

UNO DE LOS NUESTROS

Norman E. Borlaug (1914-2009) y la Revolución Verde

Marcelino Pérez de la Vega

Jonathan Swift escribió en sus Viajes de Gulliver la siguiente frase: “*Quien sea capaz de producir dos mazorcas de maíz en una parcela donde hasta entonces se producía sólo una, o de realizar dos siegas de hierba donde antes se segaba sólo una vez, merecería más el reconocimiento de la humanidad y lograría realizar un servicio más esencial para su país, que toda la clase política junta*”.¹ De acuerdo con esta frase tan cierta, Norman Borlaug, recientemente fallecido, es una de las personas a las que la humanidad debe estar más agradecida.

“*Más que cualquier otra persona en esta era, él ha ayudado a dar pan al mundo hambriento. Hemos hecho esta elección con la esperanza de que dar pan también dará paz al mundo*” (Palabras del Comité Nobel en la presentación de Norman Borlaug como Premio Nobel de la Paz de 1970).

Biografía

Norman Ernest Borlaug (**Fig. 1**²) nació el 25 de marzo de 1914 en una



granja cerca de Cresco, Iowa. Estudió Ciencias Forestales en la Universidad de Minnesota y tras terminar sus estudios en 1937 trabajó para el Servicio Forestal de los EE. UU. Regresó a la Universidad de Minnesota en 1939 para hacer un Máster en Patología vegetal y el doctorado, que consiguió en 1942. Desde entonces hasta 1944 trabajó como microbiólogo en la Fundación du Pont de Nemours investigando en bactericidas y fungicidas de uso agrícola e industrial.

Figura 1. El Dr. Norman Ernest Bourlaug.

En 1943 había comenzado el Programa de Cooperación entre el Gobierno Mexicano y la Fundación Rockefeller que incluía programas de investigación para mejorar la tecnología productiva de maíz, trigo, alubias y patata (Oficina de Estudios Especiales –OEE-). El programa, además de invertir un gran esfuerzo

¹ “*Whoever could make two ears of corn, or two blades of grass, to grow upon a spot of ground where only one grew before, would deserve better of mankind, and do more essential service to his country, than the whole race of politicians put together*” (El Rey de Brobdingnag en “Los Viajes de Gulliver”).

² Las ilustraciones –a no ser que se indique lo contrario- están tomadas de <http://www.normanborlaug.org>.

en la formación de científicos mexicanos para crear un sistema nacional de agricultura, implicaba la investigación en genética, mejora, patología vegetal, entomología, edafología, agronomía y tecnología de cereales. En 1944 Borlaug aceptó el encargo, como genético y patólogo vegetal, de organizar y dirigir el programa cooperativo sobre trigo dentro de este proyecto de cooperación. En los siguientes 20 años alcanzó un enorme éxito al conseguir variedades de trigo muy productivas, semienanas y resistentes a enfermedades. Con los rendimientos producidos por las nuevas variedades, para finales de la década de 1950, México era autosuficiente en la producción de trigo.

Después de dos décadas de trabajo conjunto muy fructífero, la OEE se cerró. Más o menos al mismo tiempo, el gobierno mexicano estableció el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). Muchos de los técnicos y científicos internacionales de la Fundación/OEE permanecieron en México como asesores del INIA. Unos años más tarde, el Presidente Adolfo López Mateos propuso la fundación en México de una institución de investigación agrícola en colaboración con la Fundación Rockefeller y, en 1966, se creó el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), un organismo sin fines de lucro y con proyección internacional, con sede en México. Muchos de los técnicos e investigadores que trabajaron en la OEE, incluyendo a Norman Borlaug, se unieron al CIMMYT. El Dr. Borlaug trabajó ininterrumpidamente en el CIMMYT desde entonces. En 1979 dejó de trabajar a tiempo completo en él, aunque siguió siendo consultor residente a tiempo parcial hasta su muerte. En 1984, su carrera profesional tomó un nuevo giro cuando asumió el cargo de profesor en la Universidad Texas A&M, puesto que desempeñó durante 23 años. En 1986 estableció un programa de apoyo a la agricultura en África, junto con el ex presidente de los Estados Unidos Jimmy Carter, y la Fundación Nipona, del Japón, dirigida por Ryoichi Sasakawa (**Fig. 2**). En 20 años, este programa, denominado Sasakawa-Global 2000, ha colaborado con 15 países africanos con el propósito de transferir tecnologías agrícolas mejoradas a millones de pequeños productores de ese continente.



