

# Avances Recientes en Biotecnología Vegetal e Ingeniería Genética de Plantas

ANTONIO BENÍTEZ BURRACO

EDITORIAL REVERTÉ

A microscopic view of plant tissue, likely a leaf, showing a complex network of veins. The image is overlaid with a glowing, yellow-green fluorescence pattern that highlights the vascular structure, creating a series of parallel lines and a grid-like appearance. The background is a soft, out-of-focus green.



**Avances recientes  
en biotecnología vegetal e  
ingeniería genética de plantas**



# Avances recientes en biotecnología vegetal e ingeniería genética de plantas

ANTONIO BENÍTEZ BURRACO



EDITORIAL REVERTÉ, S. A.  
BARCELONA - BOGOTÁ - BUENOS AIRES - CARACAS - MÉXICO

*Título de la obra:*

**Avances recientes en biotecnología vegetal e ingeniería genética de plantas**

**Dr. Antonio Benítez Burraco**

Investigador de la Universidad de Sevilla  
ESPAÑA

**Copyright © Antonio Benítez Burraco**

*Edición en español*

**© EDITORIAL REVERTÉ. S.A., 2005**

Edición en papel:

ISBN 978-84-291-1003-6

Edición e-book (PDF):

ISBN 978-84-291-9306-0

*Propiedad de:*

**EDITORIAL REVERTÉ, S. A.**

Loreto, 13-15, Local

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

e-mail: [reverte@reverte.com](mailto:reverte@reverte.com)

<http://www.reverte.com>

Con el patrocinio de:



Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

# Índice analítico

<b>Prólogo</b>	<b>ix</b>
<b>Introducción</b>	<b>xiii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>xxi</b>
<b>Relación de tablas, figuras y derechos de reproducción</b>	<b>xxiii</b>
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Los productos vegetales en la dieta humana</b>	<b>1</b>
<hr/>	
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Mejora clásica y mejora biotecnológica</b>	<b>9</b>
<hr/>	
2.1 La mejora clásica. Cruzamiento y selección . . . . .	9
2.2 La biotecnología como herramienta de mejora vegetal. . . . .	13
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Técnicas principales de biotecnología vegetal</b>	<b>17</b>
<hr/>	
3.1 Nuevos productos y funciones: ADN exógeno. . . . .	18
3.1.1 Preparación del ADN exógeno . . . . .	18

3.1.2 Métodos de transformación . . . . .	22
3.1.3 El problema de la introducción de ADN exógeno en los organismos vegetales: eficacia de las plantas transgénicas . . . . .	31
3.1.4 Nuevas soluciones . . . . .	34
3.2 Modificación de compuestos y funciones naturalmente presentes: ADN endógeno . . . . .	40
3.2.1 Silenciamiento génico . . . . .	40
3.2.2 Modulación de la expresión . . . . .	47
3.2.3 Expresión de genes endógenos mutados . . . . .	47
3.3 Búsqueda de nuevos genes y nuevas especies de interés para su utilización en biotecnología vegetal . . . . .	47

## Capítulo 4

### Cultivos transgénicos: mejora biotecnológica de la productividad vegetal

53

---

4.1 Incrementos cuantitativos de la producción agrícola . . . . .	54
4.1.1 Incremento del crecimiento vegetativo . . . . .	54
4.1.2 Resistencia al estrés abiótico . . . . .	56
4.2 Incrementos cualitativos de la producción agrícola . . . . .	62
4.2.1 Modificación de componentes endógenos . . . . .	62
4.2.2 Introducción de componentes exógenos . . . . .	64
4.3 Mejora de las condiciones de procesamiento . . . . .	73
4.4 Las plantas como biorreactores . . . . .	74
4.4.1 Consideraciones generales . . . . .	74
4.4.2 Los cultivos celulares como una alternativa a los cultivos vegetales tradicionales . . . . .	76
4.4.3 Los cultivos de raíces (transgénicas) . . . . .	77
4.4.4 Nuevas técnicas de obtención de compuestos xenogénicos . . . . .	80
4.4.5 Síntesis de productos de interés biofarmacéutico . . . . .	81
4.4.6 Biopolímeros . . . . .	89
4.4.7 La mejora de procedimientos industriales. Enzimas de interés industrial . . . . .	95

## Capítulo 5

### Cultivos transgénicos: mejora biotecnológica de las prácticas agrícolas desde el punto de vista medioambiental

97

---

5.1 Aspectos físicos . . . . .	98
5.1.1 Fertilizantes y biofertilizantes . . . . .	98
5.1.2 Biocontrol . . . . .	99
5.1.3 Biorremediación . . . . .	99



