

# HUMANITAS

## HUMANIDADES MEDICAS

TEMA  
DEL MES  
ON-LINE

### LAS MODIFICACIONES GENÉTICAS DE LAS PLANTAS QUE COMEMOS

*Pere Puigdomènech*



*Director: Prof. Mario Foz*

N.º 39, Mayo de 2009  
ISSN: 1886-1601

# HUMANITAS

## HUMANIDADES MEDICAS

TEMA  
DEL MES  
ON-LINE

N.º 39, Mayo de 2009

---

## Director

### **Prof. Mario Foz Sala**

*Catedrático de Medicina. Profesor Emérito de la Universidad Autónoma de Barcelona*

---

## Consejo Asesor

### **Dr. Francesc Abel i Fabre**

*Director del Instituto Borja de Bioética (Barcelona)*

### **Prof. Carlos Ballús Pascual**

*Catedrático de Psiquiatría. Profesor Emérito de la Universidad de Barcelona*

### **Prof. Ramón Bayés Sopena**

*Catedrático de Psicología. Profesor Emérito de la Universidad Autónoma de Barcelona*

### **Dr. Marc Antoni Broggi i Trias**

*Cirujano. Miembro del Comitè Consultiu de Bioètica de Catalunya*

### **Prof. Edelmira Domènech Llaberia**

*Catedrática de Psicología. Departamento de Psicología de la Salud y Psicología Social. Universidad Autónoma de Barcelona*

### **Prof. Sergio Erill Sáez**

*Catedrático de Farmacología. Director de la Fundación Dr. Antonio Esteve. Barcelona*

### **Dr. Francisco Ferrer Rusalleda**

*Médico internista y digestólogo. Jefe del Servicio de Medicina Interna del Hospital de la Cruz Roja de Barcelona. Miembro de la Junta de Govern del Colegio Oficial de Médicos de Barcelona*

### **Dr. Pere Gascón**

*Director del Servicio de Oncología Médica y Coordinador Científico del Instituto Clínico de Enfermedades Hemato-Oncológicas del Hospital Clínic de Barcelona*

### **Dr. Albert Jovell**

*Médico. Director General de la Fundación Biblioteca Josep Laporte. Barcelona. Presidente del Foro Español de Pacientes*

### **Prof. Abel Mariné**

*Catedrático de Nutrición y Bromatología. Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona*

### **Prof. Pere Puigdomènech**

*Director del Laboratorio de Genética Molecular Vegetal CSIC-IRTA. Barcelona. Miembro del Grupo Europeo de Ética de las Ciencias y Nuevas Tecnologías (EGE)*

### **Prof. Jaume Puig-Junoy**

*Catedrático en el Departamento de Economía y Empresa de la Universidad Pompeu i Fabra. Miembro del Centre de Recerca en Ecomia i Salut de la Universitat Pompeu i Fabra de Barcelona*

### **Prof. Ramón Pujol Farriols**

*Experto en Educación Médica. Servicio de Medicina Interna. Hospital Universitario de Bellvitge. L'Hospitalet de Llobregat (Barcelona)*

### **Prof. Celestino Rey-Joly Barroso**

*Catedrático de Medicina. Universidad Autónoma de Barcelona. Hospital General Universitario Germans Triás i Pujol. Badalona*

### **Prof. Oriol Romaní Alfonso**

*Departament d'Antropologia, Filosofia i Treball Social. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona*

### **Prof. Carmen Tomás-Valiente Lanuza**

*Profesora Titular de Derecho Penal. Facultad de Derecho de la Universidad de Valencia*

### **Dra. Anna Veiga Lluch**

*Directora del Banco de Células Madre. Centro de Medicina Regenerativa de Barcelona*

# COMENTARIO EDITORIAL

## Abel Mariné Font

*Profesor emérito de Nutrición y Bromatología.  
Facultad de Farmacia. Universidad de Barcelona.*

La sociedad desarrollada, desde el final de la Segunda Guerra Mundial, ha conseguido notables logros de bienestar para muchos sectores de la población de bastantes países, aunque no para todo el mundo. Los progresos científicos y su aplicación en forma de diversas tecnologías han sido decisivos en este sentido. No obstante, sigue habiendo grandes desigualdades, que en el ámbito de la alimentación se manifiestan en forma de malnutrición o desequilibrios, por exceso o por defecto, que van desde la obesidad hasta las carencias en proteínas, minerales o vitaminas y, en casos extremos, en forma de hambre pura y dura.

Una de las ciencias que más repercusiones ha tenido en el progreso y bienestar humano es la genética, cuyas aplicaciones van desde nuevas terapias o medicamentos hasta nuevos alimentos como los modificados genéticamente o transgénicos. Pero las innovaciones tienen también sus detractores, bien sea por el mal uso que pueda hacerse de dichas innovaciones o bien por una percepción emocional o errónea de lo que estas innovaciones representan. Este tipo de percepciones forman parte de una serie de miedos o desconfianzas propios de sociedades con las necesidades materiales cubiertas, en las que se ha instalado una preocupación por la salud y por la seguridad que, muchas veces, va más allá de lo razonable. Un ámbito en el que los temores debidos a percepciones de este tipo se manifiestan de forma clara es en lo que respecta a los alimentos y la alimentación. Nuestra sociedad busca innovaciones y nuevas tecnologías en los automóviles, en los electrodomésticos o en los ordenadores, pero no las quiere en los alimentos, que deben ser "artesanos" o "como los hacía la abuelita", y desconfía de los alimentos con tecnología incorporada en forma de selección genética o procesado industrial. No se tiene en cuenta que la población aumenta y que cada vez más se acumula en ciudades, no en pueblos en los que el recorrido entre el productor de alimentos y el consumidor podía ser y era muy pequeño y éste solía tener un conocimiento directo de cómo eran los alimentos y quién los producía. Evidentemente la comida es un asunto delicado, ya que los alimentos los ingerimos, mientras que los automóviles o los ordenadores los manejamos y controlamos. En definitiva se desconfía de la innovación aplicada a producir y elaborar alimentos, que se estima que no está suficientemente controlada.

Los alimentos modificados genéticamente o transgénicos, dicho coloquialmente, están en el candelero de estos temores, no en el ámbito científico, sino en los medios de comunicación general y en la sociedad. Uno de los grandes impulsores de estos temores es *Greenpeace*, organización cuyos objetivos orientados a preservar la naturaleza, el medio ambiente y la biodiversidad todos debemos compartir, cuyos procedimientos son a veces discutibles y que no siempre constituye un referente científico. Los argumentos de los detractores de los alimentos transgénicos son fundamentalmente de tres tipos: 1) eventuales peligros para la salud humana, 2) prácticas abusivas de las grandes empresas que controlan la producción de semillas transgénicas y, en gene-

ral, las tecnologías que permiten obtener plantas y animales transgénicos, que perjudican a los agricultores, especialmente los pequeños y más débiles y 3) efectos negativos respecto a la biodiversidad.

Respuestas a estas aseveraciones, con todos los matices que el caso requiere ya que no estamos tratando de cuestiones simples, las podemos encontrar en diversos ámbitos científicos, y un ejemplo muy claro lo tienen los lectores de *Humanitas*. *Humanidades Médicas* en el número 25, de marzo de 2008, en el artículo de Jesús Mosterín "Dilemas éticos en la investigación biomédica". Evidentemente, como también se hace en el artículo del profesor Puigdomènech, respecto a la investigación y aplicación de resultados en relación con los alimentos deben tomarse en consideración las cuestiones éticas. En el apartado que el artículo del profesor Mosterín dedica a los alimentos transgénicos leemos textualmente: "De hecho, no se conoce un solo caso de planta modificada genéticamente que haya supuesto un problema para la salud humana" y "Argumentar contra las plantas y semillas transgénicas como 'comida de Frankenstein' es confundir la gimnasia con la magnesias". Asimismo pone en evidencia una obviedad: "El mayor enemigo de la biodiversidad es la agricultura". En efecto, en el momento en que el ser humano empezó a crear campos de cultivo, interviniendo en la naturaleza para establecer la agricultura y con ello la civilización, evidentemente afectó a la diversidad de aquella parcela que convirtió en cultivable. No es pues una cuestión provocada por los cultivos transgénicos. Es evidente que hay que preservar la biodiversidad, pero esto no está reñido con la agricultura y la ganadería correctas sin prácticas abusivas, que hay que reconocer que también se han dado. Es más, como también destaca Mosterín, "en la medida en que ciertos cultivos transgénicos incrementan el rendimiento agrícola, tanto mejor para la naturaleza", para concluir que: "Desde luego el mundo actual nos ofrece mil motivos de alarma, pero los cultivos transgénicos no parecen ser uno de ellos".