Figura 2. El Dr. Norman Ernest Borlaug -en la foto rodeado de niños africanos-, fue uno de los impulsores del programa de apoyo a la agricultura en África, denominado Sasakawa-Global 2000.

El Dr. Borlaug contribuyó a la creación del Premio Mundial a la Alimentación (World Food Prize) en 1986, que reconoce las aportaciones de personas a la producción mundial de alimentos. Ha sido nombrado miembro honorario de las academias de ciencias agrícolas de 11 naciones, ha recibido 60 doctorados *honoris causa*, y recibió honores por parte de asociaciones cívicas y de productores de 28 países. Llegó a considerar a México como su propio hogar y recibió las más altas distinciones de este país: Medalla Presidencial a la Libertad, la Medalla Nacional a la Ciencia, y la Medalla de Oro del Congreso.

Murió el pasado 12 de septiembre.

Labor Científica

El Dr. Norman Borlaug, premio Nobel de la Paz 1970 (**Fig. 3**), es probablemente uno de los científicos más importantes del siglo XX. Conocido como el padre de la “Revolución Verde” su labor como mejorador ha contribuido como la de ningún otro a salvar la vida de millones de seres humanos durante la segunda mitad del pasado siglo.



Figura 3. El Dr. Norman Ernest Borlaug tras recibir el Premio Nobel de la Paz en 1970.

Fue precisamente su investigación para obtener variedades mejoradas de trigo, “que produjesen dos espigas allí donde sólo producían una”, lo que hizo que en los años 70 del siglo XX aumentase la producción de trigo de forma tan espectacular que se resolvieron problemas de escasez de alimentos, e incluso de hambrunas locales, en varios países en vías de desarrollo (en el lenguaje políticamente correcto actual, entonces simplemente países subdesarrollados) como India y Paquistán.

Según el mismo Borlaug (2000) la agricultura basada en la Ciencia es un invento del siglo XX. Hasta el siglo XIX el aumento de producción se había basado más en el aumento de la superficie cultivada que en aumento de los rendimientos. Las pequeñas mejoras en la maquinaria, la utilización de riegos, mejores técnicas de siembra, control de malas hierbas, etc., habían producido incrementos modestos en el rendimiento. De hecho Araus et al. (2007) calcula que, por ejemplo, la producción promedio de cebada y trigo a comienzos del



siglo XX era en las zonas circunmediterráneas de una tonelada por hectárea, más o menos lo mismo que al comienzo de la agricultura en esta zona. A mediados del XIX se producen algunos cambios significativos al establecerse los fundamentos de la química de suelos y la Agronomía por von Leibig y por Boussingault, además de comenzar el uso del nitrato de Chile. A lo largo de este siglo se establecen los primeros centros de mejora de plantas, aunque la mejora científica basada en la Genética no comenzaría hasta el redescubrimiento de las Leyes de Mendel en el 1900. A partir de ese momento la Mejora genética vegetal resulta en la producción de variedades cada vez más productivas.

El convulso siglo XX fue el marco de grandes avances en la agricultura, como en tantos otros campos de la actividad humana. En 1909 Fritz Haber descubrió la forma de sintetizar urea y en 1913 la compañía BASF abrió la primera planta industrial para producirla. Sin embargo la Primera Guerra Mundial (la urea se derivó hacia la producción de explosivos), la depresión del años 30 y la siguiente Segunda Guerra Mundial, impidieron la generalización del uso de los abonos nitrogenados. Sólo después de la Segunda Guerra Mundial se generalizó el uso de abonos nitrogenados contribuyendo a un gran aumento de la producción agraria.