5.2 Control de plagas . . . . .	101
5.2.1 Insectos . . . . .	102
5.2.2 Hongos, bacterias y virus . . . . .	117
5.2.3 Nematodos . . . . .	134
5.2.4 Malas hierbas . . . . .	136

**Capítulo 6**  
**Cultivos transgénicos: optimización biotecnológica de los tiempos de producción y conservación de los productos vegetales** **141**

---

6.1 Control de la tasa de crecimiento . . . . .	142
6.2 Control de la floración . . . . .	142
6.3 Control de la maduración de frutos . . . . .	144
6.4 Conservación del material vegetal . . . . .	146

**Capítulo 7**  
**Principales cultivos transgénicos** **147**

---

**Capítulo 8**  
**Plantas transgénicas y sociedad** **153**

---

8.1 Las demandas de los consumidores en relación con los organismos vegetales modificados genéticamente . . . . .	154
8.2 Herramientas actuales de control concernientes a la utilización de organismos vegetales modificados genéticamente y de los productos derivados de ellos . . . . .	155
8.3 Consideraciones previas para una adecuada discusión del problema de la utilización de organismos vegetales modificados genéticamente . . . . .	156
8.4 Consideraciones científicas sobre los organismos vegetales modificados genéticamente . . . . .	156
8.5 Alimentos transgénicos y cadena alimentaria . . . . .	158
8.6 Efectos medioambientales de la liberación de organismos vegetales modificados genéticamente . . . . .	162
8.6.1 Consideraciones preliminares . . . . .	162
8.6.2 La posibilidad de transferencia genética . . . . .	163
8.6.3 Alteraciones de balances ecológicos . . . . .	164
8.6.4 Biodiversidad e ingeniería genética . . . . .	164
8.7 Aspectos éticos . . . . .	166
8.7.1 Consideraciones iniciales . . . . .	166
8.7.2 Agricultura transgénica y subdesarrollo . . . . .	167
8.7.3 Transferencia de tecnología a países en vías de desarrollo . . . . .	170

<b>Bibliografía</b>	<b>173</b>
<b>Bibliografía complementaria</b>	<b>179</b>
<b>Índice alfabético</b>	<b>191</b>

# Prólogo

El descubrimiento del ADN como material hereditario en 1944 supuso un hito fundamental en la historia de la Genética que permite dividirla en un “antes del ADN” y un “después del ADN” dado el cambio de paradigma que el ADN ha supuesto, no solamente para la propia ciencia genética sino, también, para la Biología en general e, incluso, para la Sociedad. El paso de los abstractos factores hereditarios mendelianos a los genes tangibles —los genes son un fragmento más o menos largo de ADN y, por tanto, manipulables— dio lugar a la denominada Manipulación Genética nacida a partir de la década de los setenta del siglo pasado y basada en la Ingeniería Genética Molecular. Por sus aplicaciones e implicaciones en la Sociedad, se puede decir que estamos viviendo hoy en día la “Revolución del ADN” lo mismo que antaño se vivió la “Revolución de la Agricultura” o la “Revolución Tecnológica”. Incluso yo me atrevo a decir que esta Revolución del ADN se manifiesta en cómo se está desarrollando en la sociedad mundial una “Biocracia”, lo mismo que en tiempos anteriores se desarrolló la Tecnocracia.

Nos guste o no, la sociedad mundial actual se mueve dentro de un sistema económico cuyo motor es el capital y, en ese entorno, no hay duda de que la Biotecnología es una gran fuente de riqueza. Por supuesto que no todo en Bio-

tecnología tiene que ver con la Genética y el ADN, pero en gran parte sí. Esta es la razón por la que se puede hablar de la Biocracia dentro de la Revolución del ADN.

La Biotecnología incluye cualquier técnica que utilice organismos vivos o algunas de sus partes para fabricar o modificar productos, para mejorar plantas o animales o para desarrollar microorganismos para usos específicos. Como señalaba el Prof. Rodríguez Villanueva en su discurso de ingreso en la Real Academia Nacional de Farmacia (1986), la Biotecnología posee la capacidad de cambiar a la comunidad industrial del siglo XXI debido a su potencial para producir cantidades prácticamente ilimitadas de sustancias de las que nunca se había dispuesto antes, de productos que se obtienen normalmente en cantidades pequeñas, de productos con coste de producción mucho menor que el de los fabricados por medios convencionales, de productos que ofrecen mayor seguridad que los hasta ahora disponibles y de productos obtenidos a partir de nuevas materias primas más abundantes y baratas que las utilizadas anteriormente.