Desde una amplia perspectiva, que contempla también los aspectos económicos, el profesor de ESADE Luis de Sebastián, nada sospechoso de estar al servicio de las grandes empresas que controlan el mercado de los transgénicos, muy crítico con ellas, en su libro *Un planeta de gordos y hambrientos* constata que "la mayoría de los cultivos transgénicos, el 60% por área cultivada, se da en América del Norte: Canadá (6%) y Estados Unidos (54%), donde -todo hay que decirlo- hasta ahora no se han manifestado efectos nocivos para la salud humana". También indica que hay estudios que "prueban que algunos pequeños agricultores (no dicen que sean especialmente pobres) y no sólo los grandes se han beneficiado de los cultivos transgénicos, con mayor producción y ahorro en insecticidas. Con lo cual pueden afirmar que no sólo las multinacionales ganan". Es evidente que no todo es blanco o negro, ya que los rendimientos varían mucho de país a país e incluso de región a región en un mismo país. El profesor de Sebastián hace una interesante observación al destacar que

en la cuestión de los transgénicos tan importante como la tecnología son los factores institucionales que la condicionan. Así, recuerda que la llamada "revolución verde" que a partir de genética convencional, hace unas décadas, revolucionó la agricultura y aumentó la productividad fue "organizada, dirigida y sus frutos repartidos libremente por instituciones oficiales, ministerios de agricultura y organismos de ayuda internacional". Y añade que, por el contrario, la "revolución" de los transgénicos "es obra de empresas multinacionales, que investigan por el motivo de lucro, como es natural en una empresa comercial privada en una economía de mercado, y tratan de ganar lo más posible con las inversiones millonarias que han hecho en desarrollar nuevas plantas y nuevos organismos. Sus inversiones tienen que ser protegidas, según la lógica del sistema, por las leyes de las patentes. Pero esta dinámica de mercado libre es lo que hace que sus productos sean inalcanzables para quienes no tienen dinero". Por esta razón hay que insistir en que es deseable que haya una investigación pública potente en este ámbito, que ponga sus resultados al alcance de todo el mundo.

El pasado 28 de noviembre de 2008, la revista *Science* publicaba, con el título "Alimentos biológicos y transgénicos: por qué no?", una reseña de Mark Tester sobre el libro *Tomorrow's Table. Organic farming, Genetics, and the Future of Food* (La mesa de mañana: agricultura biológica, genética y futuro de los alimentos), del que son autores Pamela Ronald, genetista de plantas de la Universidad de California, y Raoul Adamchak, agricultor biológico y también profesor de la misma universidad. Estos autores muestran que la llamada agricultura biológica, que suele ser el paradigma de los "antitransgénicos", y las plantas transgénicas no son incompatibles sino todo lo contrario, ya que los transgénicos pueden contribuir a la llamada agricultura biológica al permitir ahorrar pesticidas. Dicho sea de paso, es obvio que los cultivos tradicionales (con abonos y pesticidas) y la obtención de plantas y alimentos transgénicos son también procesos biológicos. La apropiación que los defensores de la agricultura sin productos químicos hacen del término biológico, con pretensiones de exclusividad, será legal pero científicamente es más que discutible. Aquí se ha aplicado el criterio del personaje de Lewis Carroll Humpty Dumpty: "Cuando yo hago servir una palabra significa exactamente lo que yo quiero que signifique, ni más ni menos". Por otro lado, es evidente que la agricultura y la ganadería "biológicas o ecológicas" (a las que no hay nada que objetar, todo lo contrario), no pueden ser la única forma de obtener alimentos, ya que su productividad no permite alimentar a toda la población actual mundial y sus precios no están al alcance de todos.

La revista *Nature* del pasado 4 de diciembre de 2008 nos aportaba otro ejemplo de los beneficios de los organismos genéticamente modificados o transgénicos. Emma Marris, en "El biotecnólogo humanitario", informaba sobre la mejora del valor nutritivo de la cassava o yuca, para permitir que un alimento pobre en nutrientes, pero al alcance de pueblos con carencias alimentarias, se pueda transformar en un alimento asequible, rico en proteínas, vitaminas y minerales, y esto, en la actualidad, sólo se puede conseguir con técnicas transgénicas.

Como ya hemos indicado, ningún estudio riguroso ha encontrado efectos negativos asociados a la ingestión de un producto transgénico autorizado. Sirva como ejemplo la simple constatación de que a pesar de la producción e ingestión de millones de toneladas de cereales transgénicos en todo el mundo, el número de personas intoxicadas por consumirlas es simplemente cero. Riesgos como la pérdida de la biodiversidad o eventuales apariciones de resistencias a antibióticos son improbables y no exclusivas de los transgénicos (el uso y abuso irracional de antibióticos para curar un resfriado o una gripe son mucho peores, por ejemplo).

Como dice Francisco García Olmedo en el libro de reciente aparición *El ingenio y el hambre. De la revolución agrícola a la transgénica*, "hablar de los riesgos de las plantas transgénicas y de los alimentos derivados de ellas –como de cualquier otra tecnología, sea la eléctrica o la del acero– no debe hacerse más que aplicación por aplicación. De hecho, la aprobación del cultivo y consu-

mo de plantas transgénicas se hace caso por caso, según un riguroso proceso en el que se tienen en cuenta todos los riesgos imaginados, por desdeñables que parezcan. Nunca en la historia de la innovación se han tomado precauciones tan extremas". Pero también nos recuerda que no existe el riesgo nulo y que toda actividad humana conlleva siempre un cierto riesgo que ha de ser evaluado en función de los beneficios que dicha actividad reporta: la vacuna de la viruela causó serios problemas a algunos individuos, pero salvó millones de vidas". Como también señala el profesor de genética de la Universidad de Barcelona David Bueno, "con criterios científicos se puede determinar que un transgénico concreto, en unas condiciones dadas, es seguro para el cultivo y el consumo con una probabilidad específica, pero por limitaciones estadísticas nunca llegará al 100% a pesar de que se pueda acercar mucho. No obstante, estos datos relativos, que también lo son para cualquier otro producto agronómico o alimentario, se han utilizado para proponer la prohibición absoluta de estos cultivos". Los que en los años sesenta del siglo pasado asistíamos a las clases del profesor Fraile en la Facultad de Farmacia de la Universidad de Barcelona, recordamos que, a modo de ejemplo de las exigencias desmesuradas de seguridad, indicaba que si llevamos al extremo el que de cualquier nuevo medicamento había que evaluar los efectos sobre la descendencia y se consideraba que los datos con animales eran insuficientes, todo nuevo medicamento sólo podría ser usado una o dos generaciones después de la que lo descubrió, ya que sólo así sabríamos qué ha ocurrido con los hijos o nietos de los que lo tomaron experimentalmente. Por otro lado, si las exigencias de seguridad se exageran, sólo las grandes empresas podrán superar las pruebas y no los pequeños productores.

En definitiva, como constata García Olmedo, respecto a los alimentos transgénicos, "no cabe sino concluir que esta tecnología se ha implantado de forma irreversible y que desempeña y desempeñará un papel clave en la respuesta a los retos alimentarios que tenemos ante nosotros. Europa viene tratando de excluirse de este avance técnico por razones ideológicas que, aplicadas con el mismo rigor a otras innovaciones, como por ejemplo las biomédicas, las electrónicas y las informáticas, nos dejarían relegados con respecto al resto del mundo".

Los temores de la Unión Europea, fruto de la presión de ciertos movimientos sociales y de consumidores con una visión ecologista simplista, a veces son excesivos y fruto de una visión más emocional que racional de las nuevas tecnologías. Por la vía de la caricatura alguien ha dicho que a este paso en el futuro China será la fábrica del mundo, India el despacho, Estados Unidos el laboratorio y el arsenal y Europa la residencia de la tercera edad. Adoptando los criterios de seguridad adecuados y discutiendo las cuestiones en el plano científico y no emocional, esto debe ser evitado. Vistos los argumentos y los procedimientos que emplean algunos grupos de detractores de los transgénicos, uno no puede por menos que evocar la frase del escritor y artista catalán Santiago Rusiñol: "Si tienes razón grita y, si no la tienes, grita más para que parezca que la tienes". Como también se ha dicho, si hacemos caso de cierto ecologismo de salón que cree que todo se arregla yendo en bicicleta podemos acabar muertos de hambre y a oscuras.

Las plantas transgénicas y en general los alimentos producidos gracias a los organismos genéticamente modificados son motivo de controversias, no son una panacea, y deben ser utilizados con criterio y prudencia tras ser debidamente evaluados, pero son un recurso con el que se debe contar, y que hay que procurar que esté al alcance de todos. Sirva mi comentario como obertura de una rigurosa aportación al respecto. El profesor Pere Puigdomènech, investigador experto en el tema y también en los aspectos éticos de la responsabilidad de los científicos, nos explica con rigor y claridad lo que son las plantas modificadas genéticamente o transgénicas y reflexiona, con profundidad, sobre los hechos y el impacto social de las modificaciones genéticas de las plantas que comemos, abordando estos temas en toda su complejidad.



Pere Puigdomènech Rosell

---

## CURRICULUM VITAE

---

### FORMACIÓN Y TÍTULOS ACADÉMICOS

- Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Barcelona (1970).
- Doctor en Ciencias (Thèse de l'Université, Mention Chimie Physique). Universidad de Montpellier, Francia (1974).
- Doctor en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Barcelona (1975).

---

### ACTIVIDAD PROFESIONAL

- Trabajó en el CNRS (Montpellier, Francia), en el Porstmouth Polytechnic (Gran Bretaña) y en el Max-Planck-Institut für Molekulare Genetik, Berlín (Alemania).
- Fue Profesor del Departamento de Bioquímica de la Universidad Autónoma de Barcelona.
- Actualmente es Profesor de Investigación del CSIC y Director del Centre de Recerca en Agrigenòmica, CSIC-IRTA-UAB.