Por aquellos años otro de los resultados claros era el enorme potencial de la Mejora genética en el aumento de los rendimientos. El único país que al filo de la II Guerra Mundial tenía una agricultura moderna eran los EE. UU. En el cinturón del maíz de este país ya se notaba el efecto que los híbridos de maíz tenían sobre la producción. Se alcanzaba un rendimiento medio de 1,8 t por ha (hay que tener en cuenta que la inmensa mayoría de la producción de maíz en los EE. UU. es en seco, sin riego como ocurre en España).

Pero como consecuencia de las guerras, de la pobreza o de ambas causas pocos países en el mundo eran capaces de producir una cantidad suficiente de alimentos como para asegurar la alimentación de sus habitantes de forma regular y estable.

En este momento comienza la labor de Norman Borlaug que le llevaría a ser merecedor del Premio Nobel de la Paz en 1970. Cuando se incorporó al programa de mejora de trigo en México empezó a trabajar en la mejora del trigo con especial énfasis en controlar la enfermedad fúngica de la roya (**Fig. 4**).

Él introdujo un tipo de programa de mejora multipropósito que incluía el desarrollo de variedades compuestas de trigo caracterizadas por ser iguales fenotípicamente pero genotípicamente diferentes en su resistencia a diferentes patógenos.



Figura 4. El Dr. Norman Ernest Borlaug, recogiendo datos en un campo de trigo.

Tomando como base las características semienanas de la variedad japonesa Norin 10, el año 1953 comenzó un programa para obtener variedades de trigo mejoradas semienanas de alto rendimiento que respondiesen bien al riego y a un abonado intenso. Las variedades de trigo tienden a encamarse si crecen mucho (los suelos fértiles y las condiciones de lluvia y viento favorecen el encamado de los cereales cuando las espigas están granadas, con las pérdidas de producción consiguientes). Además las condiciones de crecimiento en alta densidad favorecida por un buen abonado ayudan a la difusión de patógenos. De ahí la enorme utilidad de sus investigaciones combinando la mejora para porte semienano, alto rendimiento y resistencia a enfermedades. Sencillo de describir pero difícil de realizar.

Otro de los aspectos originales de su programa de mejora fue la adopción de un método “lanzadera” de mejora. Los cereales que se cultivan cerca o en las zonas subtropicales no suelen responder a fotoperiodo para completar su desarrollo, por ello decidió que las sucesivas generaciones a partir de la F_2 se cultivasen en dos condiciones diferentes: una cosecha de verano en la alta y fría zona cercana a la ciudad de México seguida de una cosecha de invierno en las cálidas condiciones de Sonora. Este procedimiento conseguía que las variedades mejoradas, además de ser semienanas y resistentes, tuviesen una amplia adaptabilidad. Variedades como Sonora 63, Sonora 64, Lerma Rojo 64 y Mayo 64, con un potencial productivo de 5-6 toneladas por hectárea transformaron la producción de trigo en México en los 60 y posteriormente la de India y Paquistán.

En 1966 la India importó 18.000 toneladas de semillas de trigo, fundamentalmente de Lerma Rojo 64-A, desde México. El resultado fue un salto en la producción desde 12 millones de toneladas en 1965 a 17 millones en 1968. Resultados similares se obtuvieron con el arroz como resultado de la introducción del gen de enanismo de la variedad china Dee-geewoo-gen en las largas variedades *indica* en el IRRI, un centro internacional de mejora del arroz en Filipinas. En 1968 William Gaud acuñó el término de “Revolución Verde” para este fenómeno, que no solamente ha aumentado la producción sino que también ha ahorrado recursos.

Los 80 millones de toneladas de trigo producidos en 2009 por la India en 26 millones de hectáreas habrían requerido 80 millones de hectáreas con los rendimientos de antes de la Revolución Verde (**Fig. 5**).



