

# Plantas transgénicas: aspectos éticos y sociales

Enrique Iáñez Pareja ([eianez@ugr.es](mailto:eianez@ugr.es))

Departamento de Microbiología, Universidad de Granada

Material de lectura para acompañar a la ponencia de la mesa redonda

**“El debate social sobre los transgénicos”**

Seminarios “Miradas al mundo”

Instituto de la Paz y los Conflictos, UGR. 24 de noviembre de 2016

## Contenido

Plantas transgénicas: aspectos éticos y sociales.....	1
Introducción: las revoluciones agrícolas .....	2
Neolítico: selección automática .....	2
Selección masal .....	2
Primera mejora científica y Revolución Verde .....	2
Los retos de la agricultura en el siglo XXI .....	2
Biotecnología para la mejora vegetal.....	3
Herramientas principales: .....	3
Objetivos y logros de la ingeniería genética vegetal.....	4
El debate sobre los transgénicos.....	5
Objeciones intrínsecas: ¿hay argumentos éticos contra las transgénicas? .....	5
“La biotecnología vegetal cambia el mundo de modo ilegítimo” .....	5
“La biotecnología vegetal salta ilegítimamente las barreras evolutivas” .....	6
La biotecnología vegetal supone comercializar la vida” .....	6
“La biotecnología es artificial y violenta a la Naturaleza” .....	6
Seguridad para el ser humano .....	7
Equivalencia sustancial.....	7
La cuestión de las alergias .....	9
La cuestión de la resistencia a los antibióticos .....	10
Seguridad genética y ecológica .....	11
¿Regular los productos o regular los procesos?.....	11
“Escape” de transgenes.....	13
Posibilidad de producción de malas hierbas.....	15
Efectos indeseables de las plantas resistentes a insectos .....	17
Conclusión .....	20

## Introducción: las revoluciones agrícolas

### *Neolítico: selección automática*

La primera revolución agrícola consistió en la domesticación de animales y plantas durante el Neolítico: se tomaban semillas de una planta silvestre, y se sembraban cerca del poblado, y la cosecha se recogía en un tiempo determinado, todo lo cual ya tenía efectos de “selección artificial”, aunque totalmente inconsciente. Efectos típicos de esta selección.

- Se seleccionaron semillas que habían perdido o acortado su latencia (lo cual permite la cosecha en un tiempo determinado) en vez de germinar en un amplio margen temporal.
- Se seleccionaron frutos indehiscentes (que no sueltan las semillas). P. ej., cereales con espigas con raquis tenaz, lo cual permitía, además, un trillado más fácil.

### *Selección masal*

La diversificación de las plantas domésticas fue enorme, y se logró mediante mutación, deriva genética, cruzamientos espontáneos con silvestres parientes, y selección humana. En el proceso, las plantas dependieron del hombre, perdieron sus rasgos silvestres, y salvo excepciones, no se asilvestraron (p. ej., la rosa). Hay una selección empírica consciente de ciertas características: granos más grandes (en cereales), tallos más fuertes, espigas firmes y no quebradizas, lo cual produce las **primeras variedades locales**.

### *Primera mejora científica y Revolución Verde*

En el siglo XVIII se descubre la sexualidad de las plantas, y enseguida se crean las primeras empresas de mejoradores. Tras el redescubrimiento en 1900 de las leyes de la herencia de Mendel (1865), nace propiamente la Genética, que aporta una base racional y nuevas herramientas para la mejora:

- Heterosis (vigor híbrido) en el maíz (1908), lo cual permitió producir los primeros híbridos comerciales de la historia.
- Inducción de poliploidía (multiplicación del juego original de cromosomas)
- Mutagénesis artificial con agentes físicos o químicos

La Revolución Verde (desde 1960), nacida del impulso de Norman Borlaug (Nobel de la Paz, 1970), produce nuevas variedades de cereales semienanos (trigo, maíz, arroz) con un alto rendimiento bajo diversas condiciones ecológicas, pero dependientes de mecanización y de insumos agroquímicos (plaguicidas, herbicidas). Permitió aliviar el hambre principalmente en Asia y Latinoamérica (en la India casi cuadruplicó el rendimiento), si bien generó nuevos problemas (contaminación, agotamiento del suelo, uniformidad genética).

## Los retos de la agricultura en el siglo XXI

La Revolución Verde alejó durante varios decenios la espada de Damocles malthusiana. Sin embargo, en algunos lugares se han alcanzado ya los límites de productividad de las estirpes (o sea, están ya “exprimidas” al máximo de su rendimiento bajo condiciones ideales de estación agronómica), y por otro lado, hay que hacer frente a los problemas citados.

Para 2050 se prevé que la población humana sea de unos 9 000 millones (aumento del 35 % respecto del actual, la mayor parte en los países en desarrollo). Para satisfacer a esta población, la producción de alimentos debería aumentar globalmente un 70 %, y duplicarse en los países en desarrollo. Como casi todo el suelo apto para la agricultura ya está siendo cultivado,

dichos aumentos no pueden venir de roturar más terreno (con pérdida de más bosques y sabanas) sino del incremento de los rendimientos por unidad de superficie. O sea, cada hectárea deberá producir más alimentos que en la actualidad, y además, en un contexto de cambio climático, escasez de agua, etc.

Por lo tanto, para llegar a esos objetivos, **necesitaremos una nueva Revolución Verde, que aumente los rendimientos por unidad de insumo**. Y para ello, aplicando tecnologías agrarias sostenibles ya existentes y desarrollando nuevas tecnologías productivas y adaptadas a los nuevos escenarios.

Según la FAO, estas tecnologías se agrupan en lo que se denomina “enfoque ecosistémico”:

- **Agricultura de conservación**, con laboreo mínimo o sin laboreo, en la que el suelo siempre tiene cubierta vegetal. Se realizan **rotaciones de cultivos** diversificados, incluyendo siempre una leguminosa para aportar nitrógeno (con ahorro de fertilizantes químicos).
- **Uso eficiente de fertilizantes mediante agricultura de precisión**
- **Control integrado de plagas**: combina variedades resistentes a ciertas plagas y enfermedades con control biológico y uso razonable de plaguicidas.
- **Gestión del agua de riego**: agricultura de conservación con variedades vegetales más tolerantes a sequía y estrés hídrico. Sistemas de riego modernos y asociaciones de regantes bien organizadas.
- **Conservación y uso sostenible de los recursos genéticos**. Mejora genética para obtener más calidad, mejores rendimientos y uso más eficiente de agua e insumos, más tolerantes a estrés bióticos y abióticos. Para ello, la alianza entre las técnicas clásicas de mejora y las nuevas biotecnologías, incluida la ingeniería genética, serán imprescindibles.

## Biotecnología para la mejora vegetal

(NOTA: este apartado es un resumen muy apretado de aspectos técnicos sobre la historia y técnicas de mejora biotecnológica. Los lectores no habituados a esta terminología pueden saltar esta sección).

