

La seguridad medioambiental de los cultivos transgénicos a la luz de la experiencia internacional

Resumen

El desarrollo comercial de cultivos transgénicos se ha caracterizado por un continuo proceso de innovación, incorporando las semillas nuevas características genéticas que permiten mejoras de rendimientos, al tiempo que ha ido aumentando la superficie cultivada, así como el número de países adoptantes. Desde el punto de vista medioambiental, los hipotéticos riesgos que se pudieran derivar de su siembra relativos al impacto en organismos no diana e incorporación de transgenes en parientes silvestres son evaluados minuciosamente antes de su liberación y sólo son autorizados aquellos cultivos que cumplen con un estricto estándar de seguridad. Tras casi quince años de siembra comercial, existe una total unanimidad sobre la carencia de efectos adversos de los eventos que están siendo comercializados.

M. Mercedes
Teruel Moreno

Doctora en CCEE
Fundación Cajamar

Gonzalo
Sanz-Magallón
Rezusta

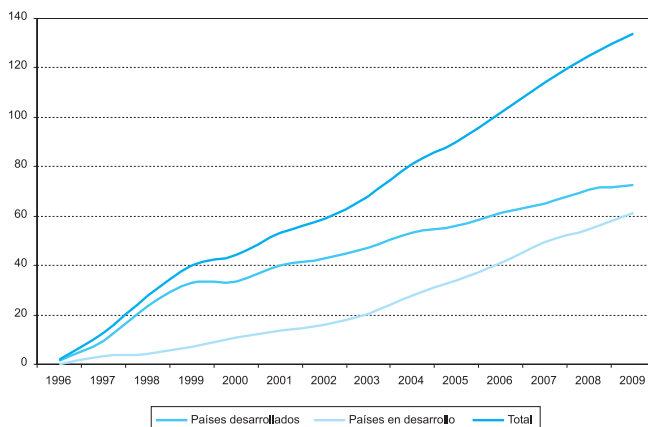
Doctor en CCEE
Universidad
CEU-San Pablo

1. Introducción

Desde que en 1996 se empezaran a sembrar los primeros OMG (organismos modificados genéticamente) a escala comercial, la superficie mundial dedicada a estos cultivos ha mostrado una trayectoria ascendente hasta alcanzar la cifra de 134 millones de hectáreas en 2009. A lo largo de este periodo el ritmo de crecimiento ha sido más acelerado en los países en desarrollo, a una tasa de variación anual media del 63,9% frente al 34,1% de los países desarrollados. De esta forma, si en 1996 las economías emergentes acapararon el 5,9% de la superficie cultivada, en 2009 la citada cuota fue del 45,9%.

De estas cifras se deduce que los avances que brinda la biotecnología vegetal moderna no sólo se dirigen a los productores de las economías más industrializadas, sino también a los agricultores en países con menores recursos económicos. Como ejemplo, se puede citar el caso de India, que desde que adoptó el algodón Bt (*Bacillus thuringiensis*) en 2002, la tasa de adopción se ha multiplicado exponencialmente, pasando de algo menos del 1 al 81,2% en 2008. Igualmente cabe citar que tanto la reducción del uso de pesticidas en aquel país como el incremento del rendimiento del algodón durante los últimos años han estado asociados a la adopción de variedades modificadas genéticamente (MG) autoprotegidas frente a insectos (ISAAA, 2009).

Gráfico 1.
Evolución de la superficie mundial de cultivos transgénicos (1996-2009). En millones de hectáreas



Fuente: *International for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA)* (varios años).
Elaboración propia.

Por lo que respecta a su seguridad, los *eventos* transgénicos actualmente disponibles en el mercado han sido evaluados rigurosamente por las agencias encargadas de su autorización, careciendo de efectos adversos en el medio ambiente y en la salud¹. En este sentido, es oportuno mencionar las conclusiones aportadas por la Comisión Europea sobre la seguridad de los OMG a partir de los resultados alcanzados en 81 proyectos científicos llevados a cabo por un amplio número de grupos de trabajo en distintos países de la UE durante quince años (1985-2000)²:

- a) En base a las evidencias científicas existentes, tanto los cultivos MG como los productos derivados de los mismos que han sido aprobados para su comercialización no presentan riesgos añadidos para la salud humana ni el medio ambiente respecto a los convencionales.
- b) El hecho de haber sido empleada una tecnología más precisa, junto con la existencia de una reglamentación específica, hace que los cultivos MG y los alimentos producidos a partir de aquellos sean igual o más seguros en relación a los convencionales.
- c) Los beneficios asociados de los cultivos MG y sus productos derivados son cada vez más inequívocos para la salud y el medio ambiente.

¹ Los dictámenes científicos de los cultivos transgénicos autorizados en la UE pueden consultarse en http://www.efsa.europa.eu/EFSA/efsa_locale-1178620753812_ScientificDocuments.htm

² Kessler y Economidis, eds. (2001); Dirección General de Investigación de la Comisión Europea (2001).

2. La adopción de variedades MG para una mejora de la sostenibilidad medioambiental y de la productividad agrícola

Con el transcurso del tiempo el hombre ha desarrollado nuevos procedimientos para atender las necesidades de alimentos de una población cada vez mayor. Tradicionalmente, la ampliación de superficie ha sido el principal componente del incremento de la producción agrícola. Sin embargo, desde los años cuarenta del siglo pasado, tal progresión ha estado impulsada por varios factores: el paulatino aumento de la mecanización de las tareas agrícolas, la mayor aplicación de insumos en los cultivos (López Bellido, 1998: 20) y la mejora genética.

En este contexto nació la Revolución Verde en la década de los cuarenta (ORTIZ *et al.*, 2007), aconteciendo el despegue de la misma transcurridos veinte años gracias a la labor realizada por el fitopatólogo estadounidense Norman Ernest Borlaug y los investigadores del Instituto Internacional de Investigación sobre el Arroz (IRRI). Los logros alcanzados permitieron obtener variedades de cereales básicos (arroz y trigo) mediante mejora genética convencional, altamente productivas, que respondían de forma satisfactoria a la aplicación de importantes cantidades de insumos (agua, fertilizantes y fitosanitarios).

Esta Revolución tuvo continuidad con la creación de diversos centros de investigación en distintos países en desarrollo (Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT], Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA) y Centro Internacional de la Papa [CIP])³, los cuales se integraron en el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR)⁴ junto con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) e IRRI.