---

### ACTIVIDAD ACADÉMICA Y DE INVESTIGACIÓN

- Su área de especialización es la Biología Molecular y más particularmente de Plantas, campo en el que ha publicado más de 180 trabajos científicos en revistas internacionales, entre ellas *Nature*, *PNAS*, *EMBO Journal*, y otras.
  - Ha dirigido 24 tesis doctorales en el ámbito de la Biología Molecular y ha colaborado en proyectos de investigación financiados por organismos españoles y europeos.
  - Ha publicado más de 300 artículos de divulgación científica y de opinión en periódicos como *El País*, *El Periódico de Catalunya*, *La Vanguardia*, *El Mundo*, etc. y en revistas como *Nature*.
  - Ha participado en reuniones y congresos internacionales, destacando el Congreso Internacional de Biología Molecular de Plantas del que fue Co-Presidente en su edición de 2003 celebrada en Barcelona y del Foro Global de las Biotecnologías celebrado en Concepción (Chile) en 2004.
    - Ha realizado actividades de evaluación de la investigación en España, Portugal, Francia y Finlandia.

---

## DISTINCIONES Y PREMIOS

---

- Es miembro de la Academia Europaea, de la Organización Europea de Biología Molecular, del Institut d'Estudis Catalans, de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona y de la Académie d'Agriculture de France.
- Ha sido miembro del Grupo de Alto Nivel de la Fundación Europea de la Ciencia sobre Biología y Sociedad y del Grupo Consultivo sobre Biotecnología Estados Unidos-Unión Europea, del Comité Científico Director de la Unión Europea y del Panel de Organismos Modificados Genéticamente de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, del Comité Científico de Genoplante (Francia) y Presidente de la Societat Catalana de Biologia.
- Actualmente es miembro de la Comisión Nacional de Bioseguridad, del Grupo de Ética de las Ciencias y las Nuevas Tecnologías de la Unión Europea, del Consejo Científico del Departamento de Ciencias de la Vida del CNRS (Francia), miembro del Board de la European Plant Science Organization y Presidente del Comité de Ética del CSIC.
- Ha recibido el Premio Narcís Monturiol de la Generalitat de Catalunya y el Premio de la Fundación Catalana per la Recerca.

# LAS MODIFICACIONES GENÉTICAS DE LAS PLANTAS QUE COMEMOS

## RESUMEN

La modificación genética de plantas mediante el uso de fragmentos génicos aislados en el laboratorio es una tecnología que se desarrolló a partir de la década de los 80. El uso de las tecnologías del ADN recombinante, junto con el uso de los cultivos *in vitro* de plantas y el desarrollo de sistemas de transferencia de genes en plantas basados en las propiedades de ciertos patógenos bacterianos de plantas estuvieron en el origen de estas metodologías. Con posterioridad se desarrollaron otras aproximaciones, pero la posibilidad de modificar el genoma de una planta con un gen que se ha aislado previamente abrió las puertas a muchas aplicaciones. Una de ellas es el uso de la modificación genética como herramienta de investigación. Gracias a ellas es posible estudiar de forma precisa la función de secuencias génicas aisladas y ello ha posibilitado un enorme avance en nuestro conocimiento de fenómenos básicos de las plantas como su fisiología, su desarrollo o sus interacciones con patógenos.

Pero aparte de las aplicaciones para la investigación básica en Biología Vegetal, las plantas modificadas genéticamente han despertado un gran interés por parte de agricultores y empresas de semillas. Este interés está basado en las oportunidades que ofrece para la mejora genética. La mejora es una disciplina basada en la genética y que trata de obtener plantas con propiedades mejoradas de cultivo o de calidad del producto. Esta disciplina que ha permitido que a lo largo del siglo XX la producción de alimentos haya crecido más que el aumento de la población tiene sus limitaciones. Entre éstas quizá la más importante es que se basa en la variabilidad genética que existe en la especie que se trata de mejorar. Si un gen determinado no existe ya entre las poblaciones que forman la especie la mejora es imposible. La modificación genética de las plantas apareció como una oportunidad para crear un nuevo tipo de variabilidad utilizable para la mejora de los cultivos.

El uso de las plantas transgénicas ofrecía por tanto una oportunidad interesante, pero también unos riesgos, ya que su campo de aplicaciones es vastísimo. Por esta razón en todo el mundo se pusieron en marcha regulaciones que permitieran un análisis científico caso por caso de las plantas modificadas que se propusieran para su cultivo o su consumo humano o animal. Este análisis debería considerar cualquier información posible para asegurar que antes de autorizar uno de estos cultivos no hubiera ningún indicio de que la planta planteara algún problema de salud humana o animal o de daño al medio ambiente diferente de los cultivos

tradicionales. En la Unión Europea el análisis está realizado por un panel de científicos (el GMO Panel) constituido en la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA). En la actualidad se están plantando más de 100 millones de hectáreas de plantas transgénicas que son esencialmente maíz, soja, algodón y colza en muchos países del mundo, especialmente de América y Asia. Estas especies se han modificado con genes que les confieren resistencia a insectos o tolerancia a herbicidas. Se han diseñado también plantas que deberían tener efectos positivos para la salud como plantas de arroz que producen provitamina A o plantas de tomate que producen antocianinas. Unas y otras deberían prevenir problemas de avitaminosis o proporcionar dosis de antioxidantes. También se ha demostrado que es posible producir proteínas de interés terapéutico en plantas, aunque ningún producto de este tipo ha sido aprobado todavía. Las plantas modificadas genéticamente no son la única posibilidad que propone la Genética Molecular en sus aplicaciones a la mejora genética. Ya hace tiempo que se utilizan marcadores genéticos basados en las técnicas de ADN que permiten acelerar el proceso de mejora. En la actualidad estamos presenciando una explosión de datos sobre los genomas de las plantas que se utilizan como modelo para la Biología Vegetal o que son los principales cultivos. La genómica nos debería proporcionar una enorme riqueza de información que podrá emplearse en la mejora ampliando el rango de aplicación de las aproximaciones moleculares hacia caracteres más complejos o especies que no han podido ser estudiadas por su propia complejidad. La aplicación de estas nuevas tecnologías ha desatado una gran polémica, sobre todo en Europa. Una reflexión general sobre las condiciones de aplicación de nuevas tecnologías en agricultura debería poder identificar los criterios básicos que podrían primar en las decisiones que se tomen en cuanto a su uso. Por una parte, la agricultura está destinada a proporcionar alimento suficiente, seguro y saludable a la mayor proporción posible de la población de nuestro planeta. Por otra parte, es una condición de justicia que las tecnologías que aplicamos no produzcan problemas de alimentación a las generaciones que nos sigan. Por tanto, la sostenibilidad de la agricultura basada en las nuevas tecnologías debería aparecer también como un requerimiento en el uso de nuevas técnicas. Es en este marco complejo en el que el futuro de las plantas transgénicas y cualquier otra tecnología debería poder examinarse.



# GENETIC MODIFICATIONS OF THE PLANTS THAT HUMANS CONSUME

---

## SUMMARY

---

Genetic modification of plants using gene fragments isolated in the laboratory is a technology developed from the 80s. The use of recombinant DNA technology, along with the use of in vitro cultures of plants and the development of gene transfer in plants based on the properties of some bacterial pathogens of plants were at the origin of these methodologies. Subsequently other approaches were developed but the possibility of modifying the genome of a plant with a gene that has been isolated previously opened the door to many applications. One is the use of genetic modification as a research tool. Thanks to genetically modified plants it is possible to precisely study the role of gene sequences isolated and this has enabled a huge advance in our understanding of basic phenomena of plants and their physiology, their development or their interactions with pathogens. But apart from applications for basic research in plant biology, genetically modified plants have aroused a great interest to farmers and seed companies. This interest is based on the opportunities for genetic improvement. Plant Breeding is a discipline based on the Genetics and aimed to produce plants with improved properties or crop quality. This discipline has allowed throughout the twentieth century that food production has grown faster than the increase in population but it has its limitations. Among these perhaps the most important is that it relies on genetic variability that exists in the species. If a gene does not exist among populations that form the species breeding is impossible. Genetic modification of plants appeared as an opportunity to create a new type of variability to be used for crop improvement.

The use of transgenic plants therefore offers an interesting opportunity but it presents also risks because its range of applications is very vast. For this reason in the world regulations were put in place that make a scientific analysis necessary in a case by case base of the modified plants that are proposed for cultivation or for human and animal consumption. This analysis should consider any possible information with the aim to ensure that before releasing one of these crops there is no indication that the plant posed any health or animal or damage to the environment than traditional crops. In the European Union this analysis is

conducted by a panel of scientists (the GMO Panel) established within the European Food Safety Authority (EFSA). Currently there are over 100 million hectares of transgenic plants planted in the world that are primarily maize, soybean, canola and cotton in many countries especially in America and Asia. These species have been modified with genes that confer resistance to insects or tolerance to herbicides. Plants have also been designed that should have positive effects on health such as rice plants that produce provitamin A or tomato plants that produce anthocyanins. Both should provide doses of vitamin to prevent problems of avitaminosis or antioxidants. It has been shown that it is possible to produce therapeutic proteins in plants although no products of this type have been approved yet. Genetically modified plants are not the only option proposed by Molecular Genetics in its applications for Plant Breeding. Genetic markers based on DNA techniques are being used since long time and they allow speeding up the breeding process. We are currently witnessing an explosion of data on the genomes of the plants that are used as models for plant biology or that are among the main crops. Genomics should provide us a wealth of information that may be used in Plant Breeding opening the range of application of molecular approaches to more complex characters or species that have not been studied due to their own complexity. The implementation of these new technologies has sparked a great controversy, especially in Europe. A general reflection on the conditions of application of new technologies in agriculture should be able to identify the basic criteria that would prevail in the decisions made regarding their use. On the one hand agriculture is intended to provide adequate food, safe and healthy as possible to the greater proportion of the population of our planet. On the other hand is a condition of justice that the technologies we apply would produce no problems in feeding the generations following us. Therefore the sustainability of agriculture based on new technologies should also appear as a requirement in the use of new techniques. It is within this complex framework where the future of transgenic plants and other technology should be discussed.