### Herramientas principales:

- Técnicas de ADN recombinante (“ingeniería genética”)
  - Vectores y marcadores genéticos
  - Diseño de un transgén: casetes genéticos (ORF, promotores, terminadores, etc)
  - Sistemas de transformación (derivados del plásmido Ti de *Agrobacterium tumefaciens*, biolística, etc).
  - Selección de los transformantes y regeneración de la planta
- Genómica
- Mejora genética clásica asistida por marcadores moleculares

### **Objetivos y logros de la ingeniería genética vegetal**

La nueva técnica es insustituible cuando el rasgo no puede lograrse por métodos tradicionales, porque el gen no puede transferirse sexualmente. Los logros presentes y a la vista son:

- Tolerancia a herbicidas (p. ej., al glufosinato-Roundup)
- Resistencia a plagas de insectos:
  - Plantas *Bt*
    - Algodón resistente al gusano de la cápsula
    - Maíz resistente al taladro
    - Patata resistente al escarabajo
  - Otros genes de resistencia a insectos
- Resistencia a patógenos, especialmente a virus.
  - Papaya resistente a virus, que salvó este cultivo en Hawaii
  - Otros: calabacín, patata, tomate, soja, etc
- Retraso en la maduración del fruto
  - Tomate Flavr-Savr, por inactivación de expresión de poligalacturonasa
  - Posibles:
    - Cafetos sin cafeína por inactivación del gen de la xantosina transferasa
    - Trigos sin gliadinas, aptos para celíacos, por ARNi (de interferencia)
- Resistencia a estreses abióticos
  - Maíz resistente a la sequía (con gen *cspB* de *B. subtilis*), a punto de entrar en el mercado. (Monsanto). Licencia para el tercer mundo
  - Maíz tolerante a bajos niveles de N, con gen de alga *Porphyra perforata* (Pioneer). Colaboración de Fundación Gates para el tercer mundo, con CIMMYT.
  - Se trabaja en tolerancia a salinidad, calor, acidez, etc.
- Alteración de la reproducción
  - Androesterilidad (esterilidad masculina) en colza y tabaco. Si se lograra controlar este rasgo en otras plantas, permitiría generar híbridos con heterosis → aumentos de productividad, como los obtenidos en maíz desde los años 30.
  - Frutos sin semillas (partenocárpicos)
  - Adelanto de la floración en plantas leñosas (técnica Fast Track)
- Sobre la calidad nutritiva
  - Arroz dorado, con  $\beta$ -caroteno, precursor de la vitamina A.
  - Aumento de niveles de hierro
  - Aumento contenido en ciertos aminoácidos esenciales
  - Modificación proporción de ácidos grasos en oleaginosas (colza, girasol)

## El debate sobre los transgénicos

Si bien se ha acuñado la expresión “organismos genéticamente modificados” (OGMs) como sinónimo de transgénicos, hay que tener en cuenta que la modificación genética se viene realizando desde el Neolítico, primero de modo empírico y, desde comienzos del siglo XX con criterios científicos (por selección artificial de genotipos logrados por hibridación y mutagénesis, principalmente).

Las plantas transgénicas comenzaron a desarrollarse desde los años 80, pero su irrupción comercial se ha producido en los años 90, constituyendo una de las esperanzas de aumentar los rendimientos y la calidad alimentaria que la humanidad va a requerir en los próximos decenios para acompañar el crecimiento demográfico.

La polémica social sobre las plantas transgénicas tiene múltiples ramificaciones, pero desde un punto de vista ético hay que distinguir entre **objeciones** intrínsecas y extrínsecas.

- Las **intrínsecas** pretenden demostrar que el proceso de obtención de OGMs es recusable en sí mismo, por motivos de tipo ético o moral. Si se demostrara que la ingeniería genética vegetal o sus productos son “intrínsecamente malos”, habría que rechazarlos moralmente y eventualmente prohibirlos. Si no hubiera en principio tal tipo de objeciones, quedarían aún las...
- ... objeciones **extrínsecas**, que analizan los posibles perjuicios para la salud y el medio ambiente, derivados del uso de los OGMs. No impondrían su ilegitimidad, sino una cuidadosa evaluación y gestión de riesgos, según los casos.

## Objeciones intrínsecas: ¿hay argumentos éticos contra las transgénicas?

Las objeciones intrínsecas vienen a decir que el mismo procedimiento de obtención de los transgénicos es moralmente reprobable. Hay varias formas de este tipo de objeción, pero en casi todas ellas subyace más o menos latente la crítica de su “no naturalidad” u objeción de artificialidad (OA). Si la OA tuviera razón, habría que renunciar a desarrollar la tecnología transgénica. Las principales formulaciones de esta objeción rezan así:

1. Porque transforma el mundo de modos inéditos
2. Porque es ilegítimo saltar las barreras evolutivas
3. Porque supone comercializar la vida

### *“La biotecnología vegetal cambia el mundo de modo ilegítimo”*

Viene a decir que la biotecnología nos da poderes ilegítimos que antes no habíamos tenido y por lo tanto, no la debemos aplicar. Pero el hecho de que algo no se haya realizado antes no lo descalifica como moralmente erróneo (si fuera así, ninguna tecnología habría surgido, incluyendo las técnicas médicas). De hecho, la humanidad ha asistido a revoluciones tecnológicas que han cambiado para siempre las sociedades, y eso desde el Neolítico, pasando por la revolución tecnológica de los últimos siglos, y en todos los casos la humanidad se ha visto cambiada de modos impredecibles de antemano, generando nuevas formas culturales y nuevos tipos de sociedad.

### *“La biotecnología vegetal salta ilegítimamente las barreras evolutivas”*

Aquí tenemos dos tipos de dificultades, una filosófica y otra científica.

- La filosófica viene a decir que hay algo “sagrado” e intocable en las barreras entre especies. Para un pensamiento ilustrado a la luz de lo que sabemos por biología evolutiva, esto sería equivalente a sacralizar las barreras levantadas por una evolución ciega y sin propósito. Y por supuesto, esto implicaría convertir un mero hecho biológico en fuente de autoridad moral (**falacia naturalista**), un juicio que pocos filósofos hoy día se arriesgarían a emitir sin caer en el descrédito.
- Pero es que el argumento cae en la incoherencia de culpar a la biotecnología de lo que ya la humanidad lleva haciendo desde hace milenios, ya que desde el principio hemos estado saltando las barreras evolutivas: no ha sido infrecuente la obtención de híbridos entre especies e incluso géneros distintos, que se pueden considerar “monstruos genéticos” con mayor razón que los transgénicos, porque ha dado lugar a auténticas mezclas de genomas diferentes. Los que se oponen por sistema a las transgénicas, si quisieran ser consecuentes, deberían como poco pedir el análisis riguroso de tales híbridos, porque ¿qué consecuencias imprevistas puede tener mezclar dos genomas completos diferentes, con sus miles de genes cada uno, que nunca antes se habían juntado?
  - El propio trigo es un hexaploide de tres especies distintas.
  - el triticale, fue obtenido hace unos 70 años por cruce de trigo y centeno (no sólo dos especies distintas, sino i géneros diferentes separados por millones de años de evolución!), y se cultiva en más de un millón de hectáreas en Canadá, México y Europa oriental.
  - El fresón es un producto resultante del cruce *accidental* de dos especies silvestres distintas (una norteamericana y otra chilena).

### *La biotecnología vegetal supone comercializar la vida”*

Según los críticos, la ingeniería genética trata a los seres vivos de modo reduccionista y economicista, aduciendo que la vida es “sagrada” (¿toda?) y no debe ser tratada como bien comercial que se compra y se vende. Asombroso argumento, dado que la humanidad viene criando y usando desde el Neolítico diversos seres vivos para su servicio, matándolos para dotarse de alimento y fibra, comprándolos y vendiéndolos. ¿Hay que prohibir el intercambio comercial de trigo y de ganado?

### *“La biotecnología es artificial y violenta a la Naturaleza”*

La objeción general contra la artificialidad de la ingeniería genética se refuta rápidamente: toda la Agricultura, desde el Neolítico, es “artificial”, por no hablar de lo artificial de cualquier dispositivo mecánico o electrónico, de Internet, etc. Por otro lado, los críticos reformulan esta acusación dando a entender que la ingeniería genética “fuerza la naturaleza”. Pero como sabe cualquier estudiante de genética y de mejora vegetal, las técnicas clásicas también lo hacen, y a veces de modos muy acentuados:

- Mediante la ingeniería genética solo introducimos uno o unos pocos genes de secuencia conocida y perfectamente caracterizados funcionalmente, con lo que esta práctica presenta ventajas frente a la mejora tradicional, en la que junto a los caracteres buscados se transfiere una enorme cantidad de material genéti-

co sin caracterizar de la que se desconocen sus impactos. No es infrecuente que en las hibridaciones tradicionales se transfieran miles de genes desconocidos junto con el alelo buscado.