Las enseñanzas aprendidas de la Revolución Verde son evidentes, aunque por un lado ha impulsado notablemente la producción de alimentos básicos en el Tercer Mundo, esencialmente en América Latina y Asia, por otro lado, ha generado ciertas alteraciones medioambientales motivadas por el empleo del monocultivo junto con el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas.

De igual modo, el actual sistema productivo agrícola convencional requiere de importantes cantidades de productos fitosanitarios para hacer frente a las significativas mermas ocasionadas por organismos que originan enfermedades y plagas en

³ El CIAT y el IITA entraron en funcionamiento en 1967, mientras que el CIP fue inaugurado en 1971.

⁴ El CGIAR se creó en 1971 con el objetivo de promover la investigación agrícola en los países en desarrollo para aumentar la productividad de los cultivos, reducir la inseguridad alimentaria e incrementar los ingresos de los agricultores. Su financiación proviene de naciones, organismos supranacionales e instituciones sin ánimo de lucro.

los cultivos, ocasionando importantes pérdidas en las cosechas, que en el caso de los cereales pueden superar el 23% a nivel mundial (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2009).

Así pues, varios son los aspectos que deben ser considerados: i) el reconocimiento del deterioro medioambiental que genera el sistema de producción agrícola convencional; ii) el crecimiento de la población mundial, que según las predicciones de tendencias actuales, será del orden de un 17% en 2030 en relación a 2015; y, iii) el factor restrictivo referente a la productividad de cultivos básicos. Tal y como se desprende del Gráfico 1, el rendimiento de los cereales entre 2000 y 2008 ha mostrado un retroceso relativo respecto a periodos anteriores en determinadas áreas geográficas, particularmente en África y Caribe. En este sentido, la FAO ha expresado que en un futuro esta tendencia continuará en algunas regiones (FAO, 2009).

Para alimentar a una población mundial en continuo crecimiento y teniendo en cuenta que para 2020 alrededor del 85% de la misma estará localizada en regiones donde existen problemas de inseguridad alimentaria, constituyendo la agricultura una actividad básica como fuente de alimentos e ingresos, resulta primordial no sólo mejorar la productividad de los cultivos sino también su contenido nutricional, de tal forma que incorporen altos niveles de micronutrientes. A este respecto, la FAO ha declarado que será necesario la adopción de tecnologías para afrontar determinados problemas como la escasez de agua o las pérdidas postcosecha (FAO, 2009).

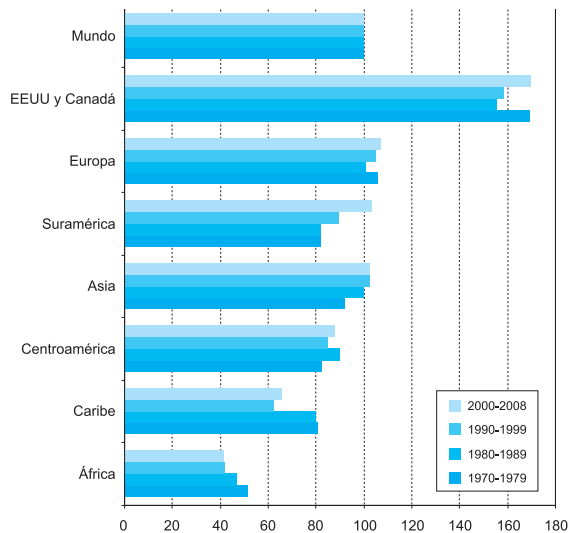
Tabla 1.

Proyecciones de la población mundial por zonas geográficas (2015-2040). En miles de personas

Zona geográfica	2015	2020	2025	2030	2035	2040	% var. 2040/2015
Asia	4.390.603	4.596.256	4.772.523	4.916.701	5.032.489	5.125.326	16,7
África	1.153.038	1.276.369	1.400.184	1.524.187	1.647.781	1.769.615	53,5
Latinoamérica y Caribe	618.486	645.543	669.533	689.859	706.148	718.034	16,1
Europa	734.000	732.952	729.264	723.373	716.190	708.489	-3,5
Norteamérica	367.956	383.384	397.522	410.204	421.477	431.490	17,3
Oceanía	38.104	40.329	42.507	44.572	46.485	48.242	26,6
Total	7.302.187	7.674.833	8.011.533	8.308.896	8.570.570	8.801.196	21,0

Fuente: ONU. Elaboración propia.

Gráfico 2. Evolución de la productividad relativa de los cereales en diferentes regiones del mundo (índice 100 = medias del mundo 1970-1979; 1980-1989; 1990-1999; 2000-2008). En kg/ha



Fuente: FAOSTAT. Elaboración propia.

En este contexto, las plantas transgénicas pueden desempeñar un papel relevante en la agricultura del siglo XXI. De entre las principales ventajas que aportan, caben destacarse las siguientes: resistencia tanto a organismos diversos como a condiciones ambientales desfavorables, tolerancia a herbicidas, absorción más eficaz de los nutrientes o mejora de la calidad de los productos agrícolas.

a) Plantas resistentes a organismos consumidores de vegetales y agentes infecciosos, o también denominados *estreses bióticos*

Son muchos los organismos potencialmente nocivos para las plantas, distinguiéndose entre agentes infecciosos (bacterias, hongos, nematodos y virus) que provocan enfermedades y organismos consumidores de vegetales (ácaros e insectos), responsables de causar plagas. Ambos tienen la capacidad de interferir en el proceso de desarrollo de un cultivo, provocando pérdidas en las cosechas.

La actual disponibilidad comercial de semillas transgénicas resistentes a los mencionados organismos queda limitada a los cultivos Bt que presentan autoprotección frente a determinados insectos. Concretamente, se caracterizan por incorporar uno o más genes procedentes de una bacteria localizada de forma natural en el suelo (*Bacillus thuringiensis*, Bt) que codifican proteínas con capacidad insecticida (Cry o delta-endotoxinas), las cuales controlan selectivamente determinados insectos. Cuando éstos se encuentran en estado larvario y empiezan a alimentarse de los tejidos vegetales de la planta, la proteína se une al revestimiento intestinal liberando unas toxinas que provocan la parálisis del sistema digestivo y la posterior muerte de las orugas.