Como vemos, la definición de Biotecnología incluye la Mejora Genética de Plantas. Los métodos que pudiéramos llamar convencionales de la Mejora han sido los cruzamientos y la selección complementados en ocasiones con técnicas citogenéticas y de mutagénesis artificial. Sin embargo, mediada la década de los ochenta se inició la aplicación de la Ingeniería Genética Molecular en la Mejora de Plantas mediante la utilización de plantas transgénicas; es decir, la manipulación genética de las plantas en beneficio del hombre es parte de la Biotecnología. De todas estas cosas trata este libro que el lector tiene ante sí y cuyo autor me pidió amablemente que prologara, por lo que le estoy muy agradecido.

El autor, Antonio Benítez Burraco, es licenciado en Ciencias Biológicas por la Universidad de Sevilla (1995), obteniendo el doctorado en Bioquímica y Biología Molecular por la Universidad de Córdoba (2000) tras su investigación en la clonación y caracterización molecular de algunos genes que intervienen en los procesos de maduración de la fresa. Esta formación científica de su etapa doctoral, junto con su especialización postdoctoral en Bioquímica Vegetal, le ha permitido introducirse en el mundo de la biotecnología vegetal y la ingeniería genética de plantas que es el objeto de la presente obra.

Además de los conocimientos científicos, para escribir un libro hay que tener una madurez intelectual adecuada. Hay muchas formas de evaluar la madurez intelectual de una persona, pero en el caso de nuestro autor puede resultar muy significativo el hecho de que, además de los títulos reseñados, es licenciado en Filología Eslava por la Universidad de Granada y Diplomado en Lengua Rusa por la Universidad de Sevilla y, según sus propias palabras, “disfruta traduciendo poesía”. No cabe duda que a cualquiera llamaría la atención esta doble formación científica y humanística.

Razonaba antes la importancia de la Biotecnología y dentro de ella de la Mejora Genética Vegetal que ha sabido incorporar en su metodología a la Ingenie-

ría Genética Molecular. El contenido de la obra, que es muy amplio, parte de la reflexión sobre el papel de los productos vegetales en la dieta humana y tras una referencia a la Mejora Genética de Plantas convencional se introduce en la Biotecnología Vegetal y en el estudio de los cultivos transgénicos desde el punto de vista de la mejora de producción y de calidad, abordando también las posibles implicaciones medioambientales para terminar con un último capítulo en el que trata las relaciones entre las plantas transgénicas y la sociedad.

La madurez intelectual del autor a la que me refería antes se pone de manifiesto en su fácil escritura, haciendo asequible su contenido a un amplio espectro de lectores interesados en estos temas ya sea desde el campo de la Biología como de la Agronomía. El autor ha utilizado como fuentes bibliográficas un buen número de revisiones científicas cuya enumeración resulta de mucha utilidad para los lectores que quieran profundizar en determinados aspectos particulares.

Madrid, septiembre de 2004

**Juan-Ramón Lacadena**  
*Catedrático de Genética*  
*Facultad de Biología*  
*Universidad Complutense*



# Introducción

Hace unos doce mil años comenzaron a aparecer en el Próximo Oriente las primeras comunidades sedentarias capaces de procurarse gran parte de su alimento mediante el cultivo de diversas especies de gramíneas silvestres. Seguramente la transición desde las sociedades de cazadores-recolectores que ocupaban previamente esa zona hasta otras de tipo agrario no fue un proceso abrupto, sino que debió ir precedido de una etapa, más o menos dilatada (quizás de alrededor de dos mil años), de mero asentamiento junto a las zonas de crecimiento de las variedades silvestres de cereales, con objeto de explotar más eficazmente su período natural de fructificación, estrechamente limitado desde el punto de vista temporal. En el nacimiento de la agricultura el hito fundamental no consistió tanto en el notable descubrimiento de que las semillas silvestres podían almacenarse y sembrarse a voluntad con objeto de obtener más semillas de forma más cómoda y predecible, sin tener que desplazarse constantemente en busca de las áreas de crecimiento natural de cada especie, sino, fundamentalmente, en la crucial decisión de que resultaba más provechoso no comer las mejores semillas para utilizarlas en la siembra, porque año tras años se obtenían mejores rendimientos, semillas más nutritivas y plantas de las que era posible recolectar el fruto con mayor comodidad (las semillas de las gramíneas silvestres se desprenden con gran facilidad).