- La acusación de artificialidad, de “forzar a la naturaleza” y de saltar las barreras entre especies es predicable de buena parte de la mejora genética convencional (pero sin todo ello, ¿qué hubiera sido de la agricultura y de la producción de alimentos, y en general, de cualquier actividad humana?). Ejemplos de tales “violencias” de la naturaleza ya aceptadas (sin mayor debate) son:
  - Inducción de mutaciones mediante agentes físicos o químicos
  - Inducción de poliploidía mediante agentes químicos
  - el rescate de embriones
  - la polinización cruzada forzada entre especies e incluso géneros distintos

La Directiva europea sobre los transgénicos parece consagrar como seguras todas estas modificaciones tradicionales por el simple hecho de que llevan muchos años con nosotros: el Anexo 1B, al que se refiere el artículo 3, cita como técnicas no incluidas en la evaluación de seguridad la mutagénesis y la fusión celular entre células de organismos que pueden intercambiar material genético por métodos de mejora tradicionales. Igualmente, en el anexo 1A deja fuera de la directiva métodos de transferencia génica entre bacterias (conjugación, transformación, transducción) mientras no impliquen manipulación por ingeniería genética. Pero esto último es discutible, puesto que el aprovechamiento por humanos de esos “procesos naturales” (*sic*) no garantiza que se vayan a producir siempre combinaciones de genes-organismos inofensivas.

## Seguridad para el ser humano

La expresión “alimento transgénico” es inexacta, porque lo que es transgénico es el organismo que lo produce.

Antes de llegar al mercado, los alimentos derivados de organismos transgénicos sufren una serie de evaluaciones rigurosas sobre su seguridad alimentaria y sus cualidades nutritivas, de tal modo que se puede decir que estos controles son, en general, más severos que los que se emplean en otros productos alimenticios. El objetivo de estos estudios previos es asegurarse de que como mínimo, no se altera el nivel de seguridad del producto convencional del que deriva el transgénico.

### *Equivalencia sustancial*

El principio rector para establecer la evaluación de seguridad de los alimentos e ingredientes procedentes de transgénicos es la comparación con las características de las variedades convencionales correspondientes.

**Principio de Equivalencia Sustancial (PES):** si un alimento procedente de la nueva biotecnología se puede caracterizar como equivalente (dentro de los márgenes estadísticos) a su predecesor convencional, se puede suponer que no plantea nuevos riesgos, y por lo tanto, es aceptable para consumo.

El PES ha sido asumido y revisado por numerosos organismos internacionales: OCDE (1996), Comité Científico Europeo de Alimentos (1997), FAO-OMS (1996, 2000, 2001), Codex Alimentarius (2002), EFSA (2002).

Desde 2002 la UE cuenta como organismo regulador la EFSA (Agencia de seguridad de los alimentos) equivalente a la FDA norteamericana. Ambas agencias se centran en los siguientes temas de evaluación de seguridad alimentaria de los productos derivados de las transgénicas:

- Fuente del gen (del transgén)
- **Caracterización molecular** del fragmento de ADN introducido, y de las nuevas proteínas o metabolitos resultantes (además, en algunos países de la UE se exige la caracterización del lugar de inserción del segmento en el genoma de la planta);
- Análisis de la **composición** de partes relevantes de la planta con respecto a **nutrientes y antinutrientes**, incluyendo **toxinas** naturales y **alérgenos** potenciales;
- **Potencial de transferencia** de transgenes desde el alimento modificado a microorganismos del tracto gastrointestinal humano o de animales domésticos;
- **Alergenicidad** potencial de los nuevos productos génicos, o alteración de la alergenicidad intrínseca
- **Niveles de ingesta** estimados de las nuevas proteínas y del producto final;
- Evaluación toxicológica y nutricional de los datos resultantes;
- Pruebas de toxicidad adicionales (del alimento completo) cuando sean necesarias.
- Desde 2013, la UE obliga también en ciertos casos a realizar **estudios con ratones alimentados durante 90 días** con una dieta a base del alimento procedente de transgénesis (para detectar posibles efectos crónicos a largo plazo).

Los análisis de composición de 129 cultivos transgénicos evaluados por la FDA entre 1995 y 2012 para su comercialización han revelado que ninguno de ellos presentaba diferencias significativas con las estirpes isogénicas no transgénicas.

Un beneficio claro de los maíces transgénicos Bt es que minimizan el ataque de la roya *Fusarium*, con lo cual se evitan problemas de aparición de micotoxinas, algunas de las cuales pueden tener efectos potencialmente cancerígenos.

Este tipo de evaluación es el que, a través de miles de ensayos, se aplicó a la soja resistente al herbicida glifosato (Roundup), confirmándose que no presenta riesgos adicionales a los de la soja convencional. Agencias reguladoras de 13 países han aprobado el uso de las habas de soja transgénica, y en los EEUU cientos de millones de personas llevan varios años consumiendo productos derivados de ella sin que se haya visto el menor efecto sospechoso.

El informe de la OCDE del año 2000 reconoció que, en efecto, no hay constancia científica de ningún efecto adverso entre los millones de personas que vienen consumiendo estos productos desde hace 10 años, confirmando que el marco de evaluación válido sigue siendo el de la equivalencia sustancial, aunque se pide su profundización y readaptación para perfeccionarlo.

Las autoridades reguladoras (FDA y EFSA) están de acuerdo en que el actual enfoque basado en la **equivalencia sustancial**, en el que se combinan los **análisis de composición** con el comportamiento **fenotípico y agronómico** de la planta es **todo lo que se necesita** para establecer la seguridad de un cultivo transgénico.



### La cuestión de las alergias

Otra acusación inicial contra las plantas transgénicas fue la de que pueden incrementar los riesgos de alergias. Sin embargo, el mero hecho de que una planta sea mejorada por transgénesis no supone mayor riesgo de alergenicidad. El riesgo estribaría en que, independientemente de la técnica...

- ...se introduzca un alérgeno codificado en un gen transferido, o bien...
- ... se cambie el nivel o naturaleza de los alérgenos intrínsecos.

El hecho de que los genes que se transfieren se pueden caracterizar, permite ciertas predicciones sobre la posible alergenicidad de sus productos, aunque por supuesto, el obtener un resultado negativo no descarta esa posibilidad, por lo que se realizan pruebas adicionales. De cualquier manera, el *Codex Alimentarius* (FAO-OMS) está introduciendo los estándares pertinentes para el análisis de alergenicidad de los alimentos biotecnológicos, y que se pueden resumir de la siguiente manera:

- a) cuando la proteína o proteínas determinadas por un gen o genes insertados estén presentes en el nuevo alimento, se debe evaluar en todos los casos su posible alergenicidad;
- b) se debe aplicar una estrategia de “árbol de decisiones”, es decir una especie de algoritmo que prevea el curso de ulterior investigación en función de los resultados de las pruebas, realizadas con las adecuadas herramientas científicas. La ruta a lo largo de este árbol depende de los datos introducidos y de los resultados que se vayan obteniendo, como
  - la alergenicidad de la fuente del transgén,
  - la comparación de la secuencia de aminoácidos de la proteína resultante con las secuencias de alérgenos conocidos de las bases de datos: cuando la homología es mayor que el 35 % en un tramo de más de 80 aminoácidos se considera un posible positivo;
  - la estabilidad de la proteína frente a enzimas digestivas (pepsina) o a pH bajo.
- c) Si las dos últimas pruebas salen positivas, se suelen realizar ensayos inmunológicos in vitro: ensayar suero de individuos alérgicos, desgranulación de basófilos o mastocitos mediada por IgE...
- d) si el material genético introducido en una planta deriva de cereales como trigo, centeno, cebada, avena, etc., las nuevas proteínas expresadas deben de investigarse para cualquier posible papel en la inducción de la enteropatía por sensibilidad al gluten (enfermedad celíaca);
- e) se debe evitar la transferencia de genes desde alimentos que se sabe que son alergénicos, y desde alimentos que se sepa que desencadenan enfermedad celíaca en los individuos sensibles, a menos que se demuestre que el gen introducido no determina un alérgeno o una proteína implicada en la enteropatía por sensibilidad al gluten.