La opción de sembrar semillas transgénicas resistentes a este tipo de organismos perjudiciales reporta beneficios medioambientales ya que se logra disminuir el uso de tratamientos fitosanitarios; económicos (menor cantidad de insumos, menor número de horas dedicadas a la aplicación de agroquímicos y aumentos en la productividad), así como beneficios para la salud de los trabajadores (menor exposición a productos fitosanitarios).

Realizando una valoración de las características de este tipo de cultivos hay que distinguir entre maíz y algodón:

Maíz Bt resistente contra determinados insectos lepidópteros (o barrenadores)

El maíz Bt (evento MON810) resistente a determinados insectos lepidópteros ofrece autoprotección contra las orugas *Ostrinia nubilalis*, *Sesamia nonagrioides* y *Diatraea grandiosella*⁵, que causan importantes pérdidas económicas en los campos de maíz⁶. El número de generaciones de estas especies por año varía dependiendo de la zona geográfica, aunque suele haber al menos dos generaciones.

Los taladros o barrenadores, nombre común por el que se conoce a este tipo de insectos, dañan diferentes tejidos vegetales (hojas, cañas y mazorcas) a lo largo de todo el ciclo fenológico del cultivo ocasionando pérdidas de distinta índole en función de la intensidad de las plagas y de la fase de desarrollo en la que se encuentren las plantas. De este modo, se pueden distinguir tres tipos de pérdidas:

⁵ A estas orugas se las conoce también respectivamente con los nombres de barrenador europeo, mediterráneo y del Suroeste del maíz.

⁶ El evento Bt 1507 no sólo aporta autoprotección frente a las citadas orugas sino también contra un número más amplio de otros insectos lepidópteros.

- Si las plagas atacan las plantas de maíz en los primeros estadios de crecimiento del cultivo pueden causar la muerte de muchas de ellas. Cabe matizar que estos daños son causados por *S. nonagrioides* y *D. grandiosella*.
- Las larvas se desarrollan en el interior de las cañas de maíz excavando galerías de alimentación que disminuyen la capacidad productiva de las plantas y debilitan la resistencia de los tallos. Como resultado, es muy frecuente la rotura total o parcial de los mismos generando en muchas ocasiones la caída de las mazorcas al suelo, lo que implica que no puedan ser recogidas por la cosechadora.
- Las larvas se alimentan de los granos de maíz tiernos ocasionando no sólo pérdidas cuantitativas sino también cualitativas ya que las vías de entrada que dejan en las mazorcas son aprovechadas por determinados tipos de hongos para infectar los restantes granos.

La opción de sembrar el cultivo transgénico presenta importantes ventajas ya que las plantas disponen de autoprotección en todo el ciclo de su desarrollo, contribuyendo a mejorar la calidad del grano cosechado desde el punto de vista sanitario ya que se reducen los niveles de micotoxinas⁷. Diferentes estudios científicos han constatado que la ingesta de pienso contaminado con fumonisinas⁸ es causa de enfermedades letales en animales (edema pulmonar en el ganado porcino o leucoencefalomalacia en los equinos; Kershner, 2006: 199)⁹.

En los seres humanos, el consumo continuado de maíz contaminado con fumonisinas constituye un alto factor de riesgo para desarrollar cáncer de esófago y defectos congénitos del tubo neural (Kershner, 2006; 199; 202-203) ya que en este último caso interfiere en la absorción de ácido fólico, vitamina que ayuda a prevenir malformaciones del cerebro y de la médula espinal durante el periodo de gestación.

De este modo, el cultivo del maíz Bt autoprotegido contra barrenadores aumenta la calidad del grano repercutiendo directamente en la seguridad del maíz para la fabricación de alimentos y piensos.

⁷ Son unos compuestos tóxicos producidos por algunos hongos. Una de las principales vías de entrada de hongos en las plantas de maíz es a través de las heridas que producen en las mazorcas las mordeduras de los insectos al alimentarse de los granos.

⁸ Son un tipo de micotoxinas producidas por determinados hongos del género *Fusarium*.

⁹ La leucoencefalomalacia es una enfermedad neurológica degenerativa que provoca la muerte de los equinos.

Por último, es conveniente resaltar que la alternativa de usar insecticidas para combatir los barrenadores resulta poco eficaz debido a los hábitos endófitos de las larvas, aspecto que dificulta asimismo la acción de los depredadores y parasitoides.

Maíz Bt resistente al gusano de la raíz

El gusano de la raíz del maíz conocido científicamente con el nombre de *Diabrotica* spp. es una plaga grave en Norteamérica, especialmente en EEUU. Dentro de este género de insectos coleópteros se distinguen distintas subespecies: *Diabrotica virgifera virgifera*, *Diabrotica barberi*, *Diabrotica virgifera zea* y *Diabrotica undecimpunctata howardi*¹⁰, entre las cuales el número de generaciones por año es variable, alcanzando un único ciclo de vida en el caso de las tres primeras y de dos a tres generaciones la última de las especies mencionadas.

En lo que respecta a los efectos que causan los citados insectos, los más dañinos se producen cuando se encuentran en estado larvario ya que empiezan alimentándose de pequeñas raíces, reduciendo su capacidad para absorber agua o nutrientes, y posteriormente excavan galerías internas en aquellas otras principales. Ante un ataque severo, los citados daños llegan a afectar la base del tallo, lo que motiva su debilitamiento. Los síntomas visibles de estas secuelas se muestran cuando la planta presenta una altura de entre 20 y 50 cm, y dependiendo de varios factores como la presión de las plagas o el nivel de humedad y fertilidad del suelo¹¹, las consecuencias son de distinta índole: i) plántulas raquíticas que no se han desarrollado; ii) plantas que muestran un retraso en su crecimiento aunque llegarán a ser productivas pero deficientemente, no estando a su vez la base del tallo debilitada; y iii) plantas que presentan un retraso en su crecimiento, rendirán por debajo de su capacidad potencial y la base del tallo se encuentra debilitada.

El hecho de que la base del tallo esté debilitada debido a la intensidad de las plagas significa que en el desarrollo de las plantas los tallos se doblarán a una altura próxima al suelo y crecerán volcados. Las consecuencias de este efecto son: i) disminución de la capacidad productiva; y ii) las tareas de recolección mecánica se hacen muy difíciles, existiendo una merma de la cuantía cosechada.

