual, estandarizar procesos y fortalecer la cooperación internacional. No hay duda que en este campo, China, será una estrella en el futuro inmediato.

La controversia sobre los cultivos GM es intensa y a veces, acalorada. No es para menos en un asunto donde a la vez intervienen organizaciones ecologistas radicales y corporaciones multinacionales, pasando por organizaciones de productores y consumidores, agencias reguladoras estatales, y organizaciones académicas. Para dar una idea de la complejidad del debate, se buscaron documentos en Google académico (www.scholar.google.com) con las palabras "*risk in transgenic crops*" y se obtuvo el reporte de 32.000 documentos. Por otro lado, se colocó en el buscador general de Google (www.google.com) las palabras "riesgos en cultivos transgénicos", y se obtuvo el reporte de 195.000 documentos. Ambas búsquedas se hicieron el 29 de abril del 2011. Por ello, en este escrito solo se presentan elementos generales de este debate, basándose en riesgos biológicos de un lado, y beneficios ambientales y económicos del otro.

En relación con los riesgos biológicos, estos se pueden resumir en: efectos negativos de proteínas transgénicas sobre especies no blanco y sobre el consumidor humano, flujo de genes desde variedades GM a variedades convencionales y a especies relacionadas, generación de biotipos resistentes de insectos a proteínas transgénicas, impactos sobre la biodiversidad. Más allá del debate sobre si estos riesgos son reales o potenciales, la aprobación de la liberación comercial de variedades transgénicos exige la demostración de que estos organismos no van a causar efectos negativos sobre el ambiente o sobre el consumidor, animal o humano, y sigue los más estrictos principios de bioseguridad. Existen normas internacionales como el protocolo de Cartagena, y normas nacionales en Colombia, como el decreto 4525 de 2005, que regulan esos asuntos.

De otro lado, recientemente se han publicado estudios que hacen el seguimiento por periodos de 12 años, a efectos ambientales y económicos de la aplicación de tecnología GM en agricultura. Tales estudios muestran efectos ambientales positivos que pueden resumirse en disminución del impacto ambiental, en 16,3%, aplicación de herbicidas e insecticidas, resultado de dejar de aplicar 352 millones de ingrediente activo entre 1996 y 2008. Desde el punto de vista económico, las ganancias totales para los agricultores llegaron a 52 mil millones de dólares en el mismo periodo, resultado de la disminución en costos de producción e incremento en producción.

El análisis sobre riesgos y beneficios de la adopción de tecnología GM en agricultura, debe ser realizado sobre conocimiento científico validado, precisamente para evitar ruido excesivo provocado por posiciones fundamentalistas de diverso cuño. Para un país con vocación agrícola como Colombia, tal decisión es estratégica de cara a los retos para la producción agrícola, derivados de grandes efectos ambientales como los producidos por el cambio climático y, de cambios en el ambiente económico, como el que producirá la firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos.

BIBLIOGRAFÍA

AGRO-BIO. Experiencia en Colombia. Estadísticas de cultivos GM. [Citado 3 mar 2011]. Bogotá: Asociación de Biotecnología Vegetal Agrícola; 2009. Disponible en <http://www.agrobio.org/fend/index.php?op=YXA9I2JXbDQmaW09I016UT0=>

ANDOW A, ZWAHLEN C. Assessing Environmental Risks of Transgenic Plants. *Ecol Lett.* 2006;9:196-214.

ANGHARAD MR, GATEHOUSE J, FERRY N, ROMAAN JM, RAEMAEEKERS A. The Case of the Monarch Butterfly: A Verdict is Returned. *Trends Genet.* 2002;18:249-251.

BENNET L, BURKHEAD J, HALE K, TERRY N, PILON M, PILON-SMITS E. Analysis of Transgenic Indian Mustard Plants for Phytoremediation of Metal-contaminated Mine Tailings. *J Environ Qual.* 2003;32:432-440.

BENNETT R, PHIPPS R, STRANGE S, GREY P. Environmental and Human Health Impacts of Growing Genetically Modified Herbicide-Tolerant Sugar Beet: A Life-cycle Assessment. *Plant Biotechnol.* 2004;2:273-278.