# LAS MODIFICACIONES GENÉTICAS DE LAS PLANTAS QUE COMEMOS

PERE PUIGDOMÈNECH

*Profesor de Investigación del CSIC. Director del Centre de Recerca en Agrigenòmica,  
CSIC-IRTA-UAB. Barcelona.*

## INTRODUCCIÓN

En las listas de anatemas que todo buen posmoderno debe aborrecer figuran objetos tan dispares como la energía nuclear, las líneas eléctricas de alta tensión, las autopistas, las antenas de teléfonos móviles y desde luego las plantas transgénicas. Muchas de estas cuestiones son complejas y para todos es difícil hacerse una idea de los valores o intereses que entran en juego y de las razones de unos y otros, a favor o en contra, y por tanto tomar partido en un sentido o en otro es complicado. Lo es incluso para los científicos que trabajamos en investigaciones relacionadas con el tema y que somos a menudo llamados a informar sobre la cuestión por quienes han de tomar decisiones o por el público en general. A todo ello se añade el hecho de que a menudo estas decisiones deben tomarse en situaciones de urgencia y con elevados grados de incertidumbre. Todo ello crea una cierta perplejidad ante la forma como entre todos tomamos decisiones en el mundo complejo, interconectado y globalizado en el que vivimos. Para entrar en el tema de qué son y cómo utilizamos las plantas transgénicas, deberíamos probablemente comenzar por definir el tema y su actual situación en el mundo.

Las plantas modificadas genéticamente, o plantas transgénicas, aparecen en la literatura científica en el año 1983. Dos grupos científicos, uno europeo y otro americano, demuestran en dos artículos publicados en dos de las mejo-

res revistas científicas mundiales, *Nature*<sup>1</sup> y *Cell*<sup>2</sup>, que es posible modificar el genoma de plantas con genes que previamente habían sido aislados en el laboratorio. Los dos equipos hacen el trabajo en el tabaco, una planta en la que la aplicación de estas tecnologías se lleva a cabo fácilmente, y usando una aproximación similar. Utilizan las propiedades de una bacteria, *Agrobacterium tumefaciens*, que en su ciclo de infección de las plantas utiliza un mecanismo muy sofisticado en el curso del cual transfiere genes propios al genoma de las plantas que infecta. Con ello la bacteria logra dirigir el desarrollo de las células vegetales y su metabolismo de forma que consigue un entorno favorable en el que proliferar y alimentarse. Este mecanismo fue modificado en el laboratorio de forma que fuera posible sustituir los genes que la bacteria transfiere a la planta por uno o varios genes de interés de un origen cualquiera. De esta forma los dos grupos demostraron que era posible utilizar *Agrobacterium* para transferir a una planta prácticamente cualquier gen que se hubiera podido aislar en el laboratorio.

Antes de llegar a este resultado, había habido desde luego decenios de investigación básica en múltiples direcciones. Por ejemplo, se investigaron las propiedades que tienen los vegetales de poder regenerar plantas enteras a partir de células vegetales aisladas. Esta es una propiedad muy específica y general en el reino vegetal en la que las plantas se diferencian de los animales y que es conocida y utilizada en



agricultura desde antiguo como, por ejemplo, en el uso de esquejes o injertos. Ya a partir de los años 50 se demostró que era posible mantener células vegetales en cultivo de forma prácticamente indefinida y mediante tratamientos hormonales adecuados regenerar plantas idénticas y normales a partir de ellas. Por tanto, si mediante el uso de *Agrobacterium* es posible transferir algún gen a células vegetales en cultivo, sería factible regenerar plantas con un nuevo gen en su genoma. Esta propiedad también se hace servir en otras de las técnicas que se utilizan para transformar vegetales, la biolística<sup>3</sup>. Se trata de una aproximación muy sencilla, que consiste en transferir el ADN que se desea incorporar a una célula vegetal utilizando partículas de un metal inerte, generalmente oro, en cuya superficie se deposita el ADN con el que se desea transformar una planta. Las partículas se lanzan a toda velocidad sobre un cultivo de células vegetales. Al atravesar las células se demostró que el ADN entra en el núcleo de la célula y se incorpora en el genoma. Tras el bombardeo se seleccionan las células transformadas y se tratan adecuadamente para regenerar plantas enteras que incorporarán el nuevo gen.

Otra línea de investigación esencial para poder llevar a cabo la transformación de plantas proviene de las técnicas del ADN recombinante aparecidas desde los inicios de los años 70. Estas técnicas permiten aislar genes de cualquier procedencia, amplificarlos, analizarlos y modificarlos si es necesario. Esto es esencial para la modificación genética de las plantas, porque si en la modificación queremos utilizar un gen que no procede de la misma especie, deberemos en primer lugar aislarlo y a continuación deberemos modificarlo de forma que la maquinaria celular de la planta lo reconozca como propio y lo exprese de la manera que deseamos. En general, esta modificación quiere decir ponerlo en un entorno que contenga un fragmento de ADN, habitualmente situado en la parte inicial del gen y que denominamos un promotor y otro en la parte final y que denominamos terminador. El promotor suele ser un fragmento de ADN de una planta que se sabe

favorece que la maquinaria de expresión de la célula vegetal acabe produciendo la cantidad del producto del gen introducido suficiente para que la planta adquiera la nueva propiedad al nivel deseado. El terminador es otro fragmento que indica a la maquinaria celular de la planta que el gen se termina. Esto quiere decir que debemos construir en el laboratorio el gen que queremos introducir con elementos, como el promotor o el terminador, de la propia especie vegetal o de otra cercana y de esta forma funcionará adecuadamente en la planta. La unión de todo este conjunto de técnicas de tan diverso origen hizo posible la obtención de las primeras plantas transgénicas el año 1983.

### ¿PARA QUÉ MODIFICAR LOS GENES DE UNA PLANTA?

Los experimentos publicados el año 1983 eran relativamente académicos, ya que se trataba de la demostración en el laboratorio de la posibilidad de transformar plantas. En realidad uno de los laboratorios era un laboratorio académico europeo (belga y alemán) y el otro el laboratorio de investigación de una multinacional suiza (CIBA-Geigy) en Estados Unidos. Ello nos indica que el interés por la modificación de las plantas era múltiple. Es fácilmente comprensible que la introducción de un gen conocido en una planta nos permite estudiar el funcionamiento de este gen específico, la forma como se regula su expresión y los efectos que tiene en la fisiología de la planta. Por tanto las plantas transgénicas son una herramienta muy poderosa para la investigación en biología vegetal. No hay duda de que, como en tantos otros dominios de la ciencia, la biología molecular ha proporcionado unas herramientas muy poderosas que nos han dado una información sobre la fisiología o la biología del desarrollo en las plantas que han hecho que los libros de texto hayan tenido que volver a escribirse. En este contexto, la modificación genética de las plantas es una de las herramientas que más resultados ha dado en la investigación en biología vegetal, de la misma



forma como los ratones transgénicos y *knock-outs* lo son para la biología de los mamíferos.

Pero hay otra gran tradición científica que esperaba la aparición de estas metodologías, la Mejora Genética. Podríamos sin duda remontarnos al origen mismo de la agricultura para explicar la importancia de la Mejora Genética. En la base del proceso fundacional de las sociedades humanas en el Neolítico se encuentra la identificación de un reducido número de especies vegetales y animales que proporcionaron la base de la alimentación para las sociedades humanas sedentarias y siguen siéndolo en la actualidad. La agricultura permitía que la alimentación dependiera de los agricultores y ganaderos que son sólo una parte de la sociedad. Con ello hacía posible que muchos otros ciudadanos se dedicaran a muchas otras actividades que facilitaron la emergencia de la organización social de las sociedades. En la actualidad este proceso ha progresado hasta tal punto que, en las sociedades avanzadas como las europeas, la agricultura puede emplear a un 2 o un 3% de la población que produce alimentos para el conjunto. Las especies animales y vegetales que se han usado para la agricultura y la ganadería fueron desde aquel momento el objeto de una presión selectiva muy intensa por parte de los humanos, de forma que en algunos casos se ha hecho difícil llegar a entender cómo eran en su estado salvaje. Igual que del lobo hemos obtenido centenares de razas de perro, también del teosinte, una planta con múltiples ramas y mazorcas de pocos centímetros hemos conseguido el maíz, una de las plantas esenciales en nuestra alimentación. Algo parecido puede decirse del trigo, del arroz y de muchas frutas y legumbres que comemos y que han sido la base de nuestra alimentación y lo siguen siendo en la actualidad.