¹⁰ A estas especies se les conoce de forma más común, y siguiendo el mismo orden, con los nombres de plaga del gusano de la raíz del Oeste, del Norte, mejicana y del Sur.

¹¹ A mayor nivel de humedad y fertilidad del suelo, la planta dispone de una mayor capacidad para regenerar las raíces.

Por otro lado, cuando estos insectos presentan un estado adulto (escarabajos) se alimentan de las hojas, de los pistilos de la flor y del polen del maíz, si bien los daños más intensos en el cultivo afectan a estos dos últimos casos ya que interfieren en la polinización y posterior formación de los granos, dando como resultado menos mazorcas y las que finalmente se desarrollan tienen granos más pequeños. También puede ocurrir que se formen mazorcas con pocos granos de gran tamaño.

En el caso de elegir semillas convencionales, para combatir estas plagas es necesario emplear un insecticida de suelo cuya efectividad es reducida ya que depende no sólo de sus propiedades físico-químicas (toxicidad, solubilidad en el agua y volatilidad), sino también de la acción simultánea de los siguientes factores:

- Es necesario que su aplicación sea en un momento muy próximo a la eclosión de los huevos. En la práctica se aplica cuando se siembra, que en teoría es temporalmente casi coincidente con el brote de las plagas.
- El suelo no debe presentar una temperatura muy cálida ni un excesivo nivel de humedad ya que disminuiría la capacidad insecticida del producto fitosanitario.

Como alternativa al uso directo de insecticida aplicado al suelo, se puede optar por cultivar una semilla adecuadamente tratada cuya eficacia es mayor. No obstante, su efectividad decrece ante un ataque intenso de las plagas.

De este modo, la opción de cultivar plantas transgénicas resistentes al gusano de la raíz proporciona beneficios para el medio ambiente, ya que se dejan de aplicar insecticidas; y económicos, como consecuencia del aumento de la productividad en zonas donde la presión de las plagas controladas por la tecnología es significativa.

Algodón Bt

Las variedades de algodón Bt de segunda generación protegen las plantas frente a diferentes orugas, entre las que se encuentran *Alabama argillaceae*, *Earias insulana*, *Helicoverpa armigera*, *Helicoverpa gelotopoeon*, *Helicoverpa zea*, *Heliothis virescens*, *Pectinophora gossypiella* y *Spodoptera frugiperda*, las cuales producen distintos daños en el cultivo:

- Las orugas *E. insulana*, *H. gelotopoeon*, *H. zea*, *H. viresens* y *S. frugiperda*, en ataques tempranos y ante la ausencia de botones florales y cápsulas¹² que todavía no se han formado, se alimentan de los brotes tiernos de la planta. Cuando el brote afectado es el terminal, o también denominado apical, es decir, aquel que va guiando el crecimiento de la planta, se desarrollan bifurcaciones de ramas vegetativas generándose yemas laterales que asumen una función reproductiva. Fruto de esta ramificación, las plantas muestran un retraso en su ciclo fenológico. Si las orugas se alimentan de los brotes laterales, se activan yemas en la misma rama y, aunque la planta no detiene su crecimiento, presenta un retardo.
- Por su parte, *A. argillaceae* es consumidora sólo de hojas, si bien no se trata de una plaga exclusiva del algodón. La magnitud del daño que produce depende de la intensidad del ataque pudiendo ocasionar mermas severas en la producción, tanto en términos cuantitativos como cualitativos si la defoliación es intensa. En consecuencia, los parámetros finales de calidad de la materia prima se ven reducidos: fibras poco resistentes con pérdida de volumen y semillas inmaduras que muestran bajo contenido para la extracción de aceite o mala capacidad de germinación, en el caso este último que sean destinadas a una futura siembra.
- Las orugas *E. insulana*, *H. armiguera*, *H. gelotopoeon*, *H. zea*, *H. viresens* y *P. gossypiella* se introducen en las cápsulas antes de que éstas se abran sirviéndoles de alimento y provocando daños en el cultivo que se manifiestan en un deterioro de la producción y de la calidad de la fibra. Adicionalmente, en el caso de que ocurra un ataque a cápsulas pequeñas, puede producirse la caída de las mismas.

Estos últimos insectos, además de alimentarse de cápsulas, también tienen como fuente nutritiva los botones florales. La consecuencia directa de este daño se refleja en una prolongación del ciclo del cultivo, pues la planta de algodón disminuida en su capacidad productiva intenta compensar las pérdidas emitiendo más flores y cápsulas, dilatándose de este modo su ciclo de desarrollo.

Por otro lado, las vías de entrada que dejan estas orugas en las cápsulas permiten la proliferación de agentes infecciosos contribuyendo a desvirtuar aún más la calidad de la fibra, e incluso, pueden ocasionar la muerte de la cápsula por pudrición.

¹² El botón floral es el órgano reproductor de la planta. Una vez que se ha abierto, la flor es polinizada dando como resultado un fruto denominado cápsula cuya forma es ovoide. Cuando ésta se encuentra suficientemente madura, se abre y es visible la fibra del algodón.

La opción de usar insecticidas sólo es efectiva cuando los insectos están en contacto exterior con las plantas, pero no en el caso de las orugas capulleras debido a sus hábitos endófitos, excepto si se realizan muy buenos monitoreos cuando las larvas son jóvenes y no han penetrado en las cápsulas, lo que exige un incremento en labores.

b) Resistencia de las plantas a condiciones ambientales adversas o estreses abióticos

Las plantas pueden estar sometidas a condiciones ambientales adversas a causa del frío, el calor, la salinidad o la sequía, constituyendo factores restrictivos de la productividad agrícola. En el último caso citado, el desarrollo de cultivos transgénicos tolerantes a un escaso aporte de agua resulta de especial interés en regiones donde la disponibilidad del recurso hídrico es reducida.

c) Plantas tolerantes a herbicidas

Las malas hierbas que emergen del suelo luchan por ocupar el mismo espacio que el cultivo, compitiendo con éste por recursos como el agua, la luz o los nutrientes, lo que dificulta su normal crecimiento y, consecuentemente, limita su productividad. Mediante la biotecnología vegetal moderna es posible desarrollar plantas MG tolerantes a determinados herbicidas, las cuales admiten la aplicación de estos fitosanitarios para controlar un amplio espectro de malas hierbas una vez que el cultivo ha emergido y sin dañarlo.