BROOKES G, BARFOOT P. Global Impact of Biotech Crops: Environmental Effects, 1996-2008. *AgBioForum* 2010;13(1):76-94.

BRUNNER A, LI J, DIFAZIO S, SHEVCHENKO O, MONTGOMERY B, MOHAMED R, WEI H, MA C, *et al.* Genetic Containment of Forest Plantations. *Tree Genet Genomes.* 2007;3:75-100.

CELIS C, SCURRAH M, COWGILL S, CHUMBIAUCA S, GREEN J, FRANCO J, *et al.* Environmental Biosafety and Transgenic Potato in a Center of Diversity for this Crop. *Nature* 2004;432:222-225.

CERA. GM Crop Database. Center for Environmental Risk Assessment (CERA). [citado 3 de marzo de 2011]. Washington D.C.: ILSI Research Foundation; 2010. Disponible en: http://cera-gmc.org/index.php?action=gm_crop_database.

CERDA H, WRIGHT D. Modeling the Spatial and Temporal Location of Refugia to Manage Resistance in Bt Transgenic Crops. *Agr Ecosyst Environ.* 2004;102:163-174.

CHEN Z, WANG H-G, WEN Z-J, WANG Y. Life Sciences and Biotechnology in China. *Philos Trans R Soc Lon. B.* 2007;362:947-957.

EASTHAM K, SWEET, J. Genetically Modified Organism the Significance of Gene Flow Through Pollen Transfer. Environmental issue report N° 28. Copenhagen: European Environment Agency; 2002.

EDGE JM, BENEDICT JH, CARROLL JP, REDING HK. Bollgard Cotton: An Assessment of Global Economic, Environmental, and Social Benefits. *J Cotton Sci.* 2001;5:1-8.

ELLSTRAND NC. Current Knowledge of Gene Flow in Plants: Implications for Transgene Flow. *Philos Trans R Soc Lond B.* 2003;358:1163-1170.

FISHER R, TWYMAN RM, SCHILLBERG S. Production of Antibodies in Plants and their Use for Global Health. *Vaccine.* 2003;21:820-825.

FRENCH CE, ROSSER SJ, DAVIES GJ, NICKLIN S, BRUCE NC. Biodegradation of Explosives by Transgenic Plants Expressing Pentaerythritol Tetranitrate Reductase. *Nat Biotechnol.* 1999;17:491-494.

GARNIER A, LECOMTE J. Using a Spatial and Stage-structured Invasion Model to Assess the Spread of Feral Populations of Transgenic Oilseed Rape. *Ecol Model.* 2006;194:141-149.

GATEHOUSE J. Biotechnological Prospects for Engineering Insect-Resistant Plants. *Plant Physiol.* 2008;146:881-887.

HALPIN C. Gene Stacking in Transgenic Plants - the Challenge for 21st Century Plant Biotechnology. *Plant Biotechnol. J* 2005;3:141-155.

HERITAGE J. The Fate of Transgenes in the Human Gut. *Nat Biotechnol.* 2004;22:170-172

HORN ME, WOODARD SL, HOWARD JA. Plant Molecular Farming: Systems and Products. *Plant Cell Rep.* 2004;22:711-720.

INICIATIVA PEW SOBRE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA, FUNDACIÓN MÉXICO-ESTADOS UNIDOS PARA LA CIENCIA. Flujo Genético: ¿qué significa para la biodiversidad y los centros de origen. México D.F.: Iniciativa Pew Sobre Alimentos y Biotecnología; 2003.

JAUHAR P. Modern Biotechnology as an Integral Supplement to Conventional Plant Breeding: The Prospects and Challenges. *Crop Sci.* 2006;46:1841-1859.

JIA S, WANG F, SHI L, YUAN Q, LIU W, LIAO Y. Transgene Flow to Hybrid Rice and its Male-sterile Lines. *Transgenic Res.* 2007;16:491-501.

LEE D, NATESAN E. Evaluating Genetic Containment Strategies for Transgenic Plants. *Trends Biotechnol.* 2006;24:109-113.

MENDONÇA-HAGLER L, SOUZA L, ALEIXO L, ODA L. Trends in Biotechnology and Biosafety in Brazil. *Environ Biosafety Res.* 2008;7:115-121.

