



Academia de Ciencias Matemáticas,  
Físico-Químicas y Naturales de Granada

**DE LA REVOLUCIÓN AGRÍCOLA A LA REVOLUCIÓN  
TRANSGÉNICA. CAUSAS, EVOLUCIÓN Y  
CONSECUENCIAS**

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN  
COMO ACADÉMICO CORRESPONDIENTE POR EL

**ILMO. SR. D. LUIS F. GARCÍA DEL MORAL GARRIDO**

GRANADA, 2021





**Academia de Ciencias Matemáticas,  
Físico-Químicas y Naturales de Granada**

**DE LA REVOLUCIÓN AGRÍCOLA A LA REVOLUCIÓN  
TRANSGÉNICA. CAUSAS, EVOLUCIÓN Y  
CONSECUENCIAS**

**DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN  
COMO ACADÉMICO CORRESPONDIENTE POR EL**

**ILMO. SR. D. LUIS F. GARCIA DEL MORAL GARRIDO**

Granada, 2021

DE LA REVOLUCIÓN AGRÍCOLA A LA REVOLUCIÓN  
TRANSGÉNICA. CAUSAS, EVOLUCIÓN Y CONSECUENCIAS

© LUIS F. GARCIA DEL MORAL GARRIDO

I.S.B.N.: 978-84-17970-24-6

Depósito Legal: GR 1613-2021

Edita e imprime: Godel Impresiones Digitales SL

**Rectora Magnífica de la Universidad de Granada,  
Excelentísimo Señor Presidente de la Academia,  
Ilustrísimas Sras. y Sres. Académicos,  
Excelentísimas e Ilustrísimas autoridades académicas,  
Queridos amigos, compañeros y familiares,  
Señoras y Señores,**

Ante todo, quiero expresar mi profundo y sincero agradecimiento a la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada, y en especial a su Sección de Ciencias Naturales y a su presidente, Prof. Luis Cruz Pizarro, por haber propuesto mi candidatura, así como a todos los académicos por aceptar mi nombramiento como académico correspondiente, lo que constituye un gran honor para mí y también una enorme responsabilidad, que asumo con la ilusión y la esperanza de poder colaborar en la consecución de los objetivos de la Academia: el cultivo, fomento y difusión de las ciencias y sus aplicaciones.

Muchas gracias también al Prof. José Olivares Pascual por haber tenido la generosidad de ser mi padrino y pronunciar el discurso de contestación, a quien conocí hace ya mucho tiempo en la Estación Experimental del Zaidín (CSIC), durante una estancia de un año bajo la dirección del Dr. Pedro Ramos Clavero, recién terminada mi Licenciatura en Ciencias Biológicas. Desde entonces, el Prof. Olivares ha sido siempre para mí un referente en excelencia de investigación y honestidad científica.

Son muchas las personas a las que debo agradecer que hoy me encuentre ante ustedes a punto de iniciar mi discurso de ingreso en esta docta institución. En primer lugar, gracias a mis padres por inculcarme el afán por el buen saber y la ilusión por el bien hacer. En palabras de Antonio Machado: “Despacito y buena letra, que el hacer las cosas bien, importa más que el hacerlas”, consejo que mi padre, gran lector, nos repetía con frecuencia. La ciencia es una actividad enormemente absorbente y la única fórmula para llevarla a cabo con éxito es el trabajo continuo, la constancia y la entrega, atributos que, junto a la vocación, son imprescindibles también para una buena labor docente. Pero es obvio que todo ello implica el sacrificio y la abnegación de los familiares más próximos, que con frecuencia padecen en silencio ausencias y desatenciones. Gracias, pues, a mi esposa y a mis hijos, sin cuyo cariño, comprensión y apoyo, no hubiese podido

desarrollar mi trabajo. Gracias también a mi hermano y hermanas, quienes siempre han estado a mi lado, especialmente a mi hermana Belén, también mi colaboradora científica durante muchos años y actualmente Profesora Titular en la universidad de Almería, y a mi hermano Raimundo, catedrático de Anatomía Patológica en nuestra universidad, de quien tanto he aprendido y a quien tanto debo.

Quiero dedicar un sentido recuerdo al Prof. Luis Recalde Martínez, catedrático de Fisiología Vegetal, quien me admitió en su departamento y me encargó el trabajo de mi tesis doctoral. Mi profundo agradecimiento también al Prof. José M<sup>a</sup> Ramos Clavero, director de mi tesis, un gran investigador y docente, de quien aprendí a investigar y analizar estadísticamente los resultados, y con quien me une una entrañable amistad.

Hacer ciencia hoy es una labor más colectiva que solitaria, que requiere del trabajo y la generosidad de muchos colaboradores. A todos ellos quiero agradecerles su apoyo, dedicación y esfuerzo para llevar a cabo con éxito los proyectos que hemos abordado en el grupo de investigación. En especial, mi agradecimiento a José Luis Molina-Cano del IRTA de Lérida, a José Marinetto del IFAPA de Granada, a José Luis Araus de la Universidad de Barcelona, a Gustavo Slafer de la Universidad de Lérida, a Daniel Miralles de la Universidad de Buenos Aires, a Miloudi Nachit de ICARDA en Siria, a Philippe Monneveux del CIMMYT de Méjico, a Roberto Tuberosa y Corinna Sanguinetti de la Universidad de Bolonia, a Nasserlah Nasserlah del INRA de Marruecos, a Antonio Martín y Helena Gómez McPherson del CSIC de Córdoba, a Benvindo Massas de la Estação Nacional de Melhoramento de Plantas en Elvas (Portugal) y a Vanessa Martos, Prof. Titular ya acreditada como Catedrática, quien me ha acompañado y ayudado con su trabajo y amistad desde su incorporación como becaria a mi grupo de investigación. También agradezco a mis doctorandos, tesinandos y alumnos de DEA y de Fin de Máster, su trabajo, su entusiasmo y su amistad a lo largo de todos estos años. Ahora, muchos de ellos son profesores u ocupan puestos de responsabilidad en el sector público y privado, tanto dentro como fuera de España.

Hoy es un día muy especial en mi vida. Tanto por mi ingreso en esta prestigiosa Academia, como por el hecho de que su presidente actual sea el Prof. Francisco González Lodeiro quien, al inicio de su mandato como Rector en el año 2008, me distinguió nombrándome su delegado para Asuntos Relacionados con Marruecos. De su enorme cultura, conocimientos científicos y capacidad de gestión, tuve el privilegio de aprender

no sólo los aspectos relacionados con mi cargo, sino generosidad, hidalguía y caballerosidad. Querido Rector, muchas gracias por todo.