Los beneficios del uso de esta tecnología se ponen de manifiesto en los siguientes aspectos:

- El hecho de poder emplear herbicidas de amplio espectro (principalmente glifosato o glufosinato de amonio¹³) en lugar de los tradicionales, una vez que el cultivo ha brotado, facilita una reducción de las labores mecánicas adicionales para eliminar las posibles malas hierbas que hayan quedado tras la aplicación del herbicida.
- Al emplear herbicidas de reducido impacto medioambiental se fomenta la agricultura de conservación, es decir, se sustituyen labores mecánicas por herbicidas sin efecto residual.

¹³ El glifosato es el ingrediente activo del herbicida *Roundup Ready*; el glufosinato de amonio es el ingrediente activo del herbicida *Liberty Link*.

Tabla 2.
Principales dictámenes científicos sobre la seguridad medioambiental de los ingredientes activos glifosato y glufosinato de amonio

Autor	Título
Agriculture Canada (1991)	<i>Pre-Harvest Use of Glyphosate Herbicide</i>
US Environmental Protection Agency (1993)	<i>Reregistration Eligibility Decision (RED). Glyphosate</i>
Organización Mundial de la Salud (1994)	<i>Environmental Health Criteria nº 159. Glyphosate</i>
Giesy, Dobson y Solomon (2000)	<i>Ecotoxicological Risk Assessment for Roundup Herbicide</i>
English Nature (2003)	<i>The Herbicide Handbook: Guidance on the Use of Herbicides on Nature Conservation Sites</i>

Las valoraciones realizadas por diferentes instituciones reflejan que tanto el glifosato como el glufosinato de amonio presentan un mínimo impacto en el medio ambiente y una rápida degradación tanto en el suelo como en el agua (Tabla 2).

d) Plantas capaces de absorber más eficazmente los nutrientes

Una cantidad importante del fósforo y del nitrógeno aplicado a los cultivos no es absorbida por la planta de forma eficaz, por lo que queda inutilizada, siendo un factor de contaminación de las aguas subterráneas por lixiviación¹⁴. La posibilidad de cultivar plantas transgénicas capaces de aprovechar mejor este tipo de nutrientes permite reducir la aportación de éstos.

e) Mejora de la calidad de los productos agrícolas

En este sentido, los objetivos de la biotecnología vegetal moderna se dirigen a prolongar la vida postcosecha de los frutos e incrementar su valor nutritivo. Especial importancia tiene el desarrollo de cultivos transgénicos enriquecidos en micronutrientes ya que permiten mejorar las deficiencias nutricionales existentes en los países menos desarrollados donde la base de la dieta está sustentada en unos pocos alimentos.

¹⁴ La lixiviación es el proceso de lavado del suelo por la filtración del agua, lo que provoca que las capas superiores del suelo pierdan compuestos solubles como los nutrientes, arrastrados por el efecto del agua.

3. Evidencias científicas sobre la seguridad medioambiental de los cultivos transgénicos

Uno de los principales aspectos que a menudo se expresa en contra de los cultivos transgénicos es el relativo a los posibles efectos desfavorables que pudieran tener en organismos no diana. A este respecto, resulta conveniente presentar las principales investigaciones científicas realizadas hasta la fecha sobre los efectos medioambientales de los cultivos Bt que se encuentran recopiladas en tres publicaciones:

a) Diez artículos compilados en *Environmental Entomology* (VVAA, 2005) muestran los resultados de varios estudios de campo realizados en EEUU sobre el impacto de los cultivos Bt (algodón y maíz) en insectos no diana, constituyendo una de las evaluaciones científicas más completa realizada hasta el momento sobre este tema.

Estos estudios, que en su mayoría se llevaron a cabo durante tres años, ponen de manifiesto la ausencia de efectos tóxicos de los cultivos transgénicos en insectos no objetivo respecto a los convencionales.

Asimismo, algunas de estas investigaciones (Head *et al.*, 2005; Whitehouse *et al.*, 2005; Bhatti *et al.*, 2005a; Bhatti *et al.*, 2005b) revelan que en los campos donde se sembró el cultivo convencional y se emplearon insecticidas existió una menor abundancia poblacional de algunas clases de insectos respecto a los campos transgénicos.

b) Romeis *et al.* (2006) llevaron a cabo una exhaustiva revisión de los estudios realizados a nivel internacional sobre el impacto medioambiental de los cultivos Bt. En lo referente a las investigaciones de campo, los resultados confirman que estos cultivos no tienen consecuencias negativas en la abundancia poblacional de insectos no objetivo.

También resulta de interés exponer las conclusiones aportadas por las investigaciones incluidas en la publicación de Romeis *et al.* (2006) sobre el impacto medioambiental del maíz Bt en España:

a) Pons y Starý (2003) analizaron las interacciones en la cadena tritrófica entre planta, áfidos y parasitoides de áfidos en varios campos experimentales situados en la provincia de Lleida durante el bienio 2001-2002, los cuales fueron sembrados con maíz (Bt y convencional), alfalfa y trigo. Por lo que respecta al maíz, el cultivo transgénico autoprotegido contra la plaga del taladro no representó una merma en la composición poblacional de ambos tipos de insectos.

b) De La Poza *et al.* (2005) llevaron a cabo una investigación de carácter experimental entre 2000 y 2002 en campos de maíz Bt resistente a barrenadores y convencional localizados en Lérida y Madrid con objeto de identificar posibles efectos adversos producidos por el cultivo transgénico en artrópodos depredadores. Los resultados obtenidos reflejaron que el maíz Bt es compatible con los citados insectos.

Otros estudios publicados en 2008 y contextualizados igualmente en España (Álvarez-Alfageme *et al.*, 2008; Farinós *et al.*, 2008), han constatado que el cultivo del maíz Bt no ejerce un impacto negativo en la entomofauna.

En definitiva, la experiencia acumulada en España con el cultivo del maíz Bt tras doce años de siembra comercial permite concluir que no se han detectado efectos negativos sobre la abundancia y diversidad de insectos artrópodos en las parcelas del cultivo transgénico (Castañera *et al.*, 2010).

c) El informe *Biological and Ecological Evaluation Towards Long-term Effects* (Beetle, Bartsch *et al.*, 2009) publicado por la Oficina Federal Alemana de Protección al Consumidor y Seguridad Alimentaria examina los potenciales efectos de los cultivos transgénicos a largo plazo en la salud y el medio ambiente a partir de los resultados aportados por un extenso número de publicaciones científicas. En el último ámbito especificado, tras revisar más de 700 y haber contado con la aportación de 100 expertos, se concluye que el riesgo de los cultivos Bt en organismos no diana es de mínimo a despreciable.