MONCIARDINI P, PODINI D, MARMIROLI N. Exotic Gene Expression in Transgenic Plants as a Tool for Monitoring Environmental Pollution. *Chemosphere.* 1998;37:2761-2772.

NIBOUCHE S, GUERARD N, MARTIN P, VAISSAYRE M. Modelling the Role of Refuges for Sustainable Management of Dual-gene Bt Cotton in West African Smallholder Farming Systems. *Crop Prot.* 2007;26:828-836.

OBBERDOERFER RB, SHILLITO RD, DE BEUCKELEER M, MITTEN DH. Rice (*Oryza sativa* L.) Containing the Bar Gene is Compositionally Equivalent to the Nontransgenic Counterpart. *J Agric Food Chem.* 2005;53:1457-1465.

OLIVER C, HANKINS J. Future World Leader in GM Crops. *China Bus Ver.* 2007;36-39.

PIMENTEL DS, RAVEN PH. Bt Corn Pollen Impacts on Nontarget Lepidoptera: Assessment of Effects in Nature. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2000;97:8198-8199.

QAIM M, CAP EJ, DE JANVRY A. Agronomics and Sustainability of Transgenic Cotton in Argentina. *AgBioForum.* 2003;6:41-47.

QUE Q, CHILTON MD, DE FONTES M, HE C, NUCCIO M, ZHU T, *et al.* Trait Stacking in Transgenic Crops: Challenges and Opportunities. *GM Crops.* 2010;1:1-10.

REGAL PJ. Scientific Principles for Ecologically Based Risk Assessment of Transgenic Organisms. *Mol Ecol.* 1994;3:5-13.

RUGH CL. Genetically Engineered Phytoremediation: One Man's Trash is Another Man's Transgene. *Trends Biotechnol.* 2004;22:496-498

RUGH CL, MEAGHER RB, BIZILY SP. Phytodetoxification of Hazardous Organomercurials by Genetically Engineered Plants. *Nat Biotechnol.* 2000;18:213-217.

SALA F, RIGANO M, BARBANTE A, BASSO B, WALMSLEY A, CASTIGLIONE S. Vaccine Antigen Production in Transgenic Plants: Strategies, Gene Constructs and Perspectives. *Vaccine.* 2003;21:803-808.

SCHILLBERG S, FISCHER AR, EMANS N. Molecular Farming of Recombinant Antibodies in Plants. *Cell Mol Life Sci.* 2003;60:433-445.

SCOTT HS, SAMPSON A. Food allergy. *J Allergy Clin Immunol.* 2006;117:S470-5.

SINGH OV, GHAI S, PAUL D, JAIN RD. Genetically Modified Crops: Success, Safety Assessment, and Public Concern. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2006;71:598-607.

STANLEY-HORN D, DIVELY GP, HELLMICH RL, MATTILA HR, SEARS MK, ROSE R, *et al.* Assessing the Impact of Cry1Ab-expressing Corn Pollen on Monarch Butterfly Larvae in Field Studies. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2001;98:11931-11936.

STREATFIELD S, HOWARD JA. Plant-based Vaccines. *Int J Parasitol.* 2003;33:479-493.

TRIGO E, CAP E. Diez años de cultivos genéticamente modificados en la agricultura argentina. Buenos Aires: Consejo Argentino para la Información y el Desarrollo de la Biotecnología (Argenbio); 2006

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION). Modern Food Biotechnology, Human Health and Development: An Evidence-based Study. Geneva: World Health Organization; 2004.

WILLIAMS GM, KROES R, MUNRO IC. Safety Evaluation and Risk Assessment of the Herbicide Roundup and its Active Ingredient, Glyphosate, for Humans. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2000;31:117-165.

WINDELS P, TAVERNIERS I, DEPICKER A, VAN BOCKSTAELE E, DE LOOSE M. Characterization of the Roundup Ready Soybean Insert. *Eur Food Res Technol.* 2001;213:107-112.

WISNIEWSKY JP, FRANGNE N, MASSONNEAU A, DUMAS C. Between Myth and Reality: Genetically Modified Maize, an Example of a Sizeable Scientific Controversy. *Biochimie.* 2002;84:1095-1103.