Este ciclo indefinido de cultivo y selección permitió, con el tiempo, la generación de excedentes alimentarios estacionalmente estables y de mayor calidad, lo que terminó dando lugar a cambios muy profundos en la estructura de las sociedades humanas: de las reducidas bandas igualitarias de los cazadores-recolectores se pasó a las sociedades de cabecillas y de ahí a las jefaturas, hasta terminar constituyéndose los grandes estados agrarios, cuya estructura social ha perdurado, de una u otra manera, prácticamente hasta nuestros días, constituyendo la base de nuestra propia sociedad. Es imposible minusvalorar la importancia que en la historia del ser humano y en la evolución cultural de nuestra especie ha tenido esta denominada “revolución neolítica”, que se repetiría en distintos lugares y diferentes épocas, al surgir también, seguramente de forma independiente, en territorios tan alejados entre sí como Mesoamérica, Nueva Guinea o Asia Oriental.

Para el hombre moderno, cuya existencia transcurre rodeada de infinitud de objetos manufacturados de plástico o metal, y que vive inmerso en una sociedad donde la fuente de empleo y de riqueza se encuentra vinculada fundamentalmente al sector de los servicios, el ciclo vital de las plantas no gravita sobre sí de la misma manera, ni los productos vegetales están presentes en su vida con la misma inmediatez, que en el caso de sus antepasados, quienes, en su inmensa mayoría, se afanaban sin descanso durante toda su vida en los campos de cultivo, escudriñaban constantemente con aprensión los cielos, conjurando la llegada del granizo o anhelando la lluvia que acabase con un período de sequía, y cuya dieta apenas variaba, estando compuesta día tras día por los mismos alimentos de origen vegetal. En la mayoría de los casos, para un individuo de nuestras sociedades altamente tecnificadas el contacto directo con las plantas y sus productos suele quedar reducido a las frutas y hortalizas que ocasionalmente encuentra en su mesa (especialmente tras una visita a su médico o dietista), a los objetos de madera que utiliza en su casa o a las flores o pequeñas plantas de interior con que adorna su hogar. Y, sin embargo, este divorcio entre lo que consumimos y la manera en que lo obtenemos es tan sólo aparente. Por un lado, porque la gran mayoría de los seres humanos habita en regiones subdesarrolladas, por lo que siguen estando estrechamente vinculados a los ciclos de producción agrícola. Por otro lado, porque, en lo concerniente al mundo desarrollado, los productos vegetales y sus derivados siguen siendo una parte fundamental de nuestra dieta (aunque actualmente suelen entrar en nuestras vidas subrepticamente en forma de todo tipo de productos elaborados), integrándose en nuestros ciclos económicos como materia prima destinada a la industria no alimentaria (textil, manufacturera, farmacéutica, etc.). Los ingentes esfuerzos dedicados a la mejora biotecnológica de los cultivos de interés agrícola únicamente se entienden en su verdadera dimensión cuando se tiene presente el significativo peso específico que siguen teniendo en nuestras vidas; en este sentido, el primer capítulo del libro constituye una suerte de sumario acerca de este hecho, pues allí se expone de forma muy breve la importancia más inmediata



que para el ser humano tienen los productos agrícolas, que no es otra que la de ser comidos como parte de su dieta y proporcionarle nutrientes esenciales. A pesar de nuestra apetencia cultural por la carne, que es universal, lo cierto es que gran parte de los habitantes del planeta sobreviven todavía hoy gracias a dietas casi exclusivamente vegetarianas.