Por otro lado, la US Environmental Protection Agency (2001) realizó una valoración sobre los cultivos Bt analizando los efectos directos en especies no objetivo. Las conclusiones alcanzadas fueron las siguientes¹⁵:

- a) La evidencia científica aporta datos suficientes para determinar que las proteínas Cry no tienen consecuencias adversas en la fauna no objetivo o en los invertebrados beneficiosos.
- b) Los resultados de los estudios científicos de campo publicados sobre los cultivos Bt y de aquellos sometidos al dictamen de la US Environmental Protection Agency en condiciones de liberación voluntaria al medio ambiente muestran un nivel de riesgo mínimo a indetectable en las poblaciones de insectos no diana.

¹⁵ US Environmental Protection Agency (2001), pp. IIC83-IIC84.

- c) Los cultivos Bt pueden contribuir a reducir el impacto negativo en organismos no objetivo respecto a los convencionales ya que, bajo circunstancias normales, requieren de menos aplicaciones pesticidas repercutiendo este hecho positivamente en las poblaciones de los citados organismos. Pues, muchos de los insectos beneficiosos realizan una importante labor en el control de plagas secundarias.

En la misma línea se ha pronunciado la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), que es la institución científica de referencia encargada de determinar los riesgos alimentarios y medioambientales para la autorización de cultivos transgénicos en la Unión Europea, durante el proceso de renovación del maíz MON810¹⁶.

4. Conclusiones

Los beneficios de la adopción de los cultivos transgénicos pueden ser clasificados en cuatro tipos: económicos, medioambientales, sanitarios y sociales.

a) Beneficios económicos

Los cultivos transgénicos presentan una mayor productividad frente a sus homólogos convencionales en circunstancias de presión media a alta de insectos controlados por la tecnología y/o de malas hierbas. Por su parte, los cultivos MG tolerantes a herbicidas contribuyen a aminorar el gasto en el manejo mecánico de la maleza una vez que la plántula ha emergido y ha sido aplicado el herbicida, ya que existe una tendencia a reducir labores mecánicas.

b) Beneficios medioambientales

En función del cultivo MG se pueden distinguir dos tipos de beneficios medioambientales (Acworth *et al.*, 2008; pp. 15-16):

¹⁶ http://www.efsa.europa.eu/EFSA/efsa_locale-1178620753812_1211902628240.htm

- **Cultivos Bt.** Posibilitan una reducción del uso de pesticidas los cuales pueden ejercer un efecto negativo en la abundancia poblacional de insectos no objetivo de la tecnología Bt (Marvier *et al.*, 2007).
- **Cultivos MG tolerantes a herbicidas.** Permiten sustituir herbicidas convencionales por otros cuya agresividad en el agroecosistema es inferior. Asimismo, su siembra favorece la agricultura de conservación.

c) Beneficios en la salud

Los cultivos transgénicos contribuyen a disminuir el nivel de exposición de los agricultores a los productos fitosanitarios de síntesis química, al menos los que tienen un nivel de toxicidad más alto para el ser humano y, de este modo, se reducen los posibles efectos perjudiciales que pudieran ejercer en la salud de los aplicadores. De hecho, distintos estudios reflejan la relación directa entre la manipulación prolongada de pesticidas y la posibilidad de padecer enfermedades neurodegenerativas (Ascherio *et al.*, 2006; Dick *et al.*, 2007; Engel *et al.*, 2001).

En cuanto a los cultivos MG autoprotectidos contra insectos, en el caso del maíz Bt resistente a barrenadores, su siembra está asociada a la existencia de un menor nivel de micotoxinas en los granos transgénicos respecto al cultivo convencional, aspecto que ha quedado constatado en diferentes publicaciones. Sirva como ejemplo, los estudios de campo realizados en Iowa (EEUU) entre 1994 y 1997 por investigadores del US Department of Agriculture y la Iowa State University, quienes determinaron que los granos de maíz Bt contenían un menor nivel de fumonisinas respecto a los híbridos convencionales (Munkvold, Hellmich y Rice, 1999; Munkvold, Hellmich y Showers, 1997). Esta conclusión ha sido presentada en otras investigaciones realizadas en EEUU (Hammond *et al.*, 2004); Alemania (Papst *et al.*, 2005); Italia (Masoero *et al.*, 1999); Francia y España (Bakan *et al.*, 2002).

d) Beneficios sociales

Los cultivos transgénicos contribuyen a mejorar la renta de los agricultores y pueden aportar un elevado contenido en micronutrientes, siendo esta característica de notable importancia en los países pobres donde la base de la dieta está sustentada en unos pocos alimentos. Por último, también resulta de interés la posibilidad de obtener productos a partir de cultivos MG que sean más cardiosaludables.

Tabla 3. Beneficios económicos, medioambientales, sanitarios y sociales de la adopción de cultivos transgénicos

BENEFICIOS ECONÓMICOS	BENEFICIOS MEDIOAMBIENTALES
* Cultivos Bt	* Cultivos Bt
<ul style="list-style-type: none"> - Mayor productividad frente a sus homólogos convencionales en circunstancias de presión media a alta de plagas controladas por la tecnología. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución del uso de insecticidas (particularmente en el algodón Bt). - Posibilidad de reducir el uso de otros productos fitosanitarios.
* Cultivos MG tolerantes a herbicidas	* Cultivos MG tolerantes a herbicidas
<ul style="list-style-type: none"> - Ante una presión significativa de malas hierbas: incremento de la productividad. - Contracción del gasto en el manejo mecánico de las malas hierbas una vez que el cultivo MG ha emergido y ha sido aplicado el herbicida. * Posibilidad de obtener cultivos que presenten una mayor vida postcosecha: reducción de pérdidas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sustitución de herbicidas selectivos por otros de amplio espectro que son de mínimo impacto medioambiental. - Fomento de la agricultura de conservación: se reemplazan labores mecánicas por herbicidas no residuales.
BENEFICIOS SANITARIOS	BENEFICIOS SOCIALES
* Maíz Bt resistente a barrenadores	* Maíz Bt resistente a barrenadores
<ul style="list-style-type: none"> - Contribuye a reducir el nivel de micotoxinas en el grano: mejorar la seguridad del maíz para la fabricación de alimentos y piensos. - El consumo continuado de granos contaminados con fumonisinas tiene efectos cancerígenos y constituye un alto factor de riesgo en la aparición de defectos congénitos del tubo neural en humanos. * Citados efectos nocivos son aún mayores en los países en desarrollo: base de la dieta es muy poco variada, constituyendo el maíz uno de los alimentos básicos. * Menor nivel de exposición de los agricultores a los productos fitosanitarios de síntesis química: disminución de los posibles efectos perjudiciales que pudieran ejercer en la salud. 	<ul style="list-style-type: none"> * Tecnología que contribuye a mantener la renta de los agricultores, tanto en países desarrollados como en desarrollo. * Disponibilidad de cultivos básicos enriquecidos en micronutrientes: especial relevancia para países donde la base de la dieta está sustentada en unos pocos alimentos. * Posibilidad de ofrecer alimentos más saludables.