Figura 5. El Dr. Borlaug, delante de una pila de sacos de trigo, que ilustra el éxito de sus actividades en el autoabastecimiento de alimentos en la India.

A diferencia de lo que ocurrió en el Subcontinente Indio y después en China, África quedó al margen de la Revolución Verde. Desde 1968 Borlaug organizó un programa conocido como Sasakawa-Global 2000 para ayudar a los pequeños agricultores a duplicar o triplicar la producción de maíz, arroz, sorgo, mijo, trigo, mandioca y legumbres. Pero los espectaculares resultados de los ensayos no se tradujeron en avances a niveles nacionales debido a falta de sistemas de riego, comunicaciones, producción de semillas, mercados y a otros condicionantes.

El trabajo fundamental de Borlaug se basó en el uso de las técnicas tradicionales de la Mejora genética vegetal del siglo XX, pero era un gran defensor de la investigación biotecnológica, incluido el uso de las tecnologías basadas en el ADN recombinante. Creía firmemente en explotar nuevas oportunidades para crear nuevas combinaciones genéticas que ayudasen a enfrentarnos a los retos del cambio climático. Él también apoyaba la buena investigación pública y el intercambio de material genético.

Las investigaciones y actividades desarrolladas en el CIMMYT por el Dr. Borlaug no sólo han beneficiado a los países en desarrollo; miles de científicos y

mejoradores de cientos de países se han formado en ese centro, y los materiales obtenidos han estado a disposición de cuantos mejoradores han querido utilizarlos en los diferentes programas de mejora.

En sus últimos años había comenzado un gran programa de mejora en Triticale. El Tricale (\times *Triticosecale* Wittmack) es una especie alopoliploide de creación humana cuya obtención y mejora sistemática comenzó en los años 60 del siglo XX (**Fig. 6**). El Triticale es prometedor en tanto que puede ser superior en producción y calidad nutritiva a sus dos parentales, trigo y centeno.



Figura 6. El Dr. Borlaug, con expertos en agricultura, en un campo de trigo de la India.

Consecuencias de la Revolución Verde

Análisis mediante simulación (Everson y Gollin, 2003) indican que sin los programas internacionales de investigación (en el CIMMYT, el IRRI y otros Centros internacionales) en el año 2000 la producción de grano (para todas las especies) habría sido entre un 2,4 y un 4,8% mayor en los países desarrollados (fundamentalmente debido a que la menor producción en los países en vías de desarrollo habría aumentado los precios, lo que supondría un incentivo a la producción en los países ricos). El rendimiento en los países en vías de desarrollo habría sido entre un 19,5 y un 23,5% menor, a pesar de que los precios altos favorecerían las rentas agrarias. El modelo indica que los precios para el conjunto de los productos agrícolas habría sido entre un 35 y un 66 % más alto en el 2000 de lo que fueron en realidad. Puesto que los precios habían caído un 40% desde 1965 hasta el 2000, los precios se habrían mantenido constantes o habrían aumentado moderadamente sin la investigación internacional.

Los precios más altos habrían contribuido a la expansión de la superficie cultivada en todos los países, con las consiguientes consecuencias medioambientales. Considerando la superficie y los rendimientos en conjunto, la producción habría sido de un 4,4% a un 6,9% mayor en los países desarrollados y de un 13,9% a un 18,6% menor en los países en vías de



desarrollo. Sólo se habría evitado una crisis alimentaria catastrófica si estos últimos países hubiesen tenido los recursos para aumentar sus importaciones de alimentos entre un 27 y un 30% para compensar la disminución de producción.

El modelo indica sin embargo que en ausencia de la investigación internacional se habría experimentado una crisis de bienestar. La ingesta calórica per cápita en el mundo no desarrollado habría sido entre un 13,3 a 14,4 % menor y la proporción de malnutrición infantil habría sido de un 6,1% a un 7,9% mayor. Está claro que la mortalidad infantil habría sido mayor en estos países.