Finalmente, dedicar un emocionado recuerdo al Prof. Norman E. Borlaug, Nobel de la Paz en 1970 por salvar a cientos de millones de personas de la muerte por hambre e inanición a través de la Revolución Verde. Conocí a Borlaug en el CIMMYT de México en 1997 y en 2005, contando ya con 91 años, aceptó mi invitación para su investidura como doctor Honoris Causa por nuestra universidad, ocasión en la que tuve el altísimo honor de ser su padrino de doctorado. Durante su estancia en Granada, nos impartió en la Facultad de Ciencias una magnífica conferencia sobre “Retos para reducir el hambre y la pobreza en el mundo”, donde exhortó a los numerosos estudiantes a “dar lo mejor de vosotros mismos, a esforzaros siempre para intentar alcanzar las estrellas, porque, aunque no lo consigáis, tan sólo con rozarlas, con tener un poco de polvo de estrellas en los dedos, se puede hacer mucho...”.

Y paso a leerles mi discurso, que también tiene algo que ver con las estrellas.



## **De la Revolución Agrícola a la Revolución Transgénica. Causas, Evolución y Consecuencias.**

**Luis F. García del Moral Garrido**

*La agricultura es un proceso  
auto catalítico que se  
retroalimenta  
continuamente una vez  
comenzado  
(Jared Diamond)*

Imaginemos a uno de nuestros ancestros humanos del Paleolítico a la entrada de su caverna contemplando la inmensidad del cielo nocturno, soñando con alcanzar las estrellas. Muchos miles de años después, en este mismo instante, la sonda *Voyager 1* se encuentra fuera de nuestro sistema solar viajando hacia esas mismas estrellas. En su interior lleva un disco de oro con un mensaje explicando quiénes somos y cómo es nuestra cultura. Esta es una aventura apasionante que comenzó hace aproximadamente 10.500 años con la llamada Revolución Agrícola.

### **La Revolución Agrícola o Neolítica**

Bajo este nombre se conoce el proceso que, mediante la domesticación de plantas y animales, propició el cambio desde una economía de cazadores-recolectores a agricultores y ganaderos, lo que aumentó la producción de alimentos y facilitó la transición de la humanidad desde una forma de vida nómada a sedentaria, al tiempo que estableció las bases para el desarrollo de

la tecnología y de la sociedad tal como la conocemos. Pero, y no menos importante, con este cambio de economía se produjo también un cambio de mentalidad. Los dioses de los agricultores ya no eran los mismos que los dioses de los cazadores. Los antiguos mitos se extinguieron y fueron sustituidos por otros. No existe pueblo agrícola de la antigüedad que no imagine haber recibido de sus dioses los cultivos y las enseñanzas para cultivarlos. Si hay agricultura, hay un dios o una deidad relacionada con ella. ¿Cómo entender si no los misterios de la germinación, de la fructificación, de los ciclos vegetales, de la fecundidad de la tierra...? Los Panteones de Mesopotamia, Persia, Egipto, Grecia, Roma y los de todas las culturas del Lejano Oriente y del Nuevo Continente, están llenos de dioses agrícolas. Deméter, Dionisos, Astarté, Isis, el dios del maíz y tantos otros, no son sino la personificación de los misterios de la fertilidad agrícola y de los ciclos vegetales. Divinidades, en suma, que concedieron a los humanos el regalo mágico de la agricultura.

## **El Creciente Fértil**

Este hecho trascendental para la humanidad ocurrió en una zona del sudoeste de Asia llamada Creciente Fértil, por su forma de luna creciente en un mapa. Actualmente corresponde al valle del Éufrates —la Mesopotamia de nuestros libros escolares—, parte del Líbano, de Siria, del Norte de Iraq y del sudeste de Turquía. Esta zona ha sido el escenario más antiguo de una serie de progresos humanos, como la fundación de las ciudades, la aparición de la escritura, el desarrollo de los grandes imperios de la antigüedad y, en resumen, de lo que conocemos como civilización [1-7]. A su vez, este desarrollo fue posible gracias a una elevada producción de alimentos mediante el cultivo de plantas y la cría de animales, lo que permitió obtener y almacenar excedentes alimentarios [1-5]. La Revolución Agrícola otorgó

a los humanos el control sobre su propio abastecimiento de alimentos, ejerciendo un tremendo impacto sobre la biosfera y sobre la humanidad, cuyas consecuencias todavía nos afectan [7,8].

### **¿Por qué hace 10.500 años y no antes o después?**

En el Paleolítico, todos los humanos de la Tierra eran cazadores-recolectores, pero hace unos 10.500 años, en algunas regiones del Creciente Fértil, algunos de ellos decidieron hacerse sedentarios y dedicarse a la producción de alimentos. Aunque las causas de esta transición de la caza y recolección a la producción de alimentos mediante la agricultura y la ganadería continúan siendo objeto de debate para arqueólogos y antropólogos, pueden señalarse los siguientes factores fundamentales.

En primer lugar, el declive en la disponibilidad de animales salvajes. En los últimos 13.000 años, y como consecuencia de los cambios climáticos de finales del Pleistoceno al comienzo del Holoceno tras la última glaciación, hubo una notable disminución de presas animales, provocada tanto por la retirada de la megafauna hacia regiones más frías –renos, bisontes, mamut lanudos, osos cavernarios, uros, caballos salvajes y megaloceros, una especie de ciervo gigante–, como también por el aumento de su caza, derivada de la mayor habilidad y número de cazadores humanos; del uso del fuego para desforestar; de la mejora en las herramientas y estrategia para cazar; y de la mayor cooperación entre tribus; a lo que contribuyó la baja tasa de reproducción de los grandes mamíferos del Cuaternario [9]. De hecho, desde el último interglaciar, en nuestro mega continente euroasiático, se han extinguido alrededor del 37% de las especies animales con una masa corporal superior a los 44 kg [9].

También la mayor disponibilidad de plantas silvestres potencialmente domesticables, como consecuencia igualmente de los cambios climáticos con la retirada de los hielos a finales del Pleistoceno [10]. Cambios que ampliaron mucho la superficie de hábitats de cereales y leguminosas silvestres, de los que podían lograrse buenas cosechas en poco tiempo. Estas plantas silvestres fueron las precursoras de los primeros cultivos en el Creciente Fértil: el trigo, la cebada y la lenteja [11-13].