De todo lo apuntado anteriormente parece derivarse que la mejora cuantitativa y cualitativa de la producción vegetal sigue siendo, por múltiples razones, una fuerza económica fundamental dentro de la organización productiva de las sociedades humanas (aun de la nuestra), por lo que no resulta extraño que se siga investigando más que nunca en este ámbito (¡y no sólo en ordenadores de última generación o pantallas de plasma!) y que surjan constantemente innovaciones tecnológicas que se aplican recurrentemente a la agricultura. Ahora bien, lo cierto es que hasta la emergencia de las modernas técnicas de ingeniería genética la mejora de la productividad agrícola había seguido en esencia los mismos derroteros ya ensayados con éxito por nuestros antepasados agricultores. El análisis fisicoquímico de los suelos, la determinación fisiológica de las necesidades nutricionales de la planta, el desarrollo de fertilizantes y abonos químicos, la adecuada monitorización y regulación de las variables físicas (temperatura, irradiación, humedad) del cultivo del entorno, la lucha contra las plagas mediante la síntesis de plaguicidas químicos... todas estas estrategias de cultivo tan recientes constituyen, en la práctica, una continuación, desde luego mucho más sofisticada, precisa y fundamentada desde el punto de vista científico, de, por ejemplo, las recetas de abonado o las seculares recomendaciones para la rotación de cultivos. Lo que ha logrado el tratamiento científico del problema de la optimización del cultivo vegetal ha sido sustancialmente el anhelado incremento exponencial de su rendimiento y de la calidad de los productos obtenidos. La denominada “revolución verde”, llevada a cabo en los años sesenta, constituye el paradigma de la potencialidad inherente a este tipo de planteamientos, al haber conseguido multiplicar en amplias zonas del planeta la productividad agrícola mediante una estrategia combinada de fertilización racional de los suelos y control químico de la incidencia de las plagas. Algo semejante ha sucedido en lo concerniente a la mejora vegetal, que es el objeto de este libro, cuyo objetivo fundamental ha sido siempre el de lograr un incremento cualitativo y cuantitativo de la productividad mediante la modificación y la selección de los mejores cultivares, algo que, de forma harto intuitiva, ya llevaba a cabo el agricultor neolítico. En el segundo capítulo del libro se exponen de forma simplificada las principales técnicas empleadas convencionalmente en la actualidad para la mejora “clásica” (esto es, la que no hace uso de las técnicas de ADN recombinante para la obtención de nuevas líneas) de los principales cultivos de interés para el hombre. Una adecuada comprensión del alcance (y de las limitaciones) de estas técnicas es fundamental para entender la magnitud del salto que ha supuesto la transición desde una mejora “clásica” hasta una mejora “biotecnológica”, basa-

da en la ingeniería genética, que es precisamente de lo que se ocupa la parte central del libro.

Pero, ¿cuáles son las fuerzas que impulsan realmente este incesante esfuerzo de mejora? Lo cierto es que las necesidades humanas básicas en lo concerniente a la agricultura no han variado sustancialmente con los siglos y pueden resumirse sencillamente en “más y mejor”. Sin embargo, también sucede que cuanto más compleja es una sociedad, más compleja se vuelve también su demanda de productos (manufacturados o no). La mejora vegetal no ha escapado tampoco a esta tendencia generalizada. Mientras que nuestros antepasados agricultores vivían con la esperanza de incrementar año tras año la producción de (pongamos por ejemplo) semillas oleaginosas por cada hectárea de cultivo, confiando también en obtener el mismo aceite en cuanto a sus propiedades organolépticas (que, por cierto, difícilmente sabrían definir, aunque sí apreciar) que habían disfrutado en su niñez, nosotros, sus descendientes, no sólo buscamos en las tiendas en las que nos abastecemos ese mismo aceite (lino, oliva, girasol o colza), debidamente procesado y conservado, sino que además deseamos que contenga una determinada proporción de ácidos grasos insaturados, que esté enriquecido en determinadas vitaminas o que contenga algún componente adicional cardiosaludable, que nuestro médico considera imprescindible para mantener nuestras arterias en perfecto estado. O qué decir, por poner otro ejemplo, del proyecto (antes utópico, pero cada vez más factible) de lograr la vacunación frente a determinadas enfermedades, en vastas áreas del planeta donde la profilaxis y/o la disponibilidad de material médico y/o vacunas convencionales dejan a merced de las epidemias a numerosos seres humanos, recurriendo a frutos que sinteticen por sí solos la vacuna que confiere inmunidad frente a esas enfermedades. La lista de ejemplos podría hacerse interminable, pero lo que resulta evidente es que las soluciones que parecen demandar muchas de estas necesidades escapan a todas luces a las capacidades de los programas de mejora convencional. Y, sin embargo, muchas de ellas son necesidades que, en principio, parecen legítimas, por lo que resulta necesario y beneficioso darles respuesta. Es precisamente la ingeniería genética (cuyas técnicas de manipulación se han desarrollado en los últimos años como resultado de numerosos programas de investigación básica y aplicada en muy diversos campos de la Biología) la que ha permitido dar ese salto cualitativo (que parecía separar también la realidad de lo utópico o de lo meramente quimérico) en nuestra capacidad de incrementar el abanico de productos obtenibles a partir de las especies vegetales de interés agronómico. La clave ha sido, en líneas generales, la ruptura definitiva de las barreras interespecíficas que impiden la transferencia de genes entre las diversas especies de organismos vivos. Esta permeabilidad ha hecho posible resolver los problemas de productividad de las especies vegetales cultivadas recurriendo a las soluciones desarrolladas por otras especies a lo largo de su evolución en otros contextos diferentes, o, incluso, gracias al diseño en el laboratorio de soluciones *ad hoc* obtenidas mediante la creación de nuevas varian-