En muchos de los regadíos, sobre todo en Asia, no se hicieron las inversiones adecuadas en sistemas de drenado para evitar que la capa freática subiese demasiado arrastrando sales a la superficie desde capas más profundas. Conocemos las consecuencias: sería salinización de algunos suelos de regadío, sobre todo en las zonas con menos precipitaciones; o encharcamiento en las zonas más húmedas. Los sistemas de irrigación en Asia, que suponen casi dos tercios de la superficie irrigada, están seriamente afectados por ambos problemas. El resultado es que la mayoría de los fondos se gastan en corregir los problemas de sistemas mal diseñados, en lugar de nuevos proyectos de regadío, en los que los sistemas de drenado y tratamiento de efluentes deben ser considerados.

Base genética de la Revolución Verde

Conocemos algo de algunos de los genes implicados directamente en la revolución verde. Concretamente de los genes que permitieron obtener variedades de talla corta capaces de responder adecuadamente a condiciones de alta fertilidad.

El rendimiento mundial del trigo aumentó sustancialmente en los 60 y 70 debido a que los agricultores adoptaron rápidamente las nuevas variedades y los nuevos métodos de cultivo. Las nuevas variedades eran más bajas, tenían mayor rendimiento en la producción de grano a costa de reducir la biomasa destinada a paja, y al mismo tiempo eran más resistentes al encamado causado por la lluvia y el viento después del espigado. Además del gen de semienanismo encontrado en Norin 10 se han encontrado otros en otras variedades, como por ejemplo Tom Thumb. La acumulación de más de un gen de enanismo ha producido variedades aún más cortas, enanas, y esta metodología, inicialmente aplicada en la mejora del trigo y el arroz, se ha extendido a otros cereales como la cebada.

Los trigos son más bajos debido a que responden anormalmente a la hormona de crecimiento giberelina. La baja respuesta a giberelina se debe a uno o dos genes mutantes de enanismo en dos loci distintos (*Reduced height-1*, *Rht-*

B1 y *Rht-D1*, además existe un tercer gen *Rht3* (**Fig. 7**). Estos genes junto con el gen de enanismo *dwarf-8* (*d8*) de maíz son ortólogos del gen *Arabidopsis*

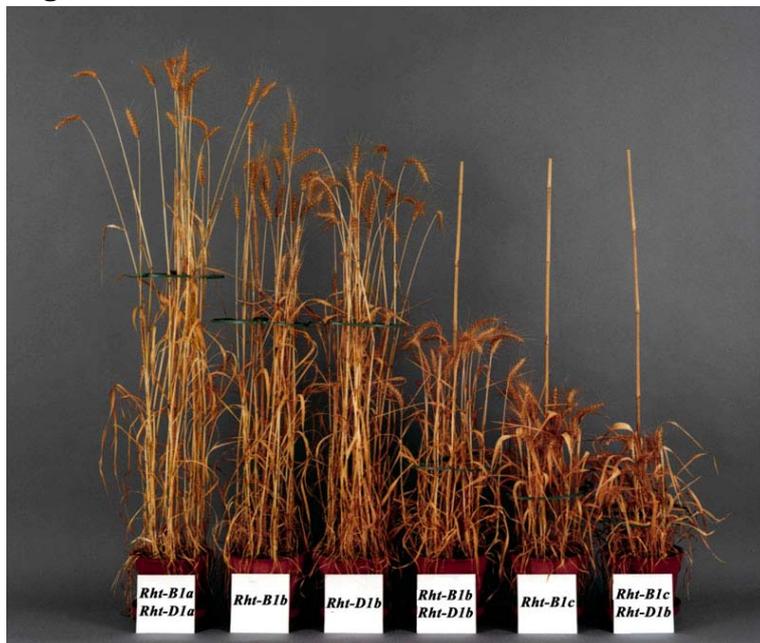


Figura 7. Efectos de distintos alelos *Rht* sobre la altura de plantas de trigo (cv. April Bearded). El tipo silvestre contiene *Rht-B1a* y *Rht-D1a*, que son genes homeólogos (correspondientes) en los genomas de B y D. *Rht-B1c* es un alelo más severo en el locus *Rht-B1*. (Tomado de Taiz y Zeiger, 2006, <http://4e.plantphys.net>)