Nuestra actividad de selección sobre las plantas y animales domésticos se convirtió a principios del siglo XX en una ciencia con la llegada de la Genética y se desarrolló en una disciplina conocida como Mejora Genética. En los últimos cien años, el éxito de los productos derivados de la Mejora Genética ha sido una de las razones

por las que la profecía de Malthus, según la cual nunca seríamos capaces de aumentar la producción de alimentos a una velocidad mayor a la del aumento de la población, no se ha cumplido al menos en términos generales. Por esta razón el impulso a la Mejora Genética en centros públicos y en empresas privadas ha sido constante en los últimos cien años. Quizá pudiera destacarse como un punto culminante en el desarrollo de la Mejora Genética los esfuerzos que se realizaron desde instancias públicas y fundaciones privadas a partir de la Segunda Guerra Mundial. Es el momento en que se fundan las Naciones Unidas y en Agricultura y Alimentación se funda la FAO (Food and Agriculture Organization) con el propósito de ayudar a desarrollar la producción de alimentos en el mundo. Es también el momento en el que se construyen varios centros en todo el mundo para preservar la riqueza genética de las especies esenciales para la alimentación del planeta y desarrollar y difundir semillas que incrementen la producción de alimentos. Se funda, por ejemplo, el CIMMYT en Méjico, centro dedicado a la mejora del maíz y del trigo, o el IRRI, en Filipinas, centro que está dedicado al arroz. De estos centros saldría, en particular, la llamada revolución verde, que dio lugar a un aumento espectacular de la producción de cereales sobre todo en Asia y la América Latina.

Pero la Mejora Genética tiene una gran limitación que deriva de que se basa en el uso de cruces entre individuos dentro de la especie. Por tanto, sólo se puede mejorar las características genéticas de una planta si el gen que se requiere para la mejora ya existe en la especie de que se trata o en una muy cercana que permita la polinización cruzada. Y puede ocurrir que en una especie cultivada determinada fuera interesante tener plantas con un carácter que no exista en el interior de la especie. En este caso la Mejora Genética clásica no puede utilizarse. Una alternativa a la que se ha recurrido para resolver esta situación consiste en producir mutaciones en las plantas, y para ello se han utilizado mutágenos químicos o radiactivos. Se llevaron incluso semillas a las islas del Pacífico en las





que se realizaban pruebas de bombas atómicas y de esta manera se consiguieron algunos avances en la obtención de nuevas variedades, aunque desde luego las mutaciones que se producen de esta manera son impredecibles, ya que se trata de efectos al azar sobre el genoma. Por esta razón, la modificación genética utilizando métodos moleculares abría una nueva puerta que permitiría conseguir variedades con un nuevo tipo de variabilidad. Se pensaba que con estos procedimientos la obtención de nuevos caracteres se podía hacer de forma directa y predecible, ya que se conoce con precisión cuál es el gen con el que se modifica la planta. De ahí que los experimentos del 1983 abrieran paso a un interés por el uso de estas metodologías por parte de quienes se dedican a la mejora genética tanto en instituciones públicas como privadas.

### ¿QUÉ MODIFICACIONES GENÉTICAS DE PLANTAS SE HAN LLEVADO A CABO?

Las modificaciones genéticas que se han llevado a cabo son de diversos tipos. Ya hemos dicho que por una parte es obvio que estas metodologías son de un gran interés para la investigación básica en Genética Molecular de Plantas. Como en cualquier otro sistema, si se desea averiguar la función de un gen o de un grupo de genes, la manera más eficaz es o bien suprimir su función creando algún tipo de mutante, o expresarlo de forma más elevada o en un sistema heterólogo y estudiar los efectos que aparecen en funciones del organismo. La Genética Molecular y el uso de plantas transgénicas en el laboratorio nos está permitiendo llegar a un conocimiento muy profundo de la fisiología de las plantas, de su biología del desarrollo o de cómo se defienden de los patógenos, por ejemplo. Por tanto, se han desarrollado tecnologías para modificar genéticamente muchas especies distintas de plantas, y gracias a ellas se han creado incluso colecciones de mutantes en las que se dispone de mutaciones en prácticamente todos los genes de la planta. Esto se ha hecho

sobre todo en especies modelo, como es el caso de *Arabidopsis thaliana* o del arroz. Las técnicas de la transformación genética nos permiten también disminuir o silenciar un gen o un grupo de genes que estén conocidos de una forma completa o controlada. De esta forma se puede observar el fenotipo de las plantas en estas condiciones. También podemos introducir marcadores de ciertos tipos celulares y estudiar el desarrollo de estas células en diferentes condiciones. Las herramientas de la Biología Vegetal basadas en las técnicas de transformación son múltiples.

En cuanto a las aplicaciones de la transformación genética, sólo han llegado a etapas cercanas a su uso en agricultura un pequeño número de modificaciones genéticas. Estas tienen que responder por una parte a la producción de algún nuevo carácter de interés para quienes cultivan la especie, y por otra parte que tengan un sentido comercial, es decir, que la inversión que se requiere para su desarrollo, explotación y aprobación se corresponda con el beneficio esperado en el mercado de la semilla correspondiente. A principios de 2009 se están plantando en el mundo unas pocas modificaciones genéticas que responden a estos criterios y la mayor parte de ellas corresponde a plantas resistentes a insectos y plantas tolerantes a herbicidas. Y en cuanto a especies en las que se aplica la modificación genética, se trata de grandes cultivos como el maíz, la soja, el algodón o la colza, con pequeñas superficies dedicadas a la papaya, el clavel o la patata. En cualquier caso, la extensión de los cultivos de plantas modificadas genéticamente ha ido creciendo y ha llegado a más de 100 millones de hectáreas en el año 2008<sup>4</sup>, lo cual es una demostración de la utilidad de la modificación. Se trata de uno de los ejemplos de adopción de una nueva tecnología por parte de sus usuarios potenciales, los agricultores, que más éxito ha tenido en los últimos años y ha dado grandes beneficios a quienes apostaron por ella. Es de destacar también la extensión de su uso a países en desarrollo que deberían ser los mayores beneficiarios de cultivos más productivos en el mundo.



En el caso de las plantas resistentes a insectos la modificación genética trata de proteger las plantas contra insectos que producen importantes pérdidas en los cultivos. Los casos más llamativos se dan en el maíz y el algodón. En el caso del maíz, existen insectos denominados taladros que se introducen en la caña de la planta y la debilitan de forma importante. Este insecto es muy difícil de tratar y por otra parte no existe en la especie algún gen de resistencia contra él que pueda ser fácilmente transferible a las variedades cultivadas. El algodón es objeto de ataques de insectos que hacen que durante su cultivo sea necesario efectuar varios tratamientos con insecticidas que tienen siempre un componente de toxicidad para los humanos y afectan a la fauna de forma importante. La solución a este problema la ha proporcionado la introducción en el maíz o el algodón de genes de procedencia bacteriana de cepas de los llamados *Bacillus thuringiensis* que producen una proteína que es tóxica para el insecto e inocua para los mamíferos. Las técnicas desarrolladas a partir de 1983 han permitido aislar el gen bacteriano, prepararlo adecuadamente en el laboratorio e introducirlo en el maíz o en el tabaco de forma que se han podido obtener variedades de estas especies resistentes a un conjunto importante de plagas y que se denominan variedades Bt. Éste es el maíz que se cultiva, por ejemplo, en España. En el caso del algodón, este tipo de modificaciones se ha impuesto en la mayoría de los países productores de esta fibra.

El otro gran carácter que se ha introducido en plantas mediante las técnicas de modificación genética es la tolerancia a herbicidas. En este caso la modificación va dirigida a permitir un cultivo más fácil por parte del agricultor. Por ejemplo, en el caso de la soja, el cultivo transgénico resistente a herbicidas más utilizado en el mundo, la modificación permite evitar el proceso de arado, ya que el uso del herbicida elimina las hierbas que compiten con la soja. La tolerancia se consigue mediante la introducción de un gen que no es sensible al herbicida. Se conoce que los herbicidas actúan sobre enzimas esenciales para el metabolismo de la planta. Por

ejemplo, el más utilizado, el glifosato, inhibe una de las enzimas de la biosíntesis de los aminoácidos aromáticos. En la naturaleza existen en plantas, animales o bacterias enzimas equivalentes que no son sensibles al glifosato. Por ello es posible introducir en la planta de interés el gen equivalente que procede de otra fuente y la planta se convierte en tolerante al herbicida. Los beneficios por hectárea en algunas zonas del mundo pueden casi doblarse, lo cual es obvio que interesa al agricultor. La demanda de soja ha crecido en todo el mundo como un componente esencial de los piensos, ya que es una de las especies que permite un mejor aporte de proteínas para la alimentación animal. En los países exportadores de soja como los Estados Unidos, Argentina o Brasil, estas variedades ha representado una enorme oportunidad de responder a la demanda planteada.