tes génicas generadas *in vitro* y que no se encuentran en la Naturaleza. Es en el tercer capítulo del libro donde se trata precisamente de presentar un panorama lo más completo posible del fundamento último de las principales técnicas de ingeniería genética empleadas actualmente para la mejora vegetal, y responsables de las sorprendentes soluciones desarrolladas en este campo en los últimos años, que se encuentran ya, a todas luces, fuera del horizonte de expectativas de la agronomía convencional. El resultado de este esfuerzo, en forma de resumen de los éxitos conseguidos hasta el momento (el lector sabrá disculpar este momentáneo acceso de autocomplacencia, que quedará atenuado sensiblemente en el capítulo octavo) constituye el objetivo del cuarto capítulo del libro, el más extenso de la obra.

Si se contemplan con una perspectiva adecuada, podría parecer que todos estos logros, al menos tal y como se han expuesto en este libro, siguen algún plan preconcebido, en el que se va incrementando de forma recurrente tanto la dificultad de los retos planteados como la ingeniosidad y la complejidad de las soluciones que los resuelven. Sin embargo, se trata tan sólo de un desarrollo histórico en consonancia con la evolución de nuestras necesidades, tal como se ha sugerido anteriormente. En primer lugar, nos hemos preocupado de optimizar lo que debíamos tomar directamente del suelo para comer, de ahí nuestro interés por la mejora cuantitativa y cualitativa de los cultivos, que eran ya objetivos obvios heredados de los programas de mejora de nuestros antepasados (recuérdese el lema de “más y mejor”); esto es lo que se describe en los dos primeros apartados de este cuarto capítulo. A continuación, desde un punto de vista histórico, hemos procesado (industrialmente) los productos vegetales, para obtener compuestos derivados que satisfacían otras demandas: el pan, la cerveza, los tejidos vegetales, etc. responden a necesidades diferentes a la de (simplemente) tomar frutos y comerlos tal como se obtienen directamente de la planta. De ahí que un segundo objetivo lógico desde el punto de vista económico haya sido la optimización biotecnológica del procesamiento de los productos vegetales, como se recoge en el tercer apartado de este capítulo: pan, sí, pero obtenido a partir de nuevas harinas que mejoran sus cualidades organolépticas; cerveza, también, pero procesada a partir de cebada modificada genéticamente para optimizar su fermentación y eliminar metabolitos indeseables; fibras vegetales, por supuesto, pero mejorando sus propiedades térmicas mediante la expresión de genes que permiten la síntesis de polímeros bacterianos... Y, finalmente, hemos dado el último paso lógico, a saber, el de emplear las plantas como fábricas, para obtener productos diferentes de los que generan de forma natural: fábricas versátiles, baratas, limpias, completamente reciclables, nada contaminantes... ¡y comestibles! De todo esto se habla en el último apartado del cuarto capítulo del libro.

Ha llegado, sin embargo, el momento de evitar que el éxito (presente y previsible para el futuro más inmediato) se nos suba a la cabeza. Aunque nuestra historia como especie pudiera inducir a sostener lo contrario, lo cierto es que