Referencias bibliográficas

- > Acworth, W.; Yainshet, A. y Curtotti, R. (2008), *Economic Impacts of GM Crops in Australia*. Research Report 08.4 (Canberra, Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics).
- > Álvarez-Alfageme, F.; Ferry, N.; Castañera, P.; Ortego, F. y Gatehouse, A. M. R. (2008), "Prey Mediated Effects of Bt Maize on Fitness and Digestive Physiology of the Red Spider Mite Predator *Stethorus punctillum* Weise (Coleoptera: Coccinellidae)", *Transgenic Research*, vol. 17, nº 5, pp. 943-954.
- > Ascherio, A.; Chen, H.; Weisskopf, M. G.; O'Reilly, E.; McCullough, M. L.; Calle, E. E.; Schwarzschild, M. A. y Thun, M. J. (2006), "Pesticide Exposure and Risk for Parkinson's Disease", *Annals of Neurology*, vol. 60, nº 2, pp. 197-203.
- > Bakan, B.; Melcion, D.; Richard-Molard, D. y Cahagnier, B. (2002), "Fungal Growth and Fusarium Mycotoxin Content in Isogenic Traditional Maize and Genetically Modified Maize Grown in France and Spain", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 50, nº 4, pp. 728-731.
- > Bartsch, D.; Buhk, H. J.; Engel, K. H.; Ewen, C.; Flachowsky, G.; Gathmann, A.; Heinze, P.; Koziolok, C.; Leggewie, G.; Meisner, A.; Neemann, G.; Rees, U.; Scheepers, A.; Schmidt, S.; Schulte, E.; Sinemus, K. y Vaasen, A. (2009), *Long-term Effects of Genetically Modified (GM) Crops on Health and the Environment (including Biodiversity): Prioritisation of Potential Risks and Delimitation of Uncertainties*. Federal Office of Consumer Protection of Food Safety, BLaU, Genius GmbH.
- > Bhatti, M. A.; Duan, J.; Head, G.; Jiang, C.; Mckee, M. J.; Nickson, T. E.; Pilcher, C. L. y Pilcher, C. D. (2005a), "Field Evaluation of the Impact of Corn Rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae)-Protected Bt Corn on Ground-Dwelling Invertebrates", *Environmental Entomology*, vol. 34, nº 5, pp. 1325-1335.
- (2005b), "Field Evaluation of the Impact of Corn Rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae)-Protected Bt Corn on Foliage-Dwelling Arthropods", *Environmental Entomology*, vol. 34, nº 5, pp. 1336-1345.
- > Castañera, P.; Ortego, F.; Hernández-Crespo, P.; Farinós, G. P.; Albajes, R.; Eizaguirre, M.; López, C.; Lumbieres, B. y Pons, X. (2010): "El maíz Bt en España: experiencia de 12 años de cultivo", *Phytoma España*, nº 219, pp. 64-70.

- > De La Poza, M.; Pons, X.; Farinós, G. P.; López, C.; Ortego, F.; Eizaguirre, M.; Castañera, P. y Albajes, R. (2005), "Impact of Farm-Scale Bt Maize on Abundance of Predatory Arthropods in Spain", *Crop Protection*, vol. 24, nº 7, pp. 677-684.
- > Dirección General de Investigación de la Comisión Europea (2001), *GMOs: Are There any Risks?* Nota de prensa, Bruselas, 8 de octubre de 2001.
- > Doliner, L. H. (1991), *Pre-Harvest Use of Glyphosate Herbicide*. Discussion Document D91-01. Pesticide Information Division of the Plant Industry Directorate, Agriculture Canada.
- > Dick, F. D.; De Palma, G.; Ahmadi, A.; Scott, N. W.; Prescott, G. J.; Bennett, J.; Semple, S.; Dick, S.; Counsell, C.; Mozzoni, P.; Haites, N.; Wetzinger, S. B.; Mutti, A.; Otelea, M.; Seaton, A.; Söderkvist, P. y Felice, A. (2007), "Environmental Risk Factors for Parkinson's Disease and Parkinsonism: The Geoparkinson Study", *Occupational Environmental Medicine*, vol. 64, nº 10, pp. 666-672.
- > Engel, L. S.; Checkoway, H.; Keifer, M. C.; Seixas, N. S.; Longstreth, W. T. Jr.; Scott, K. C.; Hudnell, K.; Anger, W. K. y Camicioli, R. (2001), "Parkinsonism and Occupational Exposure to Pesticides", *Occupational Environmental Medicine*, vol. 58, pp. 582-589.
- > English Nature (2003), *The Herbicide Handbook: Guidance on the Use of Herbicides Nature Conservation Sites*.
- > Evenson, R. E. Y Gollin, D. (2003), "Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000", *Science*, vol. 300, nº 5620, pp. 758-762.
- > Farinós, G. P.; De La Poza, M.; Hernández-Crespo, P.; Ortego, F. y Castañera, P. (2008), "Diversity and Seasonal Phenology of Aboveground Arthropods in Conventional and Transgenic Maize Crops in Central Spain", *Biological Control*, vol. 44, nº 3, pp. 362-371.
- > Giesy, J. P., Dobson, S. y Solomon, K. R. (2000), "Ecotoxicological Risk Assessment for Roundup Herbicide", *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 167, pp. 35-120.
- > Hammond, B. G.; Campbell, K. W.; Pilcher, C. D.; DeGooyer, T. A.; Robinson, A. E.; McMillen, B. L.; Spangler, S. M.; Riordan, S. G.; Rice, L. G. y Richard, J. L. (2004), "Lower Fumonisin Mycotoxin Levels in the Grain of Bt Corn Grown in the United States in 2000-2002", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 52, nº 5, pp. 1390-1397.