Son estos tipos de estudios los que precisamente permitieron (antes de la comercialización):

- detectar alérgenos en la soja con gen de nuez de Brasil en la fase de investigación;
- determinar que la proteína Bt Cry9C del maíz StarLink resiste tratamientos térmicos y de hidrólisis ácida, por lo que este producto sólo se autorizó para uso animal.

- determinar la ausencia de incrementos de alergenicidad en otros tipos de productos derivados de transgénicos, como es el caso de la soja con proporciones modificadas de ácidos grasos.

Y no olvidemos que con los estándares aplicados a los alimentos biotecnológicos, muchos productos convencionales no pasarían el examen: se han identificado 8 alimentos comunes así como más de 160 menos comunes, que dan problemas de alergias en ciertos individuos. (Pensemos en los cacahuets y otros frutos secos, frutos como el kiwi, ciertos mariscos, etc). Y sin embargo, en estos casos nadie está hablando de eliminarlos del mercado, entre otras cosas porque, como siempre, aparte de los riesgos existe una ponderación de beneficios, en la certeza de que el riesgo cero no existe.

### *La cuestión de la resistencia a los antibióticos*

Otro aspecto del que se ha hablado mucho es el de las resistencias a antibióticos. Como se sabe, para construir plantas transgénicas, y con objeto de distinguirlas en el laboratorio respecto de las (mayoritarias) no modificadas que surgen de un experimento, se recurre a genes marcadores fácilmente seleccionables.

- La primera oleada usó algunos genes de resistencia a antibióticos, por lo que era habitual que la planta llevara uno de esos genes, aparte de los determinantes del rasgo agronómico de interés.
- Algunos críticos señalaron que esos genes podrían transferirse, desde el alimento fresco ingerido hasta bacterias del tracto intestinal, favoreciendo eventualmente el surgimiento de cepas microbianas (incluidas patógenas) resistentes, con el consiguiente peligro para la salud (por no ser útil el recurso al correspondiente antibiótico).
- Sin embargo, las pruebas científicas no indican que tal transferencia de genes ocurra (si bien puede darse en condiciones forzadas de laboratorio). De hecho, nunca se ha demostrado que el comer un alimento fresco vegetal (no transgénico) acarree la transferencia de genes desde él a la microflora intestinal o al medio ambiente (estamos ingiriendo millones de copias de genes en cada comida, sin ningún efecto adverso). Y no se puede olvidar que nuestra propia microflora contiene ya, de modo natural, gérmenes resistentes a uno o varios antibióticos.

De cualquier manera, de nuevo la biotecnología ha aceptado el reto que la sociedad le exige, y también esta cuestión está en trance de resolverse. Las conclusiones de los grupos de expertos que llevan años trabajando en este sentido para el *Codex Alimentarius* se pueden resumir así:

- a) Las nuevas generaciones de diseños transgénicos que están preparándose en los laboratorios ya no usan esos marcadores, sino que se están empleando otros (genes chivatos, de resistencia a herbicidas).
- b) Por otro lado, aun usando genes de resistencia en la fase de laboratorio, hay sistemas para deshacerse de ellos una vez que han cumplido su papel en la selección de laboratorio, de modo que tales genes no llegarían a aparecer en la construcción genética final comercializable;
- c) mientras tanto, se debe evitar recurrir a cualquier gen marcador que codifique resistencia a antibióticos que aún se usan en medicina o veterinaria (algunos de

los genes marcadores empleados hoy día no tienen ya uso en clínica, y no plantean problemas sanitarios, como es el caso del de resistencia a la kanamicina). En la UE, desde 2004 están prohibidos los genes marcadores de resistencia a antibióticos.

Hace unos pocos años se conoció el lamentable hecho de que la empresa Syngenta estuvo distribuyendo “erróneamente” una variedad no aprobada de maíz transgénico portadora del marcador de resistencia a ampicilina. Fue retirada del mercado.

Finalmente, una llamada a la racionalidad: la cantidad de pruebas a realizar en los “nuevos alimentos” deberían estar en proporción a la evidencia previa acumulada, y sobre todo a la naturaleza y magnitud del riesgo. Teniendo en cuenta todo lo dicho hasta ahora (que supone el análisis de seguridad alimentaria más exhaustivo nunca aplicado), hay que preguntarse el sentido de pedir más y más pruebas solo para descartar la infinitésima y descartable posibilidad de que se produzcan inverosímiles efectos imaginados por mentes excitadas.

En la UE, no hay apenas alimentos aprobados para humanos derivados de transgénicos, aunque sí para pienso animal. Es **obligatorio etiquetar** cualquier alimento que contenga más del 0,9 % de componente transgénico. A pesar de que como hemos visto, se evalúan de un modo exhaustivo (nunca aplicado a ningún otro producto alimenticio), la percepción pública ha sido ganada por los críticos y ecologistas extremistas. El resultado es que debido al ingente coste de las pruebas requeridas legalmente (sin garantía de aprobación final), la I+D y comercialización solo la pueden realizar unas cuantas multinacionales capaces de elevadas inversiones, inhibiendo el surgimiento de otras iniciativas.

No hay riesgo cero para nada. La cuestión de cuánto riesgo y cuánta incertidumbre aceptamos es una decisión social y política, no una cuestión científica.

## Seguridad genética y ecológica

### *¿Regular los productos o regular los procesos?*

Lo primero que hay que decir es que *cualquier* práctica agrícola conlleva indudables impactos ecológicos, empezando por el simple hecho de roturar terrenos silvestres, que sustituye su biodiversidad natural por una muy limitada biodiversidad agraria, alterando la composición y estructura de las comunidades de seres vivos. Se puede afirmar que casi todos los riesgos de la agricultura son consecuencias de las prácticas empleadas para hacer que las plantas cultivadas crezcan sanas y puedan rendir de acuerdo con las necesidades humanas de alimentos y fibras. Como ejemplo de ello, baste recordar

- que el laboreo (para preparar la siembra y eliminar malas hierbas) conlleva cierto grado de erosión del suelo,
- que los nitratos de los fertilizantes conducen a eutrofización de aguas y otros daños ambientales,
- que los plaguicidas químicos no discriminan entre insectos dañinos y beneficiosos, afectando a la macrofauna y contaminando aguas; etc.

En cambio, la ya larga historia de mejora vegetal clásica por hibridación no ha aportado un aumento sustancial de riesgos, al contrario, es frecuente que las modificaciones genéticas realizadas disminuyan uno de ellos, a saber, el comportamiento invasivo de la planta fuera del campo de cultivo y más allá de la estación agrícola. Sin embargo, en el caso de las transgénicas, algunos han dado por supuesto que su modo de obtención supone riesgos adicionales. ¿Tiene fundamento esta acusación?

Una cuestión previa para responder a las inquietudes sobre los supuestos riesgos ecológicos de las plantas transgénicas sería: ¿cuáles son los puntos de partida adecuados para evaluar los riesgos de la nueva biotecnología en el sector agrícola?. Ello conduce inexorablemente a preguntarse si existe algo intrínsecamente distinto o especial en la ingeniería genética que justifique que tenga que evaluarse aparte, recurriendo a un nuevo paradigma distinto del usado para calibrar los riesgos en otros casos. La respuesta es que no hay tal justificación desde un punto de vista científico.