no deberíamos analizar, como a menudo tiende a hacerse, el éxito evolutivo del ser humano en términos de conquista o domesticación de un medio hostil con objeto de garantizar su supervivencia. Parecería más apropiado hablar tan sólo de negociación: a cambio de la significativa ventaja evolutiva que supone nuestro complejo cerebro, que nos permite planificar acciones y diseñar estrategias capaces de transformar el medio para adecuarlo a nuestras necesidades, produciendo cambios en un entorno desfavorable sin esperar a que nuestro organismo deba adaptarse lentamente al mismo en respuesta a la presión de la selección natural, la especie humana ha tenido que aceptar el gravamen creciente que implica la satisfacción de un componente biopsicosocial que la impulsa (hasta el momento de forma irrefrenable) a demandar y consumir (¡y despilfarrar!) una cantidad creciente de recursos materiales y energéticos. En otras palabras, a lo largo de la historia se han ido acumulando los efectos desfavorables que la actividad antropogénica lleva ineludiblemente aparejada, comprometiendo cada vez más las condiciones medioambientales en que debemos desenvolvemos. Así, en el ámbito agrícola, la introducción de los fertilizantes químicos permitió inicialmente incrementar la productividad vegetal hasta extremos insospechados, pero estos mismos productos han terminado contaminando fatalmente los acuíferos en numerosas áreas del planeta; el abandono de las variedades de cultivos tradicionales en favor de líneas mejoradas, creadas mediante selección en los laboratorios, sirvió para obtener en un principio mejores rendimientos, pero las nuevas variedades acabaron siendo más susceptibles a determinadas plagas, que afectaban a extensiones cultivadas proporcionalmente más vastas, lo que dio lugar a graves problemas de abastecimiento en muchas zonas; la utilización de pesticidas permitió reducir en un principio la incidencia de estas plagas, pero originó asimismo la aparición de patógenos resistentes (y superresistentes) y la introducción de compuestos tóxicos en cadenas tróficas que parecían independientes de los agrobiosistemas, los cuales terminaron afectando fatalmente a otras especies animales y vegetales... Este peculiar balance de beneficios y de perjuicios, de ganancias y de pérdidas debería tenerse siempre presente. Por otro lado, no es nada nuevo en nuestra historia, ya que la propia aparición de la agricultura se produjo en un contexto de fuerte erosión de los ecosistemas cuaternarios, surgidos tras la última glaciación, por parte de una población humana en constante crecimiento, lo que dio lugar (junto con otros factores) a la extinción masiva de numerosas especies animales, que hasta ese momento habían servido de alimento a las bandas de cazadores-recolectores. De hecho, durante bastante tiempo las condiciones nutricionales de los primeros agricultores empeoraron sensiblemente, si se comparan con las que disfrutaron sus predecesores que todavía llevaban una vida nómada...

Por todas estas razones, en el capítulo quinto del libro se discute cómo desde el propio campo de la biotecnología vegetal se vienen diseñando estrategias destinadas a minimizar el efecto medioambiental que entrañan las prácticas agrícolas convencionales (y aun las biotecnológicas). Necesariamente estas es-

trategias distan mucho de ser una panacea y su efectividad resultará insuficiente si no se combinan con unas prácticas agrícolas más racionales que traten de disminuir al máximo el efecto perturbador de la actividad humana sobre el ecosistema. Además, tampoco puede afirmarse de forma fehaciente que el impacto de los propios productos de la biotecnología sobre los ecosistemas naturales sea nulo, pero, en principio, las evidencias acumuladas hasta el momento parecen sugerir que los riesgos derivados de la liberación de organismos modificados genéticamente en el medioambiente resultan ser menos onerosos que los que entraña, por ejemplo, la utilización generalizada (y, en demasiadas ocasiones, incontrolada) de pesticidas o fertilizantes en todas las zonas agrícolas del planeta. Una vez más, como en todo en lo que concierne a la actividad humana, es preciso sopesar ventajas y beneficios, es necesario negociar, entendiendo una vez más que también nuestro futuro está en juego en esta negociación.

El cuerpo principal del libro concluye con dos breves capítulos. Cuando el lector llegue a este punto, seguramente habrá advertido que, a lo largo de todas las páginas que ha dejado atrás, se ha venido discutiendo la aplicación de la biotecnología a la consecución de una mayor cantidad de productos vegetales, de mayor calidad, con una composición diferente y en las condiciones medioambientales más respetuosas posibles. Pero, quizás también se haya percatado de que no se ha dicho gran cosa sobre el factor temporal, a saber, sobre la servidumbre a la que el agricultor moderno sigue estando sometido por parte de la naturaleza y del *tempo* de los ciclos vitales de las especies vegetales que cultiva. Aunque es éste un campo de investigación que apenas si ha comenzado a ofrecer sus primeros frutos, el sexto capítulo de la obra se dedica a tratar de explicar las estrategias que se están siguiendo para poder manipular los ciclos biológicos de los cultivos, de manera que los máximos de producción y/o los períodos de maduración puedan ajustarse, entre otras cosas, a las demandas de los consumidores. Finalmente, el capítulo séptimo presenta una visión somera de la importancia (creciente), en términos cuantitativos, de la agricultura transgénica en la economía mundial, lo que también puede servir colateralmente para poner de manifiesto hacia dónde se dirigen los intereses de las empresas que se ocupan de la aplicación práctica (y rentable) al campo de la agricultura de las herramientas y de los conocimientos generados por la investigación en biología molecular (¡debemos reflexionar sobre ello!). Aunque los datos recogen la evolución de este tipo de cultivos hasta el año 2003, la tendencia que ilustran no ha hecho sino acentuarse desde entonces.