- > Head, G.; Moar, W.; Eubanks, M.; Freeman, B.; Ruberson, J.; Hagerty, A. y Turnipseed, S. (2005), "A Multiyear, Large-Scale Comparison of Arthropod Populations on Commercially Managed Bt and Non-Bt Cotton Fields", *Environmental Entomology*, vol. 34, nº 5, pp. 1257-1266.
- > International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications (2009), *Biotech Crops in India: The Dawn of a New Era*. ISAAA Brief nº 39. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
- > James, C. (1997), *Global Status of Transgenic Crops in 1997*. ISAAA Briefs nº 5. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
 - (1998), *Global Review of Commercialized Transgenic Crops: 1998*. ISAAA Briefs nº 8. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
 - (2000), *Global Status of Commercialized Transgenic Crops: 2000*. ISAAA Briefs nº 23. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
 - (2002), *Preview: Global Status of Commercialized Transgenic Crops: 2002*. ISAAA Briefs nº 27. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
 - (2003), *Preview: Global Status of Commercialized Transgenic Crops: 2003*. ISAAA Briefs nº 30. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
 - (2004), *Preview: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2004*. ISAAA Briefs nº 32. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
 - (2005), *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2005*. ISAAA Briefs nº 34. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
 - (2006), *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2006*. ISAAA Briefs nº 35. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
 - (2007), *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2007*. ISAAA Briefs nº 37. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.

- (2008), *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2008*. ISAAA Briefs nº 39. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
- (2009), *Global status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2009*. ISAAA Briefs nº 41. Ithaca, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
- > Kershen, D. L. (2006), "Health and Food Safety: The Benefits of Bt-Corn", *Food and Drug Law Journal*, vol. 61, nº 2, pp. 197-235.
- > Kessler, C. y Economidis, I., eds. (2001), *A Review of Results. EC-Sponsored Research on Safety of Genetically Modified Organisms*. Luxemburgo, Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.
- > López Bellido, L. (1998), "Agricultura y medio ambiente", en Jiménez Díaz, R. M. y Lamó De Espinosa, J., coord., *Agricultura sostenible* (Madrid, Agrofuturo, Life y Mundi-Prensa; pp. 15-38.
- > Marvier, M., McCreedy, C., Regetz, J. y Kareiva, P. (2007), "A Meta-Analysis of Effects of Bt Cotton and Maize on Non-Target Invertebrates", *Science*, vol. 316, nº 5830, pp. 1475-1477.
- > Masoero, F.; Moschini, M.; Rossi, F.; Prandini, A. y Pietri, A. (1999), "Nutritive Value, Mycotoxin Contamination and in Vitro Rumen Fermentation of Normal and Genetically Modified Corn (CRY1A(B)) Grown in Northern Italy", *Maydica*, vol. 44, pp. 205-209.
- > Munkvold, G. P.; Hellmich, R. L. y Rice, L. G. (1999), "Comparison of Fumonisin Concentrations in Kernels of Transgenic Bt Maize Hybrids and Nontransgenic Hybrids", *Plant Disease*, vol. 83, nº 2, pp.130-138.
- > Munkvold, G. P.; Hellmich, R. L. y Showers, W. B. (1997), "Reduced Fusarium Ear Rot and Symptomless Infection in Kernels of Maize Genetically Engineered for European Corn Borer Resistance", *Phytopathology*, vol. 87, nº 10, pp. 1071-1077.
- > Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2009), *High Level Expert Forum. How to Feed the World in 2050*. Documento de Debate.
- > Organización Mundial de la Salud (1994), *Environmental Health Criteria nº 159. Glyphosate*.

- > Ortiz, R.; Mowbray, D.; Dowswell, C. y Rajaram, S. (2007), "Dedication: Norman E. Borlaug. The Humanitarian Plant Scientist Who Changed the World", en *Plant Breeding Reviews*, vol. 28, (Nueva York, John Wiley & Sons), pp. 1-38.
- > Papst, C.; Utz, H. F.; Melchinger, A. E.; Eder, J.; Magg, T.; Klein, D. y Bohn, M. (2005), "Mycotoxins Produced by *Fusarium* spp. in Isogenic Bt vs. non-Bt Maize Hybrids under European Corn Borer Pressure", *Agronomy*, vol. 97, nº 1, pp. 219-224.
- > Pons, X. y Starý, P. (2003), "Spring Aphid-Parasitoid (Hom., Aphididae, Hym., Braconidae) Associations and Interactions in a Mediterranean Arable Crop Ecosystem, Including Bt Maize", *Journal of Pest Science*, vol. 76, nº 5, pp. 133-138.
- > Romeis, J., Meissle, M. y Bigler, F. (2006), "Transgenic Crops Expressing *Bacillus thuringiensis* Toxins and Biological Control", *Nature Biotechnology*, vol. 24, nº 1, pp. 63-71.
- > Us Environmental Protection Agency (1993), *Reregistration Eligibility Decision (RED). Glyphosate*. EPA 738-R-93-014.
 - (2001), *Bacillus thuringiensis (Bt) Plant-Incorporated Protectants*. Biopesticides Registration Action Document.
- > VVAA (2005), "Transgenic Plants and Insects", *Environmental Entomology*, vol. 34, nº 5, pp. 1178-1376.
- > Whitehouse, M. E. A.; Wilson, L. J. y Fitt, G. P. (2005), "A Comparison of Arthropod Communities in Transgenic Bt and Conventional Cotton in Australia", *Environmental Entomology*, vol. 34, nº 5, pp. 1224-1241.

Recursos en Internet

- > Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria: <http://www.efsa.europa.eu>
- > Base de Datos de Población Mundial de la Organización de las Naciones Unidas (ONU): <http://esa.un.org/unpp/index.asp>
- > Base de Datos FAOSTAT: <http://faostat.fao.org/default.aspx?lang=es>