Los OGM deben regularse como cualquier otro organismo, a saber, en función del tipo de uso previsto (alimento, plaguicidas, etc.) y de su riesgo intrínseco (en el caso de poseer características de toxicidad, patogenicidad, invasividad, etc.), incluyendo las previsible interacciones con el entorno donde se pretende aplicar. En casos en los que la combinación de gen, organismo huésped y ambiente se estime que presenta riesgos excesivos de posible dislocación ecológica, se procedería a su total prohibición.

Sin embargo, debido sobre todo a cuestiones de ansiedad pública hacia la ingeniería genética, este paradigma de evaluación de riesgos basado en los productos y no en los procesos sólo se ha implantado en unos pocos países, siendo en este sentido Canadá el más consecuente con la conclusión científica. Los EE.UU., en teoría, están igualmente adheridos a la evaluación de productos, pero en la práctica algunas de las aplicaciones se regulan en función del método. El grado máximo de suspicacia (y la regulación más estricta del mundo) lo tenemos en Europa, donde la legislación sigue rigiéndose en el momento actual por el paradigma de evaluación de la técnica “potencialmente peligrosa” (esta es la filosofía implícita de la nueva Directiva 2001/18/EC sobre “Liberación deliberada de en el medio ambiente de organismos genéticamente modificados”, que sustituye a la 90/220). Esto significa que, en la práctica, y sin razones científicas de peso, los estándares de seguridad para los productos transgénicos son muy superiores a los productos convencionales, algo que puede tener consecuencias negativas importantes:

- a) seguiremos descuidando problemas ambientales planteados por prácticas tradicionales, mientras que retrasamos posibles alternativas mejores derivadas de los nuevos avances;
- b) en Europa, el avance científico, tecnológico y comercial se resentirá (de hecho ya estamos experimentando un notable atraso respecto de nuestros competidores. Syngenta ha sido la última empresa europea con gran inversión en I+D que ha trasladado su división de I+D fuera de Europa, a los EE UU);
- c) se aplazará la adopción de estrategias para asegurar el suministro de alimentos en un futuro, sobre todo a los países en vías de desarrollo.

Las cuestiones de seguridad tienen que ver con el riesgo y su gestión. En este contexto, se entiende por **riesgo** la probabilidad de que se produzca algún efecto adverso por un peligro ambiental. Las plantas transgénicas plantean varias fuentes potenciales de riesgo, que ya existían en las plantas convencionales: a) riesgos asociados con el flujo de genes y la recombinación (híbridos inintencionados); b) riesgos de evolución de malas hierbas; c) riesgos de surgimiento de insectos resistentes; d) riesgos de afectación a fauna, flora y servicios ecosistémicos.

Hay que advertir sobre algo que frecuentemente se omite u olvida (¿interesadamente?): la expresión “cuestiones de seguridad” es un primer paso en el proceso de identificación de peligros, pero *no prejuzga que éstos existan en la realidad*.

### “Escape” de transgenes

Según algunos, la posibilidad de transferencia del transgén desde una planta manipulada por ingeniería genética a otra cultivada no transgénica o silvestre añade un riesgo a los organismos transgénicos, permitiendo la **contaminación genética** de otras especies. Pero es que determinadas plantas de cultivo (independientemente de que sean o no transgénicas) tienen cierta facilidad para cruzarse con parientes silvestres que puedan estar presentes en las cercanías: colza, calabacín, girasol, sorgo. Por lo tanto, el riesgo de transferencia ya existía antes, solo que ahora hemos tomado consciencia, pero no tiene sentido culpar solo a las transgénicas.

La cuestión clave no es si hay transferencia horizontal de genes, sino si el producto de esa polinización cruzada presenta algún peligro (p. ej., convertirse en una mala hierba). Los riesgos ecológicos dependen, pues, de una serie de requisitos:

- a) posibilidad de polinización cruzada entre la especie cultivada y la silvestre;
- b) que ambas estén suficientemente cercanas en espacio y tiempo como para permitir la acción del vector que transporta el polen (aire, insectos, etc.);
- c) ambas especies deben ser compatibles entre sí, para que el polen pueda germinar y logre la fertilización;
- d) que los híbridos sean fértiles;
- e) que dichos híbridos tengan alguna ventaja selectiva o que supongan la desaparición o pérdida de identidad genética de la especie silvestre o de variedades cultivadas. (La cuestión sobre el efecto eventual de una ventaja selectiva será abordado en el siguiente apartado).

Hay numerosos ejemplos de flujo génico desde plantas domésticas *tradicionales* a parientes silvestres, en algunos casos con consecuencias ecológicas negativas, incluyendo extinción de especies silvestres o introgresión de rasgos domésticos en ellas, con pérdida de su identidad y de su variedad genéticas (**asimilación genética**). Por lo tanto, las plantas transgénicas, eventualmente podrían tener efectos parecidos, pero a priori no hay ninguna razón para pensar que los riesgos sean superiores por el simple hecho de haber usado una determinada técnica en su obtención. Lo que nos dicen los datos ya conocidos sobre flujo génico desde plantas convencionales es que debemos cuidar de que no se produzcan o se minimicen los efectos negativos *de cualquier planta domesticada*.

Para especies **autógamas** (autofértiles: el polen solo fertiliza a la flor de la que procede) el riesgo sería inexistente.

En el caso de plantas **alógamas** cultivadas, hay dos posibilidades:

Es despreciable o inexistente el riesgo si las alógamas domésticas **carecen de parientes silvestres** sexualmente compatibles en las cercanías del campo de cultivo. Por ejemplo,

- maíz, algodón, girasol, tomate y pimiento carecen de parientes en Europa, por lo que aquí no hay posibilidad de contaminación genética a otras especies, pero sí la hay en las regiones de América donde convivan las formas domésticas y los parientes silvestres.

- La soja (procedente de Manchuria y Mongolia) carece igualmente de parientes silvestres en Europa y los EE UU

Por el contrario, hay riesgos si la alógama se cultiva **cerca de parientes silvestres**:

- en los EEUU la calabaza transgénica resistente a virus se ha plantado cerca de calabaza silvestre (*Cucurbita pepo*).
- En ese país se ha prohibido el algodón transgénico en Hawái y en Florida.
- En Europa se está estudiando seriamente el flujo génico entre la colza o la remolacha azucarera y sus correspondientes parientes silvestres, para garantizar que los transgénicos no añaden ningún riesgo ecológico adicional al que ya tienen las versiones domésticas previas.

La introducción de variedades transgénicas en las regiones que son los respectivos **centros de origen de las plantas cultivadas** acentúa las preocupaciones anteriores (posibilidad de “contaminación genética” de razas locales).

- Por ejemplo, se están ensayando ya patatas transgénicas en México, uno de los sitios donde aún crecen patatas silvestres.
- La introducción en ese mismo país de maíz transgénico sería arriesgada, ya que Mesoamérica posee parientes silvestres (teosinte) y cultivados (maíces criollos) que hace falta preservar puros.
  - A pesar de la prohibición de sembrar maíz transgénico en México, en 2001 se detectó material transgénico Bt en razas locales de maíz en regiones remotas del estado de Oaxaca. Sin embargo, investigaciones posteriores han encontrado resultados contradictorios. Incluso una extensa búsqueda de transgenes en razas locales de maíz durante 2003-2004 dieron resultado negativo.
  - Sin embargo, incluso en el caso de que la selección favoreciera el gen Bt en las razas criollas, la diversidad genética de estas razas sólo quedaría reducida en los genes estrechamente ligados al locus Bt.

En caso de no proteger los centros de origen, si finalmente se producen híbridos indeseados, estaríamos amenazando no sólo parte de la biodiversidad, sino dilapidando un capital natural que nos podría ser útil en el futuro, como fuente de rasgos para programas de mejora genética. Esto va a obligar a regular cuidadosamente la certificación del origen de las semillas a la hora de su distribución en tales centros de diversificación biológica. Cada país y cada zona agrícola habrá de prestar atención a la presencia de parientes silvestres cercanos e introducir medidas correctoras, en su caso, o incluso prohibir ciertas plantaciones por los riesgos inasumibles de cara a la protección de su biodiversidad.