### UN MARCO REGULATORIO ESTRICTO

Está claro que si estas tecnologías son interesantes para el agricultor, éste va a tratar de usarlas y las empresas de semillas se pondrán a producir las semillas que van a encontrar aceptación en el mercado. Pero se trata de tecnologías muy poderosas y que pueden tener todo tipo de consecuencias. Por esta razón, desde su inicio ya se propuso que habría que utilizarlas con las mejores garantías de que no produjeran perjuicios de ningún tipo. En Estados Unidos a partir de 1986 y en Europa a partir de 1990 se se comenzó a dictar normativas para que antes de poner estas semillas en el campo se realizara un análisis del riesgo que podría plantear la introducción en el medio ambiente o en el consumo humano y animal de las plantas en las que hubieran utilizado las técnicas de modificación genética. Las normativas son bastante similares en los diferentes países, aunque en términos generales son más restrictivas en Europa. En la Unión Europea el estudio de los datos relativos a la modificación genética de una planta modificada genéticamente es una tarea de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA).



El objetivo del estudio es realizar un análisis caso por caso basado en datos objetivos, que concluye cuando el panel científico que está encargado de esta tarea está convencido de que la planta modificada no presenta ningún riesgo para la salud o el medio ambiente cuando se utilice para alimentación humana o animal o en su cultivo. Como hemos dicho, el análisis se realiza caso por caso, es decir, para cada modificación genética individual y para una especie determinada, lo que en términos del sistema regulatorio se denomina un “evento de transformación”, lo que trata de describir que se trata de una construcción génica determinada en una especie determinada. Una vez aprobado, el evento puede ser transferido dentro de la especie de una variedad a otra mediante cruces dentro de los programas de mejora de cada empresa de semillas.

En Europa, como en los demás países, el análisis debe basarse en datos científicos y por ello se constituyó un panel científico que en primer lugar dependía de la Dirección de Sanidad y Consumo de la Comisión Europea. Con posterioridad la responsabilidad pasó a uno de los paneles científicos que creó la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), lo que se conoce como el “GMO Panel”. Este panel está constituido por 21 científicos europeos, escogidos por sus competencias personales en disciplinas que van desde la biología molecular a la toxicología, pasando por el análisis nutricional o los efectos sobre el medio ambiente. El panel ha elaborado una guía de orientación en la que se describe cuál es el tipo de información que se requiere para aprobar una planta modificada<sup>5</sup> y que sirve para ayudar a quienes desean presentar una modificación genética para su consumo o cultivo en Europa. La información que se requiere incluye una descripción detallada de la modificación genética en términos moleculares, tanto de la construcción utilizada en la transformación como de la modificación realmente realizada en la planta y de cómo el gen que se ha introducido se expresa en la planta. Se analiza también si se producen modificaciones en el genoma distintas de las que produce la inser-

ción del nuevo gen y la estabilidad de éste a lo largo de varias generaciones. Desde el punto de vista analítico se requiere un análisis de los cambios eventuales en la composición de la planta y experimentos de alimentación en animales de laboratorio. El análisis está basado en una aproximación comparativa entre la planta modificada genéticamente y la más equivalente posible que no lo está. En cuanto a medio ambiente, se analizan los efectos sobre la flora y la fauna y el comportamiento agronómico de la variedad modificada.

Los datos que se recogen en el proceso de estudio de una planta modificada genéticamente han de tener siempre un aspecto comparativo entre la planta modificada y una equivalente no modificada, ya que, por ejemplo, toda planta cultivada tiene efectos sobre el medio ambiente. Todos ellos son proporcionados por la empresa que solicita la aprobación y tienen un coste de hasta 20 millones de euros, lo que indica la complejidad de la información necesaria y desde luego impone un límite al tipo de plantas que pueden aprobarse y a quién es el agente que puede permitirse la inversión necesaria para conseguir esta aprobación. Durante el proceso de aprobación en Europa los diferentes estados miembros de la Unión Europea tienen oportunidad de pronunciarse sobre los datos que se presentan y sobre su conveniencia. El panel de GMOs de EFSA examina la información, considera los comentarios de los países miembros de la Unión Europea y da una opinión favorable en el momento de que se convence de que no existe ningún indicio que pudiera indicar algún riesgo para la salud animal y humana o para el medio ambiente en el consumo o cultivo de la planta. Una vez la opinión está formulada, se pone en marcha un complejo proceso de aprobación que a menudo no llega a buen puerto. En cualquier caso, hasta ahora el análisis del riesgo que se ha efectuado en los diferentes países parece haber funcionado, ya que tras el cultivo de millones de hectáreas y el consumo de millones de toneladas de productos derivados de plantas modificadas genéticamente no se ha observado ningún efecto negativo en su consumo.





## **LAS MODIFICACIONES GENÉTICAS DE PLANTAS Y LA SALUD**

Por lo que hemos visto en los párrafos anteriores, los efectos de las plantas transgénicas sobre la salud son una de las principales preocupaciones de quienes deben autorizarlas antes de proceder a la aprobación de su cultivo o de su consumo. Todo ello va dirigido a que la introducción de estas nuevas variedades no produzca efectos negativos en términos de toxicidad o alergenicidad en los consumidores humanos o en los animales que las van a consumir. Y ésta es la primera preocupación que se tiene en relación con los efectos de las plantas transgénicas y la salud. Sin embargo, a distintos niveles de desarrollo existen plantas cuyas modificaciones genéticas han sido diseñadas para tener efectos positivos para la salud de los consumidores. Quizá el ejemplo más notable es el del llamado arroz dorado. Se trata de una variedad de arroz que fue desarrollada por un grupo suizo de la Universidad Politécnica de Zurich y que tenía como objeto corregir la carencia en vitamina A que padecen las poblaciones cuya dieta está basada esencialmente en el arroz<sup>6</sup>. El grupo suizo introdujo varios genes de distinta procedencia en el arroz de forma que en su grano se producía el precursor de la vitamina A. El arroz dorado ha sido objeto de intensas campañas en su contra y es posible que en el 2009, nueve años después de que su producción se publicara en una revista internacional, pueda por fin probarse si realmente es eficaz para reducir la falta de vitamina A, que es una causa importante de ceguera en niños de distintos países de Asia y África. Estos experimentos se llevan a cabo gracias a una subvención de la Fundación Melinda y Bill Gates. Se han dado a conocer otras plantas semejantes, como por ejemplo tomates que tienen en su pulpa una gran concentración de antocianinas que son antioxidantes conocidos. En cualquier caso, para que estas plantas lleguen a ser usadas será necesario que pasen los controles previstos en las regulaciones existentes, lo cual, tratándose de modificaciones del metabolismo de la planta,

puede ser un asunto complejo. De todas formas es un caso en el que los beneficios para la salud pueden necesitar que se considere si el balance de riesgos es muy superior.

Un segundo tipo de efectos sobre la salud de las plantas modificadas genéticamente consiste en utilizar las plantas para la producción de fármacos. Se demostró ya hace tiempo que era posible producir cualquier tipo de proteína en una planta. Distintos grupos de investigación han trabajado tratando de optimizar los procesos de producción y almacenado de estas proteínas y en los procesos de su purificación. De esta forma se ha demostrado que era posible producir hormonas, enzimas, o incluso anticuerpos, en plantas que pudieran servir para el diagnóstico de enfermedades o la terapéutica en plantas. También se ensaya la producción de antígenos para la producción de vacunas. Estas posibilidades han ido desarrollándose y algunos proyectos ya han entrado en el proceso de ensayos clínicos. Las dificultades para estas aproximaciones vienen de distintas direcciones. Unas provienen de la posibilidad de que semillas con proteínas terapéuticas aparezcan de forma ocasional en los alimentos. Se ha demostrado que en el transporte y almacenamiento de semillas es muy fácil que se mezcle algún tipo de semillas con otro. Otras proceden de la dificultad de asegurar niveles de producción y calidades en las sustancias producidas en plantas que sean equivalentes a los que se dan en cultivos celulares animales o de síntesis química. En cualquier caso, los costes de producción podrían ser imbatibles, ya que si una cosa sabemos hacer es cultivar plantas a buen precio. Como en tantos otros temas, los niveles de control y calidad que se establezcan en los sistemas de regulación que se aprueben en cada lugar pueden acabar siendo decisivos para poder utilizar estas metodologías.

## **LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS AGRÍCOLAS EN UNA PERSPECTIVA DE FUTURO**

La especie humana vive desde hace unos 10.000 años en sociedades en las que la pro-



ducción de alimentos es el trabajo de una minoría de la población. Esto ha llegado a su extremo en las sociedades occidentales desarrolladas en las que, como hemos mencionado anteriormente, puede llegar a un 2% el porcentaje de la población que está dedicada a la agricultura y la ganadería. Ello es un indicio de la enorme eficacia de los desarrollos tecnológicos que hemos aplicado a los cultivos agrícolas. Estos desarrollos han sido muchos, pero se han basado en la identificación de un pequeño número de especies animales y vegetales que hemos domesticado, lo que quiere decir que las hemos modificado a nuestra voluntad para que sean productivas y cultivables<sup>7</sup>. Este proceso de concentración de la producción agrícola en unas pocas especies ha llegado hasta el punto de que en la actualidad más del 50% de nuestras calorías las extraemos de tres especies de cereales: trigo, arroz y maíz. Gracias a la aplicación de la genética, primero de forma empírica durante los primeros siglos de su desarrollo, y de forma dirigida los últimos 100 años, la agricultura ha producido alimentos y otros productos de forma que llegamos al siglo XXI con una producción global de alimentos que ha crecido más que la población, de forma que no se han producido las grandes catástrofes alimentarias que se habían predicho. Sin embargo seguimos sin solucionar el problema de grandes poblaciones que no tienen un acceso correcto a la alimentación.