Otro factor determinante fue la evolución acumulativa de tecnologías para la recolección, procesamiento y almacenamiento de las primeras cosechas. Rápidamente, gracias a la integración de la habilidad técnica y la observación natural, se desarrollaron hoces con puntas de sílex implantadas en mangos de madera o hueso para la recolección; cestos para el transporte del grano; trillas para el descascarillado; losas para moler el grano; la técnica de tostar las semillas para poder almacenarlas sin que germinasen y los fosos de almacenamiento subterráneo, algunos recubiertos de piedras para impermeabilizarlos. La evidencia de todas estas técnicas es abundante en el Creciente Fértil desde hace once mil años aproximadamente [1-5].

Finalmente, otro factor fundamental fue la correlación recíproca entre aumento de la producción alimentaria y densidad de población. Al aumentar la producción de alimentos incrementó el número de habitantes, porque rinde más calorías de nutrientes por hectárea que la caza-recolección y, a su vez, este incremento en la densidad de población favoreció la producción de alimentos, al incorporarse cada vez más población al sistema productivo en un ciclo positivo de realimentación, acelerándose más y más una vez comenzado. Cuando los humanos empezaron a producir alimentos y hacerse sedentarios, pudieron acortar los intervalos entre nacimientos, engendrando así más habitantes que necesitaban aún más alimentos [2-4,7,8].

Estos cuatro factores conjuntamente ayudan a explicar el hecho de que la transición a la agricultura en el Creciente Fértil diera comienzo hace unos 10.500 años y no en el período anterior, cuando todavía eran abundantes los mamíferos salvajes y la caza-recolección era mucho más remuneradora que una producción alimentaria incipiente, basada en cereales y leguminosas silvestres. Además, los humanos no habían desarrollado todavía las técnicas necesarias para cosechar, procesar y almacenar las semillas de forma eficiente, y la densidad demográfica no era aún lo bastante alta como para que se hiciese necesario dedicar un esfuerzo grande a la obtención de más calorías por hectárea.

### **¿Por qué en el Creciente Fértil y no en otras zonas con características similares?**

Podemos preguntarnos por qué los cambios que condujeron a la Revolución Agrícola ocurrieron precisamente en esa zona del sudoeste asiático y no en otra, y cuáles fueron las características que los determinaron. Una de las claves del Creciente Fértil es que está situado dentro del clima mediterráneo, caracterizado por inviernos suaves y húmedos y veranos largos, calurosos y secos. Este clima condiciona unas características ecofisiológicas que seleccionan a las especies vegetales que sean capaces de sobrevivir a la intensa sequía estival y crecer rápidamente al volver las lluvias otoñales. Por ello, muchas plantas de esta región, sobre todo especies de cereales y leguminosas son anuales, plantas herbáceas que mueren durante la estación seca. Esto les obliga a producir el mayor número posible de semillas con una gran cantidad de reservas alimenticias, ya que su imperativo biológico es la reproducción para garantizar la continuidad de la especie en la siguiente generación, más que la supervivencia del individuo,

como ocurre en las plantas perennes. Además, muchas de estas semillas de cereales y leguminosas son buenos comestibles para los humanos y al estar adaptadas para sobrevivir a una larga estación seca, tienen muy poca humedad y podían almacenarse durante largos períodos sin alterarse.

Una segunda ventaja de la flora del Creciente Fértil es que los antepasados silvestres de muchos cultivos eran ya abundantes y bastante productivos, y crecían en extensas áreas, y además necesitaron pocos cambios para pasar a ser cultivados [11-13]. La tercera ventaja de la flora del Creciente Fértil es que incluye un alto porcentaje de plantas hermafroditas que se polinizan a sí mismas (autogamia o autofecundación), aunque ocasionalmente pueden ser polinizadas por otras. La autofecundación permite a la planta transmitir a la descendencia sus propios genes –y las características útiles para los humanos– de una manera más estable que la fecundación cruzada, donde existe mezcla de los caracteres provenientes de individuos diferentes. De esta forma, la autofecundación permite fijar rápidamente los caracteres deseables en una población por selección de los mejores individuos, constituyendo una biología reproductiva muy favorable para los primitivos agricultores [2,12-14]. De hecho, los ocho primeros cultivos importantes que fueron domesticados en el Creciente Fértil son todos autógamos

Otra nada desdeñable ventaja del Creciente Fértil es que presenta una gran variedad de altitudes y topografías dentro de una distancia corta. Su gama de elevaciones, desde el punto más bajo de la Tierra a 40 m bajo el nivel del mar en el Mar Muerto, hasta los montes Zagros con 4.400 m cerca de Teherán, supone temporadas de cosecha escalonadas, ya que las plantas que crecían a altitudes más elevadas producían semillas un poco después que las plantas que crecían a altitudes más bajas. En consecuencia, los primitivos

agricultores podían recolectar semillas a medida que maduraban, lo que facilitó su interés por sembrarlas en las condiciones más favorables de los valles, donde dependerían menos de la lluvia.

## **El “Síndrome de Domesticación”**

La domesticación puede definirse como la modificación genética de una planta silvestre para crear una nueva forma alterada que la haga más idónea para las necesidades humanas, es decir, convirtiéndola en un cultivo [3,7,14]. Esta modificación puede ser intencionada o no, y para muchos cultivos el proceso de domesticación ha provocado que la planta dependa por completo de los humanos, hasta el punto de que no sea capaz de sobrevivir y propagarse por sí sola en la naturaleza. Recordemos que domesticación procede de la raíz latina *domus*, casa, y consiste en traer una planta o animal a nuestro entorno. La humanidad neolítica la consiguió a lo largo de miles de años mediante «selección automática»<sup>1</sup>, guardando y volviendo a sembrar las mejores semillas de las plantas más productivas [2,5,12]. Es muy probable que fuese una mujer la primera en aprender a guardar y sembrar las semillas recolectadas de una generación a la siguiente, es decir, la primera agricultora.

Hay un conjunto común de caracteres, conocido como "Síndrome de Domesticación", que consiste en una serie de rasgos genéticos controlados por un número relativamente pequeño de genes, que son precisamente los que facilitan el proceso de domesticación y permiten distinguir a la mayoría de los cultivos de sus progenitores silvestres. Además, estos rasgos genéticos, en las especies domesticadas, están organizados funcionalmente bajo un reducido número de genes reguladores, de modo que son susceptibles

---

<sup>1</sup> Automática porque se realiza sin que el que la practica sea plenamente consciente del proceso de mejora.

de manipulación humana, mientras que en la mayoría de las especies vegetales, esos mismos genes se disponen de tal forma en el genoma que resulta prácticamente imposible su modificación para la domesticación [13-17]. Por ello, de las 250.000 especies vegetales potencialmente domesticables, sólo unas mil han sido domesticadas. Además, en los últimos 2.000 años no se ha domesticado ningún cultivo agroalimentario importante [2,7,8].