Se están explorando **medidas de contención biológica** de escape de genes que dependen de técnicas genéticas.

- Colocar los transgenes en cromosomas o segmentos de cromosoma que con menor verosimilitud de introgresión en poblaciones silvestres.
- Ligar estrechamente el transgén a genes para rasgos de domesticación que se espera tengan baja eficacia biológica en poblaciones silvestres.
- Usar tecnología GURT (restricción del uso de genes), es decir, la denostada “terminator”, que impide la germinación de semillas producidas por la transgénica.
- En algunos casos se podría recurrir a la creación de plantas transgénicas en las que el gen se introduce no en el núcleo, sino en los cloroplastos; como estos orgánulos sólo se transmiten por vía materna, se elimina el riesgo de transmitir los transgenes por medio del polen a las plantas silvestres.

- Y finalmente, es posible la construcción de ciertas plantas transgénicas dotadas de esterilidad masculina, lo que elimina el riesgo de transmisión de genes por el polen.

Muchos observadores están de acuerdo en que el auténtico reto con la transferencia de genes por polen no será el ecológico, sino el social, debido a las complicaciones que traerá la certificación de material vegetal “libre de transgénicos” y la evitación de contaminación en la agricultura verde o biológica. Probablemente haya que ir hacia un sistema de limitaciones espaciales y temporales en el uso de transgénicos, en función del tipo de cultivos convencionales cercanos y de las características de la polinización y de la dispersión de semillas. No es descabellado pensar que se imponga algún tipo de “guetos” para las nuevas variedades, suficientemente alejados de áreas silvestres y de agricultura biológica o de sembrados tradicionales que se pretenda proteger de contaminación genética. Esto será difícil en Europa, donde se alternan en estrecha proximidad muchos tipos de agrosistemas y ecosistemas más o menos silvestres, mientras que en buena parte de los EE.UU., debido al alejamiento geográfico de las grandes extensiones de monocultivos respecto de áreas naturales, puede que sea menos complicado.

### *Posibilidad de producción de malas hierbas*

Algunos han planteado el riesgo potencial de que las plantas transgénicas aumenten su capacidad de “asilvestrarse” y convertirse en malas hierbas difíciles de eliminar. Pero de nuevo, esto no sería una posibilidad exclusiva de las plantas transgénicas, ni tendría que ver con la técnica empleada. Como se sabe, algunas especies cultivadas tienen *per se* cierta tendencia a asilvestrarse. Pero la mayor parte de las especies cultivadas, debido a su larga historia de domesticación y mejora, depende totalmente de los humanos para sobrevivir, y a priori no hay razones científicas claras por las que una planta portadora de un rasgo agronómico adicional pueda convertirse en maleza.

Estudio europeo para cuantificar cambios en la eficacia biológica de las transgénicas. Uso de un gen marcador (GUS) en tabaco bajo distintas condiciones ecológicas de estrés (bajas temperaturas, sombra). No se detectó cambio en la capacidad competitiva durante la estación de crecimiento.

La introducción (por cualquier técnica) de ciertos caracteres adaptativos en plantas con breve historia de domesticación sí puede plantear riesgos ecológicos: la idea de convertir especies de hierbas perennes cespitosas (por ejemplo, para campos de golf) en resistentes a herbicidas, acarrea una gran probabilidad de diseminación e invasión de ecosistemas, con la correspondiente imposibilidad de eliminar las malas hierbas con el herbicida para el que han adquirido tolerancia. Este tipo de plantas debería prohibirse.

Quizá más relevante es considerar el aumento de la frecuencia del transgén en poblaciones silvestres (o híbridos cultivado-silvestre) y su eventual conversión a mala hierba o aumento de poder invasivo. Hay pocos estudios que hayan intentado evaluar la eficacia biológica de los transgenes una vez han entrado en poblaciones silvestres. En principio, un transgén podría incrementar su frecuencia por inundación demográfica o por selección natural.

La **inundación geográfica** ocurre cuando hay una migración continua desde una población grande (en este caso el cultivo) hasta una población receptora más pequeña (el pariente silvestre). Modelos teóricos predicen que en esta situación los alelos del cultivo (i.e., el transgén) se fijan rápidamente en las poblaciones silvestres, incluso aunque reduzcan la eficacia biológica

(cuando la tasa de migración es mayor que el coeficiente de selección,  $s$ ), y ello a su vez podría conducir a la extinción local del silvestre.

Si los efectos de la **selección natural** son mayores que los de la migración, hay que tener en cuenta la eficacia biológica del transgén en la planta silvestre. Ello se puede calcular comparando la eficacia de la transgénica con la isogénica no transgénica, de lo que se puede estimar el valor de  $s$ , el coeficiente de selección.

- Si el transgén no confiere ventaja (o es costoso) a la planta silvestre, su destino vendrá determinado por la deriva genética. Este podría ser el caso de rasgos como la facilidad de recolección, maduración del fruto, etc.
- Los transgenes para caracteres que confieren **mayor eficacia biológica** (resistencia a patógenos, tolerancia a herbicidas, tolerancia a sequías, resistencia a insectos) pueden beneficiar a las poblaciones silvestres, y por lo tanto aumentar su frecuencia por selección natural. La dinámica evolutiva de cada uno de estos tipos de rasgos vendrá determinada por el equilibrio entre el beneficio del rasgo (en presencia del agente selectivo) y el coste del rasgo (reducción de eficacia de los transgénicos) en ausencia de presión selectiva).
  - Hay pocos estudios reales al respecto. Uno de ellos evaluó la eficacia biológica de *Helianthus annuus* silvestre “contaminado” con gen Bt que confiere resistencia a insectos procedente de girasol. El estudio sugirió que si un gen Bt se escapara a poblaciones de girasol silvestre, aumentaría su frecuencia por selección natural, y la tasa de incremento variaría en espacio y tiempo en función de la abundancia de herbívoros lepidópteros.

Por lo tanto, especial atención habrá que prestar a los transgenes que confieran mayor eficacia biológica (*fitness*), pero aquí hay que diferenciar entre ventajas adaptativas que dependen solamente de presión selectiva aplicada por el hombre y las que dependen de presiones selectivas operativas en ciertos ambientes.

Si la **presión selectiva depende de los humanos**: los riesgos son menores, porque se controlan retirando dicha presión. Por ejemplo, en el caso de la tolerancia a herbicidas, los agricultores y los servicios de extensión deben ser conscientes de la necesidad de usar viejas prácticas como la rotación de cultivos y el cambio frecuente de tipo de herbicida, para disminuir la presión selectiva. Además, esto va en beneficio del propio agricultor, al que no le interesa ver su campo inundado de malas hierbas que no pueda eliminar fácilmente.

Desde hace más de 10 años se van acumulando datos de estudios controlados:

- En 2001, estudio comparativo entre el comportamiento de cosechas transgénicas y de sus equivalentes convencionales. Se evaluaron cuatro cultivos diferentes (colza, patata, maíz y remolacha) en doce hábitats distintos a lo largo de diez años. En ningún caso se encontró que las transgénicas fueran más invasivas o persistieran más que sus homólogas tradicionales, y eso a pesar de que algunas de las construcciones genéticas determinaban rasgos como tolerancia a herbicidas o resistencia a insectos. De hecho, en algún caso, las transgénicas tenían menos capacidad de sobrevivir en ausencia de intervención humana.
- Aparición de hierbas resistentes a glifosato (Roundup de Monsanto) cerca de plantaciones de algodón tolerante a ese herbicida.
- Estudio del impacto acumulativo de cosechas transgénicas tolerantes a herbicidas en condiciones agrícolas “reales”, no experimentales.
- Recordemos de todos modos que existen malas hierbas resistentes a herbicidas antes de la ingeniería genética, y que eso forma parte de la dinámica evolutiva.