Gibberellin Insensitive (*GAI*) de *Arabidopsis thaliana*. Estos genes codifican para proteínas que se parecen a factores de transcripción y que contienen un dominio parecido a SH2 (Peng et al., 1999). Sin embargo, el gen responsable del enanismo del arroz IR8, coreponsable de la “Revolución verde”, es un mutante del gen *sd1*, un gen que codifica para una oxidasa que interviene en la síntesis de giberelina (Sasaki et al., 2002). Por tanto en unos casos el enanismo

es consecuencia de un defecto en un gen estructural de la ruta de síntesis de giberelina mientras que en otros se debe a la alteración de un gen regulador implicado en la respuesta a giberelina (**Fig. 8**).

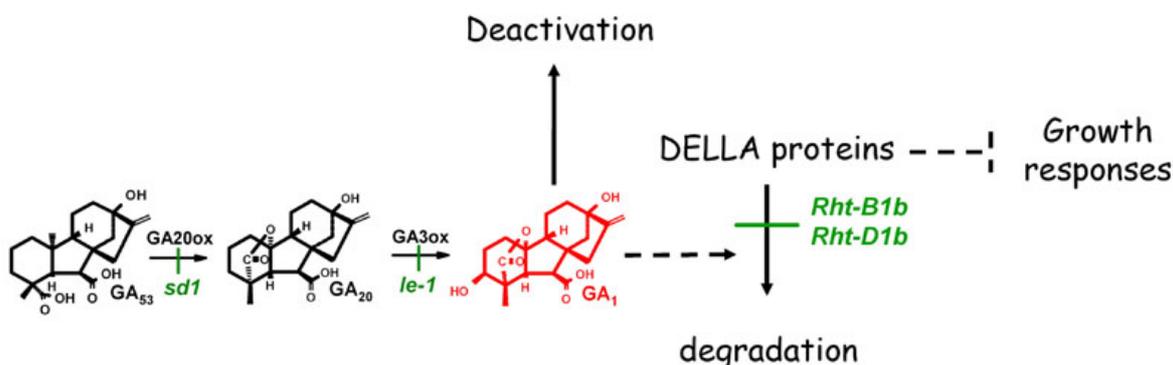


Figura 8. Ruta simplificada de la señalización por giberelinas (GA) en la que se destacan los lugares de mutación de líneas enanas de trigo, arroz y guisante. (Tomado de Taiz y Zeiger, 2006, <http://4e.plantphys.net>).



Problemas futuros

El principal problema sigue siendo alimentar a la humanidad y tratar de hacerlo de forma sostenible. Sobre esto Borlaug (2000) decía: *“La producción vegetal representa el 92% de la alimentación humana, de las que unas 30 especies suministran más de dos tercios de las calorías y proteínas, incluidas ocho especies de cereales, que en conjunto representan el 70% del suministro mundial de alimentos. Los productos animales constituyen sólo el 8% de la dieta mundial, que también dependen de las plantas. Si los alimentos se hubiesen distribuido equitativamente, en 1998 se habrían suministrado una dieta adecuada (2.350 calorías, principalmente de granos) a 6,8 miles de millones de personas, unos 900 millones más que la población actual [en el 2000]. Sin embargo, si la población del Tercer Mundo hubiese intentado obtener el 70% de sus calorías de productos animales, como los EE. UU., Canadá o la U. E., sólo la mitad de la humanidad se hubiese alimentado. Estas estadísticas indican los problemas fundamentales. El primero es la compleja tarea de producir suficientes cantidades de los alimentos para satisfacer las necesidades y cumplir con la hercúlea tarea de hacerlo de forma económica y ambientalmente sostenible. El segundo, igual o incluso más abrumador, es distribuir los alimentos equitativamente. La pobreza es el mayor impedimento para una distribución equitativa que, a su vez, se hace más grave por el rápido crecimiento de la población”*.