En comparación con sus homólogas silvestres, en las plantas domesticadas se han modificado una serie de genes que condicionan caracteres morfológicos, fisiológicos y adaptativos [3,7,8,13-17].

Entre los morfológicos, las plantas cultivadas suelen tener una menor cantidad de inflorescencias por planta, pero con más fertilidad; frutos o granos más grandes; plantas más robustas, de menor altura y con un crecimiento más determinado; y un mayor índice de cosecha o mejor proporción de semillas respecto a la biomasa vegetativa.

Entre los caracteres fisiológicos, los más importantes fueron el aumento de la dominancia apical, con mayor crecimiento del tallo central en comparación con los laterales; una saturación luminosa de la fotosíntesis a niveles más altos de radiación; mayor duración del área foliar y del período de fotosíntesis; reproducción mediante autofecundación, lo que favorecía la estabilidad genética de los caracteres que se iban mejorando; la disminución o pérdida de sustancias amargas y tóxicas en los órganos comestibles; y un incremento de más de 10 veces en el diámetro de los haces vasculares para transportar asimilados a unos frutos cada vez más grandes.

De los adaptativos, los caracteres más relevantes fueron la pérdida de los mecanismos naturales de dispersión de semillas, de forma que los granos permanecían unidos a la espiga o la vaina, permitiendo así una recolección más fácil por los primitivos agricultores; la pérdida de dormición de las semillas, lo que proporcionaba una germinación más homogénea para su cultivo; la disminución o la pérdida de vernalización, es decir, de la necesidad de un período de frío invernal para florecer; cambios en la sensibilidad al fotoperiodo, lo que favoreció cultivarlas en una mayor extensión de latitud geográfica; una mayor sincronización en la floración y maduración de los frutos; y un elevado éxito en la polinización para producir frutos y semillas.

### **Los ocho cultivos fundadores**

La agricultura fue lanzada en el Creciente Fértil por la temprana domesticación de ocho cultivos, llamados «cultivos fundadores» [1-3,12,13]. Esos ocho cultivos fueron tres cereales (trigo farro, trigo espelta y cebada), cuatro leguminosas (lenteja, guisante, garbanzo y arveja) y una fibra (lino). De esta forma, conocimientos botánicos y de los ciclos vegetales, y nuevas ideas y técnicas, constituyeron lo que podríamos llamar el “paquete tecnológico” que finalmente sería la agricultura.

Las aportaciones fundamentales de las plantas a la humanidad mediante la Revolución Agrícola fueron en forma de hidratos de carbono, como granos de cereales; de proteínas, como legumbres y otras leguminosas; de grasas y aceites (lino, olivo, cártamo, colza); vitaminas; condimentos, especias, aromas y estimulantes; fibra textil (lino y algodón); macro y oligoelementos minerales (N, P, S, Ca, Mg, Zn, etc.); pienso para el ganado;

madera y paja para la construcción; medicinas y drogas; materia prima para utensilios diversos y bebidas fermentables (cerveza y vino, principalmente).

La abundancia de alimentos permitió sustentar una mayor densidad de población, lo que hizo crecer las aldeas que se transformaron en ciudades, dando como resultado la división y especialización del trabajo y el desarrollo de una incipiente tecnología, con la aparición de gremios y clanes especializados. Con la agricultura también surge la propiedad de la tierra y los pueblos se organizan para la defensa del territorio y de sus bienes. Paralelamente se desarrollan la artesanía, el arte, el comercio, la construcción y la administración. A medida que crecían las ciudades, su organización se hizo más compleja, provocando la diferenciación social basada en la especialización de las labores económicas y conduciendo a la aparición de la moneda y de instituciones como el Estado o el Ejército. De hecho, los grandes imperios de la antigüedad están ligados a un cultivo: Persia, Egipto y Roma, al trigo; China, al arroz; el imperio azteca, al maíz; el incaico, a la patata. La división del trabajo y el no depender directamente de la necesidad en cada grupo familiar de producir su propio alimento, permitió el desarrollo de una tecnología cada vez más avanzada hasta alcanzar las capacidades actuales, incluida la de enviar naves al espacio interestelar.

Todavía en la actualidad, el 99% de la alimentación mundial se basa, directa o indirectamente, en sólo 15 cultivos: cinco cereales (arroz en Asia, trigo en Europa, maíz en América, mijo y sorgo en África); dos tubérculos (patata y batata); una fruta (la banana); una raíz (mandioca); cuatro oleaginosas (soja, girasol, colza y palma aceitera) y dos azucareras (caña y remolacha) [18]. Los cereales aportan el 70% de los recursos alimenticios para la humanidad y aunque deficientes en el aminoácido esencial lisina, poseen alta metionina. Entre ellos, como hemos comentado, el trigo fue uno

de los primeros cultivos domesticados y su historia es la historia de la humanidad [19]. La domesticación del trigo y el comienzo de la agricultura van de la mano y actualmente es el cultivo más extendido. Se cultiva en alrededor de 219 millones de hectáreas en todo el mundo y junto al maíz y el arroz es uno de los alimentos básicos para la población mundial. Las leguminosas representan el 4% de los recursos alimenticios, con contenidos de proteína que superan el 25% y aminoácidos esenciales como la lisina, que complementan muy bien a los cereales, más ricos en hidratos de carbono [18]. Además, las leguminosas tienen la propiedad de establecer simbiosis con bacterias que fijan nitrógeno del aire, por lo que aumentan la fertilidad del suelo y favorecen el crecimiento de otros cultivos, característica que fue fundamental para el éxito de la agricultura neolítica. De hecho, la fijación biológica del nitrógeno es responsable de más del 80% del nitrógeno del suelo disponible para los vegetales.

### **Los Centros de Origen de las plantas cultivadas**

Son las regiones donde se inició su proceso de domesticación. Su identificación es posible porque son aquellas zonas donde todavía existen los parientes silvestres que las originaron. Además, se caracterizan por la presencia de alelos<sup>2</sup> dominantes, mientras que en la periferia del centro de origen los alelos recesivos suelen ser más frecuentes, así como por el hallazgo de restos arqueológicos de la planta en cuestión, por las menciones en documentos históricos y por la gran diversidad de nombres vernáculos que existen para esa especie en esa zona [6-8,13,14,20].

---

<sup>2</sup> Un alelo es cada una de las formas alternativas de un gen que ocupan el mismo lugar en los cromosomas homólogos y cuya expresión puede determinar una característica alternativa del fenotipo, como el carácter liso o rugoso de los guisantes de Mendel.