En ningún caso este libro quisiera terminar pareciendo una vindicación acrítica de la aplicación de la tecnología del ADN recombinante a la agricultura. El autor comparte la idea, nada novedosa por lo demás y ya apuntada anteriormente, de que cualquier innovación tecnológica desarrollada por la especie humana, destinada optimizar su capacidad de adaptación (cultural) al entorno y a mejorar las condiciones materiales de su existencia, se cobra, antes o después, el impuesto que toda negociación evolutiva demanda. Al margen de considera-

ciones más abstractas, la utilización de cualquier nueva tecnología debería plantear, cuando menos, una discusión acerca de sus costes reales inmediatos y de sus beneficios potenciales. Y esto es lo que se intenta esbozar en el capítulo octavo del libro. En este sentido, tras haber tratado ampliamente en los capítulos anteriores los beneficios de la biotecnología vegetal, se ha intentado en este último capítulo sopesar de forma ecuánime los posibles riesgos que la utilización de cultivos modificados genéticamente puede tener para el ser humano, pero intentando a la vez despejar también algunos malentendidos y no pocos prejuicios, sostenidos de forma acientífica y bastante generalizada, acerca de los mismos. Surge, por último, una crucial cuestión ética que no debería obviarse, por más que pueda quedar desdibujada (con demasiada facilidad) dentro de la (aparentemente inalterable y dudosamente aceptable) organización económica de nuestras sociedades: de nada sirve producir “más y mejor” si los beneficios terminan siendo disfrutados por unos pocos. De aquí debería nacer el imperativo de conocer y resolver mediante estas nuevas técnicas las necesidades reales de la gran mayoría de la población del planeta y no sólo las de los habitantes de los países desarrollados dentro de los cuales han surgido dichas técnicas. Así, muchas personas presentan carencias importantes de vitaminas en su dieta, mientras que otras (¡mucho menos numerosas!) desean nuevos colores para las flores que decoran sus hogares; a ambas necesidades ha sabido responder la biotecnología vegetal y el “arroz dorado” y los claveles transgénicos son las dos respuestas, ambas exitosas, que ha ofrecido a la sociedad. Pero... ¿cuál es la prioritaria? Esa es la pregunta a la que deberíamos responder antes de seguir trabajando en nuestros laboratorios.

De todo lo expuesto en este libro parece concluirse que hay un futuro muy prometedor para la biotecnología vegetal, por más que resulte complicado predecir con exactitud hacia dónde se encamina, cuál será su alcance y cuáles sus logros dentro de algunos años. En cambio, hay también un presente de injusticia, de hambre y de enfermedad que no es necesario adivinar, porque es ya una presencia real en las vidas de la mayoría de los seres humanos y cuya evolución resulta, lamentablemente, mucho más fácil de predecir si no se toman las medidas oportunas. Ambos caminos deberían ligarse, y las decisiones apropiadas deberían conducir a una interrelación mucho más íntima y fructífera entre ambos, de manera que el futuro de la primera termine siendo la solución de los problemas del segundo. Y una manera de conseguirlo puede ser, seguramente, la transmisión de información: difundir conocimientos, proporcionar herramientas, explicar principios. ¡Qué mejor vehículo para ello que un libro! Con las limitaciones inherentes a las capacidades del autor, esta es la contribución última a la que aspira quien escribe estas líneas.

# Agradecimientos

El que finalmente este libro vea la luz se debe a la ayuda inestimable de diversas personas e instituciones, a las que mediante estas palabras de reconocimiento el autor quisiera agradecerles la confianza que han mostrado en este proyecto editorial. En primer lugar, a la Compañía Española de Petróleos, S. A. (CEPSA), que, a través de quienes forman parte del equipo de la Refinería Gibraltar, en San Roque (Cádiz), comenzando por el propio Director, D. Juan Pérez de Haro, ha cofinanciado la edición del libro, confirmando una vez más su inestimable empeño en el sostenimiento y la promoción de la investigación en España. En segundo lugar, a todo el equipo de la Editorial Reverté, especialmente a Javier Reverté, que desde el principio se sintió interesado por esta propuesta y apostó por ella, y también a Inma Reverté y a Julio Bueno, que se encargaron de la maquetación y de la edición del manuscrito: sus consejos y sugerencias han mejorado sensiblemente el documento original. En tercer lugar, a Antonio Benítez Gallardo, que estuvo interesado en todo momento por las vicisitudes del proyecto y que se encargó de gestionar el acuerdo entre la Editorial Reverté y CEPSA: su apoyo y su cariño como padre constituyen el mayor de los privilegios y de las suertes. Y, finalmente, el autor quisiera agradecerle muy especialmente al Prof. Dr. Juan Ramón Lacadena su deferencia y su amabilidad hacia su per-