Terminaré con unas palabras de Luis Herrera Estrella (2008): *“Durante el pasado medio siglo hemos sido testigos del notable aumento en el rendimiento de los cultivos, mayoritariamente gracias a la Revolución Verde, y en el énfasis en la creación de nuevas variedades de maíz, trigo y arroz mediante mejora convencional. Pero, el impacto de la Revolución Verde en términos de incremento de los rendimientos se ha ido desacelerando desde hace cierto tiempo. Simultáneamente la población mundial ha seguido creciendo, particularmente en los países en vías de desarrollo. Por tanto, la capacidad de alimentar a la población mundial depende de los avances en nuestro conocimiento de la genómica y la genética vegetales, y de nuestra capacidad para generar nuevas variedades que puedan satisfacer las demandas ambientales y climáticas que los agricultores encontrarán probablemente en el futuro”*.

Bibliografía

- Araus JL, Ferrio JP, Buxó R, Voltas J. 2007. The historical perspective of dryland agriculture: lessons learned from 10.000 years of wheat cultivation. *J. Exp. Bot.* 58: 131–145.

- Borlaug E. 2000. The Green Revolution revisited and the road ahead. Special 30th Anniversary Lecture, The Norwegian Nobel Institute, Oslo, September 8, 2000.
- Evenson RE, Gollin D. 2003. Assessing the Impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. Science 300:758-762.
- Herrera-Estrella L. 2008. The green revolution is slowing. What next? TWAS Supplement to Nature Publishing Group. p 29.
- Peng J, Richards DE, Hartley NM, Murphy GP, Devos KM, Flintham JE, Beales J, Fish LJ, Worland AJ, Pelica F, Sudhakar D, Christou P, Snape JW, Gale MD, Harberd NP. 1999. 'Green revolution' genes encode mutant gibberellin response modulators. Nature 400: 256-261.
- Sasaki A, Ashikari M, Ueguchi-Tanaka M, Itoh H, Nishimura A, Swapan D, Ishiyama K, Saito T, Kobayashi M, Khush GS, Kitano H, Matsuoka M. 2002. Green revolution: A mutant gibberellin-synthesis gene in rice. Nature 416: 701-702.
- Taiz L, Zeiger E. 2006. Plant Physiology (4^a ed.). Ed. Sinauer. <http://4e.plantphys.net>.



Marcelino Pérez de la Vega es Catedrático de Genética de la Universidad de León. Licenciado y doctor en Biología por la Universidad Complutense de Madrid, tras una estancia postdoctoral de un año en la Universidad de California, Davis, se incorporó a la Universidad de León en el curso 1980-81. Además de director de los antiguos Departamentos de Genética, y de Ecología, Genética y Microbiología, durante el periodo 2000-2008 ha sido Vicerrector de

Investigación.

Desarrolla su investigación en el análisis poblacional y evolutivo de especies vegetales, y en la obtención y aplicación de conocimiento genético de varias plantas de cultivo para su mejora y la conservación de recursos genéticos. Ha sido director de 18 Tesis Doctorales, e investigador principal de más de 20 proyectos internacionales, nacionales y regionales. Es autor de 92 artículos científicos, la mayoría de ellos publicados en revistas indexadas en el JCI, 7 monografías de tipo docente/investigador, y 38 ponencias en congresos internacionales, algunas como orador invitado. Ha sido profesor invitado en la Escuela de Ingeniería Agraria de la Universidad de Mar del Plata, y en el Curso de Especialización Postuniversitaria en Mejora Genética Vegetal del Centro Internacional de Altos Estudios Agronómicos Mediterráneos en Zaragoza. Fue elegido Fellow de la American Association for the Advancement of Sciences, en el año 2000.