El primer botánico que especuló sobre el origen de las plantas cultivadas fue Alphonse De Candolle (1806-1893) en 1882<sup>3</sup>, pero la existencia de Centros de Origen fue precisada por Nikolai I. Vavilov (1887-1943) en 1926<sup>4</sup>. Vavilov fue un genetista ruso que determinó el origen de los cultivos euroasiáticos, fundó varios bancos de germoplasma vegetal en Moscú y San Petersburgo y formuló la “Ley de las series homólogas de variación”. En 1940 fue encarcelado por Stalin acusado por Trofím Lysenko —un agrónomo embaucador que prometía el imposible de cosechar grano de trigo durante el crudo invierno ruso—, quien denunció a Vavilov por ser un defensor de la genética, según Lysenko una “pseudociencia burguesa” inventada por el capitalismo para dar una justificación biológica a las diferencias de clase. Vavilov murió por inanición en la prisión de Moscú en 1943. En EE. UU. su labor fue continuada por Jack R. Harlan (1917-1999), quien fundó los bancos de germoplasma en América y profundizó en los estudios de domesticación de cultivos y de biodiversidad agrícola. Su libro *Crops and Man* (1975) [7] sigue siendo una obra imprescindible para entender la coevolución de agricultura y humanidad.

Los principales centros de origen de la agricultura neolítica son el ya mencionado Creciente Fértil para los ocho cultivos fundadores (hace 10.500-9.000 años); el delta del río Yangtsé para el arroz de grano redondo, el delta del río Amarillo para el mijo y Manchuria para la soja (hace 9.000 años); el Norte de la India para algodón, arroz de grano alargado y mango (hace 9.000–6.000 años); nueva Guinea para la caña de azúcar y el banano (hace 8.000–6.000 años); Mesoamérica para tomates, chiles, maíz, judía, calabaza, aguacate y papaya (hace 5.000–4.000 años); norte y centro de Sudamérica para patata, mandioca, pimiento, batata, cacao y algodón andino (hace

---

<sup>3</sup> De Candolle, A. (1883). *Origine des plantes cultivées*. Librairie Germer Baillière et C.ie, Paris, 377 p.

<sup>4</sup> Vavilov, N.I. (1926). *Studies on the Origin of Cultivated Plants*. Bulletin of Applied Botany and Plant Breeding, 16(2): 1-248, Leningrado.

5.000–4.000 años); delta del Níger para sorgo y arroz africano y Sahel y Etiopía para café, melón y sandía (hace 5.000–4.000 años); así como centro y este de Norteamérica para girasol y calabaza alargada (hace 4.000–3.000 años) [2,3,7,8,13,19-20].

Desde el Creciente Fértil, la incipiente agricultura se extendió gradualmente a través de un gradiente de longitud geográfica, llegando al sur de Europa hace unos 7.000 años. A medida que se iban cultivando, las variedades fueron adaptándose a las nuevas condiciones agroclimáticas, originando una serie de variedades locales o *landraces* con características cada vez más diferenciadas a medida que se alejaban de sus centros de origen. Nuestro grupo de investigación ha colaborado en la caracterización ecofisiológica de 152 variedades locales de trigo procedentes de 21 regiones del sur y norte de la cuenca mediterránea. Los resultados indican que la fecha de floración, la asimilación y translocación de fotoasimilados, el tamaño de los granos, la fertilidad de las espiguillas y el índice de cosecha, entre otras características fisiológicas, aumentaron progresivamente a medida que las variedades se aclimataban a las regiones más frías y húmedas de la cuenca mediterránea [21,22]. Asimismo, mediante el estudio de las relaciones filogenéticas usando microsatélites, un tipo de marcadores moleculares, también hemos colaborado en demostrar que la diversidad genética de estas variedades locales aumenta a medida que se alejan de su centro de origen, apareciendo además dos grandes agrupaciones genéticas que apoyan la hipótesis de que la dispersión del trigo por la cuenca mediterránea durante la prehistoria reciente, tuvo lugar tanto por el Norte, a través de Turquía, los Balcanes, Grecia e Italia, como por el Sur, a través de Jordania, Israel y Egipto [23].

## La sexualidad de las plantas

La selección automática durante miles de años consiguió mejorar de forma muy notable algunas de las plantas cultivadas desde el Neolítico. Sin embargo, este método puede fijar un carácter o un conjunto de caracteres que ya existe en la población original, pero no puede crear algo nuevo. A pesar de que los antiguos babilonios y egipcios conocían que en algunas plantas, como palmeras e higueras, había individuos masculinos y femeninos, hubo que esperar hasta 1694 cuando Rudolf Jakob Camerarius (1665-1721), botánico y director del jardín botánico de Tübingen en Alemania, describió científicamente la sexualidad de las plantas<sup>5</sup>, abriendo así el camino a la mejora de los vegetales mediante su hibridación deliberada. Este es un método mucho más potente que la simple selección, ya que permite reunir en una sola variedad los caracteres de otras, obteniendo así nuevas combinaciones génicas de interés. Superada la polémica entre gran parte de la comunidad científica de la época, que no aceptó la sexualidad vegetal durante más de 30 años, el médico y botánico francés Philippe de Vilmorin (1746-1804) comienza a aplicar la hibridación a la horticultura a finales del siglo XVIII, y su hijo funda en París en 1815 la primera empresa de producción de semillas mejoradas mediante hibridación y selección. Precisamente, fueron las técnicas de hibridación las que permitieron a Gregor Mendel (1822-1884), trabajando con guisantes –uno de los 8 cultivos fundadores–, formular en 1856 sus famosas leyes sobre la herencia de los caracteres, estableciendo los fundamentos de la Genética. Su “redescubrimiento” en 1900 inició la mejora vegetal sobre bases científicas.