Ahora bien, otro tipo de problemas se puede plantear con aquellas plantas que incorporan genes que les permiten tolerar **presiones selectivas presentes en su ambiente** y no controlables por los humanos. Tal sería el caso de plantas de cultivo resistentes a determinados estrés abióticos, como sequías, salinidad, suelos ácidos, etc., y que están pensadas para permitir cosechas en terrenos hoy día poco productivos. En estos casos habrá que extremar las precauciones, y eventualmente prohibir ciertas manipulaciones que conlleven riesgos inasumibles de dispersión incontrolada de la planta a terrenos de alto valor ecológico. En el caso de híbridos entre el transgénico y el silvestre, habrá que meditar los datos existentes de híbridos entre cultivo convencional y silvestre: se han documentado casos en los que los híbridos son más invasivos que su propio pariente silvestre. Es decir, ya sabemos por experiencia que alelos de cultivos pueden mejorar el poder invasivo de las plantas silvestres, aunque no sabemos cómo se comportarán los transgenes del tipo de aludido (que determinan resistencias a estreses bióticos y abióticos).

De todas formas, se nos olvida que las auténticas “supermalezas” están con nosotros desde mucho antes de la ingeniería genética: son sobre todo plantas introducidas fuera de su área natural de distribución, a menudo por jardineros, o accidentalmente, con los viajes de unas partes a otras del planeta. En el Reino Unido, y debido sobre todo a introducciones por jardineros, hay actualmente nada menos que 3.000 especies exóticas, el doble que las especies indígenas. ¿Qué criterio lógico existe para desatender la solución de este atentado ecológico (considerado uno de las más graves a escala mundial), mientras sólo nos concentramos en los riesgos de una tecnología recién llegada? El problema de las especies invasivas debe abordarse con los mismos criterios, tanto para especies silvestres fuera de su ámbito biogeográfico, como para domésticas, independientemente de que sean o no transgénicas.

### ***Efectos indeseables de las plantas resistentes a insectos***

Desde hace decenios se conoce un grupo de bacterias del género *Bacillus* que, durante su proceso de esporulación, producen unas proteínas con actividad insecticida muy selectiva frente a las larvas de ciertos insectos, principalmente lepidópteros y coleópteros. Se trata de las llamadas endotoxinas delta o proteínas cristalinas “Cry”. Cuando la larva del insecto ingiere material vegetal que lleva estas sustancias, pasan al tracto digestivo, donde sufren una activación que finalmente conduce a la muerte del insecto. Desde los años 60 se vienen usando preparados a base de bacterias o esporas para el control de ciertas plagas forestales o agrícolas, siendo populares entre algunos agricultores “biológicos”, debido precisamente a su carácter inofensivo para el resto de la fauna y la flora.

Uno de los primeros logros de la ingeniería genética de plantas fue el obtener plantas transgénicas con alguno de los genes de las proteínas Cry de *B. thuringiensis* (de ahí el nombre de plantas Bt), que por lo tanto están “autoprotegidas” frente a posibles ataques de insectos. Especialmente interesante es el caso del maíz Bt, resistente al temible “taladro”, un pequeño lepidóptero cuyas larvas realizan galerías en el interior de los tallos, y que obligaba a emplear grandes dosis de insecticidas químicos (y no siempre con los resultados deseados). La Agencia de Protección Ambiental norteamericana (EPA) ha certificado la utilidad de las plantas Bt, “al incrementar los rendimientos y reducir los costes derivados de los insecticidas químicos”. Los estados sureños norte-

americanos han reducido ya el empleo de insecticidas químicos no selectivos, coincidiendo con la plantación masiva de cosechas transgénicas.

Este desarrollo prometedor debe, sin embargo, enfrentarse a posibles riesgos agrónómicos y ecológicos, que se están evaluando: a) el surgimiento de plagas de insectos resistentes al insecticida Bt (lo que, además, inutilizaría un valioso recurso de la agricultura biológica); b) la posibilidad de que se produzcan efectos indeseados sobre insectos beneficiosos; c) otros efectos indirectos sobre la biodiversidad. Pasamos a comentarlos.

### *Surgimiento de insectos resistentes a Bt*

El tema donde parece haber más consenso es el del surgimiento de mutantes de insectos resistentes a la toxina Bt, cosa previsible debido a que se trata de un rasgo monogénico (pero el surgimiento de resistencias monogénicas en insectos es habitual con los insecticidas químicos, que presentan más desventajas ecológicas). Por lo tanto, se impone diseñar una buena gestión de la resistencia para alargar la vida de esta tecnología Bt, que permite un mejor control integrado de plagas.

Un reciente meta-análisis ha revisado 77 estudios en los cinco continentes con cosechas Bt, revelando que aunque la mayoría no registraron incidencias, se habían detectado casos de insectos resistentes en 5 de las 13 principales de plagas, si bien los cultivos en general seguían funcionando bien. Este trabajo resaltó la necesidad de seguir con las estrategias de gestión que se detallan a continuación.

Como **estrategia proactiva** para evitar o retrasar la aparición de resistencias, y alargar así la vida útil de estas plantas autoprotegidas de tipo Bt, se ha propuesto la llamada estrategia de **“alta dosis-refugio estructurado”**, diseñada para contraseleccionar los insectos heterocigotos para el gen (recesivo) de la resistencia.

- La alta dosis se define como 25 veces la concentración de toxina Bt necesaria para matar insectos susceptibles a una  $DL_{99}$ , lo que permite matar heterocigotos (RS) para el alelo de resistencia (asumiendo que la supervivencia del heterocigoto es menos del 5 % de la del homocigoto para el alelo resistente).
- El refugio estructurado alude a intercalar entre las áreas transgénicas un 20 % (caso del maíz) o 50 % (algodón) de la superficie de cosecha no transgénica (“refugios”), con objeto de permitir el cruzamiento de insectos resistentes (RR) y sensibles (RS y SS), con el efecto de que se “diluyan” los alelos de resistencia en sucesivas generaciones y el insecticida pueda matar a los heterocigotos (RS).

Habrà que cuidar que los agricultores respetan esta estrategia, ya que puede ocurrir que si los cultivos Bt son muy rentables, haya productores que tengan la tentación de sembrar todo con plantas Bt, poniendo en riesgo el éxito a largo plazo del control de insectos. Recientemente se ha alertado del hecho de que en la India no siempre se respetan estas recomendaciones para el algodón transgénico, con el consiguiente riesgo de surgimiento de resistencias en insectos. Que se sepa, China, que cultiva millones de hectáreas de cultivos Bt, no tiene una regulación oficial sobre la implementación de refugios, pero esto sí ocurre en el resto de países.

Por otro lado, en los EEUU y otros países desarrollados existe la obligación de realizar monitorizaciones detalladas que detecten síntomas precoces de surgimiento de insec-

tos resistentes. Los expertos en la materia reconocen que esta es seguramente la primera vez que se introduce un control proactivo tan detallado en la gestión de las resistencias a toxinas frente a insectos (esto no se ha hecho a este nivel con los insecticidas químicos). Se trata de una tarea ingente, debido al trabajo de campo requerido y a las herramientas estadísticas manejadas. La educación de los agricultores es esencial en todo este proceso, para que aprendan a gestionar el valioso recurso que se pone en sus manos y no se amenace su sostenibilidad. En esta tarea se obliga a los fabricantes y distribuidores a implicarse a través de cursos de capacitación.

La **estrategia reactiva** consiste en tener preparados otros recursos transgénicos para cuando surjan las resistencias a la primera generación de plantas con resistencia a insectos incorporada.