Está claro que los aumentos de producción de las especies cultivadas agrícolas no dependen sólo de la genética. Durante los últimos siglos hemos incrementado los regadíos, el uso de abonos y fitosanitarios, de una maquinaria más eficiente y de aproximaciones agronómicas crecientemente sofisticadas. Todo ello ha contribuido al aumento de la producción de alimentos en todo el mundo. La pregunta que nos hacemos ahora es qué tenemos que hacer a partir de ahora. La población humana sigue creciendo y probablemente lo seguirá haciendo hasta mediados de este siglo, mientras no somos capaces de resolver las enormes minorías de poblaciones que no tienen niveles suficientes de

alimentación. El objetivo de reducir a la mitad los más de 800 millones de humanos que pasan hambre en nuestro planeta no se está logrando a pesar de que en términos absolutos el número de individuos con acceso a una buena alimentación crece año tras año y de continuas declaraciones al respecto de los gobiernos a escala mundial<sup>8</sup>. Al mismo tiempo en grandes países del mundo la población está alcanzando unos niveles de riqueza que les permiten demandar una alimentación de mayor calidad. Las predicciones que se hacen de la distribución de la población nos hablan también de que en el 2050 la mitad de la población puede estar viviendo en unas 400 megaciudades de más de 10 millones de habitantes y esto requerirá nuevos esfuerzos para asegurar la seguridad de estas personas que vivirán cada vez más lejos de los lugares de producción de los alimentos. Por otra sabemos que nuestra alimentación es a menudo desequilibrada y que produce problemas de salud de tan grandes dimensiones como, por ejemplo, los debidos a la obesidad que está adquiriendo unas dimensiones de epidemia. Todo ello nos dice que los actuales niveles de producción agrícola no pueden disminuirse y que tenemos que llegar a mayores cotas de producción de alimentos que sean suficientes, seguros y saludables. Junto a todo ello estamos actualmente pidiendo a la agricultura que nos produzca además de alimentos, piensos y fibras, los productos habituales, otros como combustibles, productos farmacéuticos y que sea la fuente de productos para la industria que ahora extraemos de recursos no renovables como el petróleo. Todo ello no se desarrolla sin contradicciones.

Pero al mismo tiempo sabemos que nuestra agricultura es a menudo muy agresiva hacia el medio ambiente. Las aplicaciones de abonos y pesticidas llegan a menudo a nuestro entorno ambiental creando problemas de contaminación. Y hasta el momento, cuando deseábamos aumentar la producción agrícola lo que hacíamos era utilizar nuevas tierras que tomábamos a terrenos salvajes. En este momento sabemos que cuando deforestamos terrenos para culti-



varlos estamos creando problemas de desequilibrios medioambientales de gran magnitud, ya que el mayor impacto en el cambio climático lo produce la agricultura cuando se pasa de un estado salvaje a un estado de cultivo. Y nos preocupa la pérdida de especies animales y vegetales que se produce cuando aumentamos los terrenos cultivados. La preocupación por la pérdida de diversidad biológica ha llevado también a declaraciones internacionales<sup>9</sup> cuya eficacia parece ser relativa. Por ello existe en todo el mundo una gran preocupación por los procesos de deforestación que se dan por ejemplo en Brasil o en Malasia. Es por tanto un conjunto complejo de condiciones que se dan para una producción de alimentos a largo plazo a lo que tenemos que añadir la preocupación por el estado de la biodiversidad de las especies salvajes y de las especies cultivadas.

La variabilidad genética es la base sobre la que se construye la mejora genética. Sin poder escoger entre diferentes variedades que contienen caracteres genéticos distintos no hay posible mejora. Por tanto, cada vez que se pierde una variedad de una especie cultivada perdemos posibilidades de tener variedades nuevas que nos pueden interesar. Al mismo tiempo, la práctica de la agricultura se basa en eliminar las especies vegetales que existían en un terreno determinado y especies animales que pueden perjudicar un cultivo; por tanto, eliminamos variabilidad de especies que en algunos casos puede ser irreversible. La pérdida de biodiversidad es por tanto un riesgo inaceptable<sup>9</sup>. Por ello se han propuesto diferentes acciones que incluyen la creación de bancos de semillas, pero también nos impone una limitación en la expansión de las tierras cultivadas. Y sabemos también que el paso de un terreno desde una situación de no cultivo a cultivo produce los mayores efectos sobre el cambio climático, sobre el que la agricultura y la ganadería son actividades de gran importancia.

Por todo ello, a la hora de tomar decisiones de futuro en cuanto al uso de las nuevas tecnologías debemos tener en cuenta una ecuación que debe considerar al menos dos factores. Uno

de ellos es la necesidad de asegurar que la agricultura nos proporcione una alimentación suficiente para el conjunto de la población de nuestro planeta en condiciones de seguridad y que contribuya al estado general de salud del consumidor. Pero al mismo tiempo debemos tratar que la agricultura no sea un factor de contaminación del medio ambiente y de incremento del cambio climático, algo que acabaría impidiendo la continuidad de la misma producción agrícola de cara al futuro a los niveles que son deseables. En este contexto es imposible dejar de aprovechar las posibilidades de las distintas aproximaciones que tenemos para servirnos de las características genéticas de las plantas y modificarlas si es necesario.

En este sentido hemos hablado de la modificación genética de las plantas. Pero en los últimos años hemos visto otros grandes desarrollos de la Biología Molecular y la Genética aplicadas a las plantas. Por ejemplo, se han desarrollado gran cantidad de marcadores moleculares basados en las técnicas del ADN que son una herramienta preciosa para acelerar el proceso de la mejora genética. Al mismo tiempo hemos estado entrando en las plantas en la era de los genomas. Uno de los primeros genomas que fue resuelto entre los genomas de organismos superiores fue el de *Arabidopsis thaliana*<sup>10</sup>. Se trata de una especie modelo que tiene un ciclo de vida rápido pero también un genoma muy pequeño. El análisis de la secuencia ha permitido deducir que el genoma de esta planta contiene alrededor de 26.000 genes, un número que pareció pequeño hasta que se conoció que la especie humana no tiene muchos más. Tras el de *Arabidopsis* se secuenció el genoma del arroz, el del chopo, de la papaya (de hecho una papaya transgénica) y de la viña. En este momento están en marcha el del maíz, de la soja, del tomate y una larga lista que va a incluir probablemente todas las especies vegetales que son interesantes como modelo o por su uso en la agricultura. En España se ha comenzado la secuenciación del genoma del melón, que será el primer genoma resuelto en España de una especie superior. Esta enorme acumulación de datos nos dará



una información preciosa sobre la estructura de los genomas de plantas y las bases genéticas de sus aplicaciones, pero también permite el desarrollo de herramientas auxiliares a la mejora genética de plantas que pueden cambiar el panorama de la producción agrícola en el futuro. Puede permitir el análisis de genes complejos y aplicar la mejora genética a especies en las que por su complejidad genómica esto era difícil. Ello daría lugar a aplicaciones nuevas que no estén basadas en las plantas transgénicas, evitando así los aspectos emocionales de su uso.

Pero es bien conocido que las nuevas aproximaciones tecnológicas han creado siempre tensiones sociales a diferentes niveles. Cuando la producción de alimentos demuestra sus limitaciones vemos una cara del impacto que tiene el rendimiento de los cultivos. Un buen ejemplo de esto ocurrió en el año 2007. Una serie de circunstancias, entre ellas unas cosechas poco abundantes en países esenciales como Australia y Ucrania, dieron lugar a que se desencadenara una escasez de alimentos a la que se respondió con medidas proteccionistas en distintos países. Es posible que la desviación de ciertos alimentos hacia usos de producción de combustibles hubiera contribuido a la escasez, y es posible también que en estas circunstancias hubiera habido actividades especulativas que incrementaran el problema. En cualquier caso, el aumento de precios que se produjo demostró las limitaciones que tenemos en nuestra sociedad en cuanto a la producción de alimentos. A ello se añade la sensibilidad creciente de nuestras sociedades hacia los efectos medioambientales de las prácticas agrícolas y hacia la seguridad alimentaria. En muchos países occidentales hay una gran reticencia a que se utilicen nuevas tecnologías para la producción de alimentos y en particular al uso de plantas modificadas genéticamente. La oposición al consumo de alimentos derivados de este tipo de plantas es el ejemplo más claro. Encontrar un balance entre la necesidad de mantener o aumentar los niveles de producción y los problemas de percepción negativa que algunas tecnologías tienen ante la opinión

pública no es fácil y crea grandes dificultades a los responsables políticos a la hora de tomar decisiones sobre estas cuestiones.