---

<sup>5</sup> *DE SEXU PLANTARUM epistola, TVBINGÆ, 1694.*

## La Revolución Verde

En 1798 Thomas Robert Malthus (1766-1834), un clérigo inglés profesor de economía, había establecido que la población tiende a crecer en progresión geométrica, mientras que la producción de alimentos sólo aumenta en progresión aritmética, vaticinando por ello que una parte importante de la humanidad permanecería siempre en la miseria y el hambre. A mediados del siglo pasado, la superpoblación en países del continente asiático como India, China, Pakistán o Bangladesh hacía temer el cumplimiento de las predicciones catastrofistas de Malthus, cuando en 1944 Norman Ernest Borlaug (1914-2009), un agrónomo estadounidense de origen noruego, comenzó a trabajar en un proyecto financiado por la *Fundación Rockefeller* en cooperación con el gobierno de Méjico. Tras varios años de mejora genética convencional consiguió obtener trigos resistentes a diversas enfermedades e insensibles al fotoperiodo, lo que permitía cultivarlos en una amplia variedad de climas y latitudes. Sin embargo, para incrementar los rendimientos en los suelos de los países del Tercer Mundo, esquilados por el cultivo de cientos de generaciones de agricultores, era necesario desarrollar trigos que además resistieran mayores dosis de fertilizante nitrogenado sin encamarse, ya que las variedades disponibles, debido a tener un tallo largo y delgado, tendían a reblandecerse y volcarse cuando se aumentaba la dosis de nitrógeno. Por ello, Borlaug comenzó a buscar la forma de acortar la altura de la planta, encontrando en 1953 una variedad japonesa de trigo casi enana debido a la presencia de genes *Rht* (*reduced height*) que codifican para una proteína que reduce la capacidad de respuesta a las giberelinas, las hormonas responsables del crecimiento en longitud de los tallos vegetales [24]. Tras hibridar sus trigos con esta variedad enana, Borlaug obtuvo variedades de trigo bastante más bajas, con tallos más robustos y un mejor reparto de los fotosintetizados

durante el desarrollo de la planta, incrementando así el rendimiento de grano al reducir la biomasa vegetativa; es decir, mejorando el índice de cosecha, especialmente al incrementarse el aporte de fertilizantes nitrogenados. Muy pronto, estos enfoques de investigación se extendieron a otro cultivo de vital importancia para el continente asiático, el arroz. El impacto de la introducción de estas variedades altamente productivas de trigo y arroz, junto con la adopción de las nuevas prácticas agrícolas asociadas, fue impresionante. Entre 1960 y 1990 la producción de grano aumentó por encima del 2,1% anual, más que el ritmo de incremento de la población en esos años, desmintiendo así las predicciones de Malthus. Ello supuso casi triplicar las cosechas sin apenas aumentar la superficie cultivada y que muchos cientos de millones de personas pudiesen escapar de la miseria y la muerte por inanición, por lo que Borlaug recibió el Nobel de la Paz en 1970 por su labor humanitaria en la lucha contra el hambre [25]. En abril de 2005 la Universidad de Granada, a propuesta del Dpto. de Fisiología Vegetal, invistió como Doctor Honoris Causa al profesor Borlaug en una solemne y emotiva ceremonia.<sup>6</sup>

## **La Revolución Genómica**

El descubrimiento en 1953 de que el ADN es el manual de instrucciones para hacer un ser vivo y el desciframiento de los mecanismos básicos de la función génica, del código genético y de la fabricación de proteínas, marcaron el comienzo de la Biología Molecular y de las llamadas “ómicas”. Entre ellas, la Genómica, término acuñado en 1986 por Thomas Roderick, se ocupa de la secuenciación, mapeo, y análisis de las funciones de genomas completos. Entre sus aplicaciones, podemos destacar que permite comparar secuencias génicas similares en diferentes especies y entender procesos

---

<sup>6</sup> Discursos en <https://www.ugr.es/~lfgm/images/Discursos%20Institucionales.pdf>.

evolutivos; puede establecer las variaciones genéticas entre distintas poblaciones de una misma especie; es capaz de identificar motivos de secuencia altamente conservados en el genoma –y por ende funcionalmente importantes–; y es la base para elaborar mapas genéticos, de gran utilidad para los mejoradores vegetales [26,27].

Los avances en las aplicaciones de la genómica pronto posibilitaron el desarrollo de los marcadores moleculares, que son fragmentos de ADN variables en secuencia o en tamaño entre individuos o poblaciones. Sus ventajas radican en que permiten identificar y rastrear genes útiles en programas de mejora vegetal, y además se heredan de forma mendeliana, son independientes de las condiciones ambientales y pueden identificarse en fases muy tempranas del desarrollo de la planta. Su uso extensivo, especialmente de los llamados microsatélites y de los QTLs<sup>7</sup> o caracteres de herencia cuantitativa, junto con los estudios de asociación genotipo-fenotipo, ha potenciado enormemente la mejora genética de los cultivos [26,27]. Nuestro grupo de investigación ha colaborado en la identificación de tres importantes QTLs para la adaptación del trigo a las condiciones de sequía y altas temperaturas del clima mediterráneo en relación sobre todo con el cambio climático [28]. Asimismo, mediante el uso de marcadores moleculares hemos contribuido a los estudios de asociación genotipo-fenotipo [29,30] y a dilucidar la filogenia de algunas antiguas variedades españolas de trigo [31].

Desde 2013 se cuenta con otra poderosa herramienta para agregar, interrumpir o cambiar secuencias específicas de genes, la llamada edición génica mediante el sistema CRISPER-Cas9 [32], para cuyo desarrollo ha

---

<sup>7</sup> *Quantitative Trait Loci* o locus de herencia cuantitativa, un tipo de marcador molecular para mejorar caracteres complejos como el rendimiento o la resistencia a estreses abióticos.

sido imprescindible la aportación del investigador español Francis Mojica de la universidad de Alicante [33].

La aplicación de la genómica a la mejora vegetal, junto con la Revolución Verde, ha permitido que la producción mundial de cereales haya pasado de 1.820 millones de Tm en 1990 a 2.700 en 2020, lo que significa un incremento del 3.3% anual o 29.3 millones de Tm por año<sup>8</sup>. No obstante, de acuerdo con las previsiones de la Organización de Naciones Unidas se alcanzarán 9.500 millones de personas en el año 2050, lo que supone dos mil millones más que en la actualidad. Según la FAO, debido a este incremento demográfico, la producción de alimentos debería seguir aumentando a un ritmo similar, desafío nada fácil de alcanzar debido a la incidencia del cambio climático y a la estabilización de los rendimientos de las variedades actuales, muchas de ellas ya altamente productivas [18].

## **Genómica y domesticación**

La aplicación de la genómica al estudio de los genes responsables del síndrome de domesticación tiene interés, además de por su importancia para la humanidad, porque constituye un buen sistema experimental para estudiar las relaciones filogenéticas y evolutivas de los vegetales [31,34-39] y ayuda a comprender fenómenos básicos del desarrollo, fisiología, reproducción y adaptación de las plantas [26,27,37,38,40-43].

La identificación de los *loci*<sup>9</sup> afectados por la domesticación se lleva a cabo mediante la comparación de la diversidad en secuencias génicas entre las poblaciones silvestres y las domesticadas, combinada con test de neutralidad, como el estadístico *D* de Tajima [44,45]. Este estadístico es una

---

<sup>8</sup> *Cereal Production*. Banco Mundial (<https://data.worldbank.org/indicador/AG.PR.D.CREL.MT>).