- Construcción de plantas transgénicas con dos o más genes Bt (para los que la resistencia no diera reacción cruzada): estrategia “de genes apilados o en pirámide”. Ello permite usar refugios más pequeños.
- La mejor manera de retrasar la resistencia a un insecticida es evitar la exposición continua a la toxina. La próxima generación de plantas Bt expresará toxinas bajo secuencias de ADN (promotores) que sólo se activarán bajo determinados estímulos externos aplicados por los agricultores cuando éstos tengan indicios de una infestación. El resto del tiempo, las proteínas insecticidas no se producirán (los genes quedarán “silenciados”), con lo que se reducirá la probabilidad de surgimiento de insectos resistentes.
- La industria está desarrollando nuevas cepas de cultivo con nuevos genes de toxinas selectivas para insectos, lo que garantizaría el control a largo plazo de las plagas

El mejor uso de los cultivos Bt será el que formen parte de un control integrado de plagas (CIP). El uso de Bt con métodos de cultivo o controles biológicos adecuados que por sí solos son de eficacia limitada, aumenta la eficacia y sostenibilidad del sistema general. El uso de algodón Bt ha eliminado de hecho poblaciones regionales de *Helicoverpa* del algodón en Arizona.

#### *Efectos sobre insectos “no-diana”*

Otro punto de análisis sobre posibles riesgos de las plantas Bt se relaciona con eventuales daños a insectos “no-diana” (diferentes a los que constituyen la plaga), algunos de los cuales son de hecho beneficiosos.

Un estudio de bastante repercusión pública indicaba que larvas de mariposa monarca alimentadas en laboratorio con hojas de algodoncillo (=cerraja, su alimento natural) espolvoreadas con polen de maíz transgénico Bt, sufrían graves anomalías de crecimiento y elevada mortalidad. En otros estudios de laboratorio se ha visto que insectos depredadores beneficiosos (mariquitas, crisopas) alimentados con larvas de insectos nocivos que a su vez se alimentaban de plantas Bt, tenían mayores tasas de muerte. Sin embargo, todos ellos son estudios de laboratorio donde los insectos no tenían posibilidad de elegir su dieta, y sus conclusiones no son extrapolables a lo que ocurriría en el campo. Se trata de estudios del tipo de “peor escenario”, que sólo son la primera fase de la evaluación de impactos ecológicos que se debería aplicar a estas plantas “insecticidas”, siguiendo el modelo de la evaluación de efectos ecológicos de los insecticidas químicos. Por lo tanto, hay que completarlos con experimentos de complejidad

creciente, hasta estudios de campo que nos digan, de la forma más fidedigna posible, lo que ocurre en la naturaleza.

Tras el revuelo ocasionado por el estudio citado con la mariposa monarca, se realizó un gran esfuerzo para comprobar la situación en los campos de cultivo de maíz Bt respecto de la monarca. Precisamente, ya han salido varios estudios en campo y situaciones reales. En uno de ellos (financiado por el USDA) se vio que incluso plantas de algodoncillo situadas a sólo un metro de un campo de dos variedades maíz transgénico Bt no recibían descargas de polen tóxico de este. Un completo informe de la EPA (octubre 2000) establece “una probabilidad muy baja para las mariposas monarca en áreas externas a los maizales, e incluso dentro o en los bordes de los sembrados hay baja probabilidad de que las larvas de la mariposa encuentren niveles tóxicos de polen Bt”.

Los estudios sobre efecto de polen Bt sobre **insectos polinizadores** han dado resultados negativos.

Efectos sobre el **tercer nivel trófico**: a priori, una de las ventajas de las plantas Bt es que al ser sus efectos específicos (a diferencia de los insecticidas químicos), no deberían afectar a los artrópodos enemigos naturales de los insectos diana.

## Conclusión

Como se ve, buena parte (si no todos) los argumentos esgrimidos contra los transgénicos son en realidad aplicables igualmente a las plantas convencionales. El tipo de estudios multidisciplinares y de largo plazo, capaces de evaluar riesgos de cualquier tipo de proceso de mejora genética sencillamente no ha existido, y sólo ahora se está en camino de diseñar experimentos adecuados tanto para organismos transgénicos como para organismos convencionales, que nunca han pasado el severo escrutinio al que se está sometiendo la ingeniería genética.

La cuestión, entonces, está en que la Ecología aún no ha desentrañado la *línea basal* para definir de un modo absoluto *todos* los riesgos y efectos no intencionados de nuestras prácticas agrícolas. Pero además, dicha línea basal en realidad depende en buena medida de un juicio de valor que finalmente requiere decisiones políticas: qué grado de alteración ambiental estamos dispuestos a aceptar para lograr la obtención de alimentos y otros bienes agrícolas. Por lo tanto, quizás esa línea basal absoluta no se pueda trazar (por insuficiencias metodológicas y de teoría ecológica), ni convenga trazarla (porque sus costes financieros sean inasumibles para el tipo de datos que se puedan obtener). ¿Qué nos queda, pues?

- En primer lugar, reconocer y explicar a la opinión pública que toda agricultura (incluida la comercial y la “verde”) ha tenido, tiene y tendrá costes ecológicos; en segundo lugar, establecer estrategias que sean ambientalmente viables a largo plazo para asegurar la alimentación de toda la humanidad.
- Apoyando lo anterior, y una vez acordada la “línea basal” de impactos ecológicos que estamos dispuestos a aceptar (que en una primera instancia podría inspirarse en las mejores prácticas ya consolidadas), habría que desarrollar técnicas y prácticas que tiendan a disminuir el nivel de la primitiva línea basal de impactos, y por lo tanto aumenten el margen de seguridad ambiental y de suministro de alimentos. La otra cara de la moneda sería que cualquier nueva

planta o práctica agronómica que aumentara el nivel de impactos relativos podría prohibirse o desincentivarse

- Por lo tanto, habrá que dar la oportunidad a las nuevas técnicas y variedades para ver si “se ganan su sitio” junto a las anteriores, o eventualmente las pueden desplazar por sus mejores prestaciones *comparativas*. Hay que responder, pues, a cuestiones como las siguientes: ¿ayuda la nueva variedad a reducir el empleo de plaguicidas químicos?; ¿permite la nueva variedad laboreos menos agresivos con el suelo?; ¿aprovecha mejor la planta los insumos de agua, nutrientes, fertilizantes, etc?, ¿aumenta el nuevo cultivo la productividad neta, y por lo tanto se requiere menos superficie, evitando la necesidad de roturar nuevos terrenos?, etc.

Una consecuencia positiva de los recientes estudios es que, por primera vez, se dispone de datos abundantes sobre biodiversidad e interacciones incluso en cosechas convencionales, lo que suministra una “línea basal” con la que medir los efectos de las transgénicas. Hay que tener en cuenta que nunca antes se habían evaluado los efectos de cambios en las prácticas agrícolas (p. ej., cambiar el uso de un terreno desde una siembra de primavera a otra de invierno, o cortar setos silvestres entre campos de cultivo. Todos estos cambios “tradicionales” han tenido grandes efectos sobre la vida silvestre, aunque nunca se han regulado, y sus efectos eran difíciles de medir. Esperemos que esto ayude a los gobiernos a tomar decisiones sobre política agrícola y a los ecólogos a descubrir la mejor manera de proteger la naturaleza).

A pesar de ello, grupos ecologistas siguen oponiéndose a lo que es la única manera de avanzar racionalmente en la evaluación ecológica de las transgénicas. En algún caso se ha llegado a destruir plantaciones experimentales o se ha creado un clima “amenazante” hacia agricultores, para hacerles desistir de participar en estos estudios.

En última instancia quizá haya que desarrollar un paradigma de política científica que permita a las agencias públicas responsables realizar decisiones incluso en ausencia de un conocimiento exhaustivo (algo que probablemente es utópico), que reconozca como válidas ciertas decisiones en ausencia de un acuerdo universal, y que favorezca el reconocimiento y delimitación de aquellas áreas de incertidumbre en las que los criterios prudenciales (socialmente asumidos) conduzcan, llegado el caso, a moratorias o renuncias de desarrollo en función de los valores puestos en juego.