## UNA OPINIÓN EUROPEA

Es en el contexto expuesto anteriormente en el que el Presidente de la Comisión Europea solicitó al Grupo Europeo de Ética de las Ciencias y las Nuevas Tecnologías (EGE) una opinión sobre las condiciones en las que pueden ponerse en práctica los nuevos desarrollos tecnológicos con aplicación a la agricultura. El EGE es un grupo consultivo del Presidente de la Comisión Europea formado por filósofos, juristas y científicos que asesora en temas de aplicaciones de nuevas tecnologías sobre todo de base biológica. El Grupo Europeo de Ética formuló su opinión en enero de 2009<sup>11</sup>. En la opinión se hace un análisis de la situación de la agricultura y del uso de nuevas tecnologías en ella. Pero el objetivo es extraer cuáles son los principios esenciales sobre los que se debe fundar un análisis general de su uso y cómo estos principios pueden ser compatibles con las políticas de la Unión Europea en el ámbito interno, como es la Política Agraria Común, o en el ámbito global en las discusiones sobre comercio internacional en las que la Unión Europea tiene un peso decisivo. Estos principios generales se identifican como el respeto a la dignidad humana y el respeto al principio de justicia social y distributiva.

El respeto a la dignidad humana es un principio reconocido en la mayoría de declaraciones sobre los derechos humanos. Desde este punto de vista debe reconocerse que de él se deriva el derecho a la alimentación, sin la cual es imposible llevar una vida digna. Pero al mismo tiempo se trata de que esta alimentación no sea sólo suficiente, sino que debe ser también segura. La seguridad de los alimentos es un requerimiento esencial en nuestra sociedad. Lo es sobre todo cuando tenemos en cuenta que cada vez vivimos más en sociedades urbanas lejos de la producción de alimentos. Por tanto en la larga cadena que existe entre el productor agrícola y





el consumidor es posible que se produzcan de forma inadvertida o incluso voluntaria incidentes que convierten el alimento en algo nocivo para la salud. Por ello se han introducido en todo el mundo complejos sistemas para garantizar la seguridad de los alimentos. Al mismo tiempo hemos descubierto que la alimentación es la base sobre la que se construye una vida sana. Va llegando a toda la población la información de que si tenemos una alimentación desequilibrada nuestra salud se resiente. El crecimiento de la obesidad en prácticamente todo el mundo, con sus secuelas de enfermedad, es una demostración de la importancia de conseguir una alimentación sana. El derecho a una alimentación suficiente, segura y sana se establece, por tanto, como uno de los criterios que deberían guiar las decisiones que tomemos en relación con los nuevos desarrollos en agricultura.

Junto a este derecho tenemos que incluir la justicia como valor en el que se basa nuestra sociedad. Podemos hablar de una justicia en la forma -cómo se distribuyen los alimentos-, y aquí los efectos del comercio mundial entre otros deberían tenerse en cuenta por sus consecuencias en los países productores de alimentos. Pero también hay que considerar la justicia en relación con las generaciones que van a seguirnos en el futuro. Tenemos una agricultura que a veces es muy agresiva con el medio ambiente, y ello plantea problemas de base ética en diferentes direcciones. Por ejemplo, la degradación del medio ambiente puede tener efectos inmediatos en la contaminación del agua o el aire, pero especialmente puede tener efectos a largo plazo en la degradación del suelo o en el agotamiento de las reservas de agua. Por tanto, estos fenómenos pueden comprometer la posibilidad misma de una producción de alimentos suficiente en el futuro. Por tanto, por una razón de justicia hacia las generaciones futuras deberíamos ocuparnos de que nuestra agricultura actual no fuera agresiva con el medio ambiente.

También se ha destacado que el aumento de la superficie cultivada tiene efectos a diferentes

niveles, contribuye al cambio de clima que está afectando al planeta en su conjunto y afecta a especies de plantas y animales que se están extinguiendo a una velocidad que no había sido igualada en el mundo. En este sentido la protección de la biodiversidad aparece como uno de los objetivos que se han planteado desde diversas instancias. Su justificación se basa en distintos aspectos. Por una parte se plantea que la especie humana, en tanto que especie dominante de nuestro planeta, debe actuar preservando las especies con las que convive en él y que han tenido su propia evolución junto a él. Por otra parte las especies ocupan nichos en la ecología de los sistemas naturales que pueden desequilibrarse al perderse alguna especie. También se ha dicho que cada especie es un conjunto de genes que tiene un interés intrínseco y pueden tenerlo en el futuro. La biodiversidad tiene también importancia en las especies cultivadas. Ya hemos visto antes que la mejora genética está basada en la existencia de una diversidad genética disponible en la especie. La pérdida de variabilidad implica posibilidades de mejora que se pierden. Por esta razón, como ya hemos comentado antes, en el mundo se han creado bancos de semillas de las especies cultivadas más importantes. El caso más extremo es la llamada Cúpula del Juicio Final construida en un lugar remoto de las islas Svarvald, en el Océano Polar Ártico, en la que se están depositando colecciones de semillas de las especies cultivadas más importantes que estarían a salvo incluso de una guerra nuclear.

En este contexto, nuevas tecnologías como las plantas modificadas genéticamente deberían utilizarse teniendo en cuenta los criterios que se deducen del análisis que hemos planteado. En este análisis debería tenerse en cuenta el impacto a que pueden dar lugar, y este impacto debe incluir tanto los posibles riesgos que se plantean como los beneficios a que pueden dar lugar. Por ejemplo, debe considerarse si plantean beneficios en cuanto a una producción más eficiente o si pueden ser beneficiosas con respecto al medio ambiente. En la situación que hemos descrito no podemos desdeñar aquello que nos



permite mantener la productividad de los cultivos, lo que nos puede permitir asegurar niveles adecuados de producción de alimentos. Por otra parte, debemos asegurarnos de que no creen problemas de seguridad alimentaria ni un impacto negativo en el medio ambiente que, como hemos visto, es a lo que van dirigidos los análisis requeridos por las actuales regulaciones existentes en la mayoría de los países del mundo. Pero, por otra parte, desde esta perspectiva hay que considerar otros aspectos que podrían limitar el acceso a las nuevas tecnologías allí donde más se necesitan. La existencia de una gran concentración de poder en distintos puntos en la cadena de producción o distribución de alimentos, ya sea en las semillas, en el transporte de grano o en las cadenas distribuidoras, puede ser un obstáculo para el acceso a la alimentación. El recurso a sistemas de protección de la propiedad intelectual como las patentes es también objeto de discusión. Podría ser que su aplicación a este tipo de productos no tuviera la función de estímulo a la innovación para la que las patentes fueron diseñadas. Se trata de aspectos que merecen ser discutidos a la vista de la situación en que nos encontramos y en la compleja perspectiva de futuro que se presenta ante nosotros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Herrera-Estrella L, Depicker A, Van Montagu M, Schell J. Expression of chimaeric genes transferred into plant cells using a Ti-plasmid-derived vector. *Nature* 1983; 303: 209-213.
2. Barton KA, Binns AN, Matzke AJ, Chilton MD. Regeneration of intact tobacco plants containing full length copies of genetically engineered T-

- DNA, and transmission of T-DNA to R1 progeny. *Cell* 1983; 32: 2033-1043.
3. Klein TM, Wolf RD, Wu R, Sanford JC. High-velocity microprojectiles for delivering nucleic acids into living cells. *Nature* 1986; 327: 70-73.
4. James C. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops. ISAAA-Briefs (2009) ISAAA SECenter. Manila.
5. GMO Panel. European Food Safety Authority. Guidance document of the GMO Panel for the risk assessment of genetically modified plants and derived food and feed. Mayo 2006. [http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific\\_Document/gmo\\_guidance\\_gm\\_plants\\_en,0.pdf?ssbinary=true](http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific_Document/gmo_guidance_gm_plants_en,0.pdf?ssbinary=true)
6. Ye X, Al-Babili S, Klöti A, Zhang J, Lucca P, Beyer P, Potrykus I. Engineering the provitamin A (beta-carotene) biosynthetic pathway into the (carotenoid-free) rice endosperm. *Science* 2000; 287: 303-305.
7. Diamond J. Evolution, consequences and future of plant domestication. *Nature* 2002; 418: 700-707.
8. Food and Agriculture Organization. Declaration of the High-Level Conference on World Food Security: The Challenges of Climate Change and Bioenergy. Junio 2008. Disponible en: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/foodclimate/HLCdocs/declaration-E.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/foodclimate/HLCdocs/declaration-E.pdf) [http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific\\_Document/gmo\\_guidance\\_gm\\_plants\\_en,0.pdf?ssbinary=true](http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific_Document/gmo_guidance_gm_plants_en,0.pdf?ssbinary=true)
9. Naciones Unidas. Convenio sobre Diversidad Biológica. Mayo 1992. <http://www.cbd.int/doc/legal/cbd-un-es.pdf>. Ver también el sitio web de la convención: <http://www.cbd.int/>
10. European Union Chromosome 3 Arabidopsis Sequencing Consortium (incluyendo a A. Monfort, E. Casacuberta & P. Puigdomènech), The Institute of Genomic Research & Kazusa DNA Research Institute Sequence and analysis of chromosome 3 of the plant *Arabidopsis thaliana*. *Nature* 2000; 408: 820-822.
11. European Group of Ethics in Science and Modern Technologies. Ethics of modern developments in agriculture. Enero 2009. [http://ec.europa.eu/european\\_group\\_ethics/docs/opinion24\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/european_group_ethics/docs/opinion24_en.pdf)