<sup>9</sup> Plural de *locus*, posición ocupada por un gen particular en un cromosoma, que se usa en computación evolutiva para identificar posiciones de interés sobre determinadas secuencias del ADN.

prueba que permite distinguir entre una secuencia de ADN que evoluciona aleatoriamente en una población –esto es, de forma natural o *neutra*– de una que evoluciona sometida a un proceso no aleatorio, como bajo la presión de selección impuesta por la domesticación. Por ejemplo, con esta aproximación se ha encontrado que en el maíz (*Zea mays*) unos 1.764 genes –que representan aproximadamente el 6,6% de su genoma– han sido afectados por la domesticación, mientras que la modificación de otros 1.508 genes –el 5,6 %– está relacionada con la mejora genética moderna de este cereal [46, 47].

Una de las cuestiones importantes es si los genes que han permitido la domesticación ya estaban presentes en la población silvestre original o si han surgido por mutaciones *de novo* durante el proceso de domesticación. De los estudios hasta ahora disponibles, parece deducirse que el proceso de domesticación en la mayoría de los cultivos se inició por la aparición repentina de mutaciones en las poblaciones silvestres, mutaciones controladas por unos pocos genes mayores con fuertes efectos pleiotrópicos<sup>10</sup> sobre el fenotipo [16,35,37,39,41-43,48-50]. Estas mutaciones fueron rápidamente sometidas a un intenso proceso de selección automática por los primitivos agricultores, lo que condicionó una gran disminución de la diversidad genética en la población que se iba domesticando y condujo al aislamiento reproductivo entre la población silvestre y la domesticada. Posteriormente, la acumulación de una serie de mutaciones menores que fueron seleccionadas más o menos deliberadamente, dieron origen al fenotipo domesticado. Las mutaciones que posibilitaron la domesticación afectaron desde factores de transcripción hasta enzimas metabólicas e incluyen el polimorfismo de nucleótidos individuales, inserciones y pérdidas de trozos de un gen o de un cromosoma,

---

<sup>10</sup> La pleiotropía es el fenómeno por el que un solo gen controla varios caracteres fenotípicos.

inserción de transposones<sup>11</sup>, duplicación de genes y reordenación de fragmentos cromosómicos [35,37,38,41-43,48-50].

Como ejemplo de mutaciones en genes mayores, podemos citar el de una mutación sin sentido en el gen *CAL* de la col (*Brassica oleracea*), que codifica para un factor de transcripción que regula la diferenciación del meristemo floral y que condujo a la proliferación incontrolada de inflorescencias, que fueron posteriormente seleccionadas para originar la coliflor y el brócoli [51]. En la fresa (*Fragaria* sp.), una pérdida de 2 pares de bases en la región codificante del gen *KSN* (un factor transcripcional) resultó en una floración y fructificación continuas [52]. En la cebada (*Hordeum vulgare*), la pérdida de función del gen *Vrs1* cambió la arquitectura de la espiga desde el fenotipo de dos carreras (con 2 hileras de granos en la espiga) a 6 carreras (con 6 hileras de granos), con importantes repercusiones también sobre la fenología, el crecimiento y la productividad [41,53]. En el maíz, el fenotipo de un solo tallo está controlado por el alelo dominante *Tb-1*, que surgió mucho antes de la domesticación por inserción de un transposón, que provocó su sobreexpresión [41,54]. A veces, como en la judía (*Phaseolus vulgaris*), ocurrieron dos eventos de domesticación independientes, uno en Mesoamérica y otro en la región andina, cuyos genomas habrían divergido hace 185.000 años, mucho antes, por tanto, de que comenzara su domesticación [55].

Como alelos surgidos durante el proceso de domesticación, encontramos el gen *LGI* de panícula densa en arroz (*Oryza sativa*) [41,56], el gen *SUN* que regula la forma alargada del fruto en tomate (*Lycopersicon esculentum*) [57] o una mutación dominante en el gen *FASCIATED EAR2* del maíz, que incrementó espectacularmente el número de hileras de granos

---

<sup>11</sup> Los transposones son elementos génicos móviles, capaces de escindirse del sitio del genoma en que residen y reinsertarse en una nueva localización del mismo genoma, presumiblemente al azar. Sus movimientos se detectan porque alteran la expresión de genes cercanos, bien activándolos o inactivándolos.

en la mazorca [58]. Los transposones han jugado también un papel muy importante en la evolución del té (*Camellia sinensis*), un arbusto domesticado en la provincia de Yunnan en China hace más de 3.200 años. La secuenciación de su genoma en 2017 [59] ha revelado que el 64% de sus genes son retrotransposones<sup>12</sup> que se han ido duplicando a lo largo de la domesticación del té y que son los responsables de los elevados niveles de flavonoides y cafeína que confieren a esta bebida su sabor y propiedades estimulantes. Permítanme indicar que, según sus autores, todos chinos, esta secuenciación fue un trabajo improbable, ya que era como recomponer un puzle donde el 64% de sus miles de piezas fuesen idénticas y además situadas en un cielo de color azul homogéneo y sin nubes. Un verdadero trabajo de chinos, podríamos concluir.

Además, también hay cultivos que fueron domesticados a partir de hibridaciones espontáneas interespecíficas, como el trigo, originado por la hibridación natural hace unos 300.000 años entre un trigo silvestre (*Triticum urartu*, genoma AA) y una gramínea filogenéticamente cercana (probablemente *Aegilops speltoides*, genoma BB) para generar el trigo duro tetraploide (*Triticum durum* ssp. *dicoccoides*) con 4 juegos de cromosomas (AABB) [60,61]. Posteriormente, hace unos 8.000 años, una segunda hibridación intergenérica de este trigo ya bastante domesticado con la especie *Aegilops tauschii* (genoma DD), dio lugar al trigo harinero hexaploide (*T. aestivum*) con 6 juegos de cromosomas (AABBDD) [61], hibridación posiblemente favorecida de forma inconsciente por los primitivos agricultores. Durante la domesticación del trigo se seleccionó una mutación recesiva en el gen dominante *Br-A1*, mutación que condiciona que la espiga no se desarticule en la madurez para dispersar los granos y favorece su recolección [41,62] Otra mutación en el gen *Q* sobre el cromosoma 5A

---

<sup>12</sup> Los retrotransposones se producen por duplicación del ADN correspondiente, por lo que, tras su inserción, el genoma aumenta en una proporción equivalente al elemento insertado.

permitió que, en la madurez, el grano se separe de la cascarilla que lo cubre, para originar el grano desnudo que cultivamos actualmente [41,62]. Por cierto, que *triticum* en latín significa aquello que se tritura, lo que se muele.

También la hibridación, a veces seguida de propagación clonal<sup>13</sup>, ha sido importante en diversos frutales, como en el género *Citrus*, donde por sucesivas hibridaciones se originaron primero las mandarinas, luego las naranjas dulces y las ácidas y, por selección posterior, los pomelos [63]. Igualmente, las bananas proceden de la hibridación espontánea de bananas ya domesticadas (*Musa*×*paradisiaca*) con bananas silvestres (*Musa balbisiana*) que, por pérdida de un juego de cromosomas, originaron las actuales bananas triploides estériles (con 3 juegos de cromosomas) [64], que no producen semillas y necesitan ser propagadas exclusivamente mediante multiplicación vegetativa. Un caso muy notable de domesticación es el de la batata o boniato (*Ipomoea batatas*), originaria de Centro América, donde los primitivos agricultores seleccionaron una población que había sido infectada por una cepa especial de *Agrobacterium* que probablemente le conferiría alguna propiedad adaptativa, por lo que las batatas que actualmente consumimos todavía tienen genes de esta bacteria, siendo un ejemplo de un cultivo transgénico natural [65].

Estas especies originadas por hibridación espontánea, a pesar de que combinan cientos de miles de genes de distintos orígenes, no se consideran transgénicos ya que no han sido obtenidas usando técnicas de ingeniería genética. Actualmente se denominan *paleotransgénicos*.

---

<sup>13</sup> Método de multiplicación vegetativa mediante esquejes, estolones, bulbos, etc., que produce clones o plantas genéticamente idénticas a su progenitora.

## **La Revolución Transgénica o la domesticación del gen**

En 1974, Ivo Zaenen de la universidad de Gante descubrió el mecanismo [66] por el que *Agrobacterium tumefaciens*, una bacteria del suelo que lleva millones de años haciendo ingeniería genética por su cuenta, introduce varios de sus genes en el genoma de algunas células vegetales, causando en las plantas una enfermedad conocida como agalla de la base del tallo. Rápidamente se desarrollaron protocolos para utilizar esta bacteria como vector y producir plantas transgénicas que expresen genes de interés, bien de plantas o de otros organismos, como bacterias, virus o animales. Las primeras plantas transgénicas con características estables se obtuvieron de forma independiente por los equipos de Mary-Dell Chilton de la Universidad de Washington [67] y de Marc Van Montagu de la Universidad de Gante [68], publicándose en 1983 con tan sólo un mes de diferencia a favor del grupo de Chilton, lo que originó una cierta polémica acerca de la prioridad en el descubrimiento, si europea o americana, polémica debida al diferente lapso de tiempo de cada revista para la publicación de un manuscrito. En realidad, las plantas transgénicas no representan sino la *domesticación del gen*, un paso más en la Revolución Agrícola.

Actualmente, se cultivan transgénicos como maíz resistente al ataque de insectos, a herbicidas y más tolerante a la sequía; algodón resistente a insectos y herbicidas; soja y colza tolerantes a herbicidas; papaya resistente a virus; arroz dorado con betacaroteno para paliar la deficiencia de vitamina A, principal causa de ceguera evitable en niños del Tercer Mundo; patatas que no se oscurecen al cortarlas y que producen menores cantidades de acrilamida –una sustancia cancerígena– al freírlas; manzanas que no pardean tras pelarlas; berenjenas resistentes al ataque de insectos barrenadores; trigo sin gluten para celíacos; maíz biofortificado en elementos minerales deficientes en la dieta de muchos habitantes del Tercer Mundo o tomates con

mejoras nutricionales, incluido un tomate con propiedades antiestresantes obtenido mediante CRISPER-Cas9 y que ya se vende este mismo año en los comercios de Japón; y la lista no hace más que incrementarse continuamente. Después de 24 años de cultivo y 200 millones de Has en todo el mundo, estas plantas transgénicas han demostrado ser inocuas para la salud y su cultivo ha permitido disminuir la aplicación de muchas toneladas de insecticidas y fitosanitarios perjudiciales para el medio ambiente, contribuyendo también a un menor consumo de combustibles derivados del petróleo y a una disminución de gases con efecto invernadero, al reducir la utilización de maquinaria agrícola [69].

En la actualidad, se investiga activamente en la transferencia de genes para conferir a las plantas más resistencia a sequía, salinidad, altas temperaturas y estrés oxidativo, con objeto de mejorar la adaptación y el rendimiento de los cultivos frente al cambio climático. Otra línea de gran interés es la utilización de plantas transgénicas para producir anticuerpos monoclonales humanos (los llamados *planticuerpos*) y para sintetizar antígenos y preparar vacunas comestibles, logro que sería de gran trascendencia para los países en desarrollo, donde el coste de una simple jeringuilla es prohibitivo para muchas personas [69].

Dado que la fotosíntesis es la base del crecimiento y productividad vegetal, mejorar su eficiencia mediante ingeniería genética podría contribuir a una mayor seguridad alimentaria en las próximas décadas, a medida que crece la población mundial [70-73]. Uno de los objetivos consiste en aumentar la cantidad de moléculas de Rubisco (el enzima clave en el ciclo de Calvin) y mejorar su afinidad por el CO<sub>2</sub>, para incrementar así su capacidad carboxilante y disminuir las pérdidas por fotorrespiración. Otra posibilidad muy atractiva consiste en introducir mediante transgénesis la vía C<sub>4</sub> de alto rendimiento fotosintético en cultivos C<sub>3</sub>, como trigo o arroz. Para lograrlo, un

prerrequisito básico es conseguir un mecanismo efectivo de concentración de CO<sub>2</sub> en el cloroplasto, por lo que actualmente se trabaja en la ingeniería en plantas C<sub>3</sub> de carboxisomas de cianobacterias o de pirenoides de algas, que son micro compartimentos con grandes cantidades de anhidrasa carbónica que favorece la captación de CO<sub>2</sub>. También recientemente se ha informado que ciertas acuaporinas podrían funcionar como canales para mejorar la difusión de CO<sub>2</sub> a través de la membrana plasmática y la envoltura del cloroplasto y colaborar así en la posibilidad de introducir la fotosíntesis C<sub>4</sub> en cultivos C<sub>3</sub>. Asimismo, se investiga en la ampliación del espectro de absorción de luz fotosintéticamente activa mediante la introducción en las plantas de genes para las clorofilas *d* y *f* de cianobacterias, lo que permitiría aumentar hasta en un 19% los fotones disponibles para la fotosíntesis [74]. Ello es especialmente importante para aprovechar mejor la radiación bajo las condiciones de luz fluctuante en el interior de un cultivo. No obstante, y a pesar del gran esfuerzo investigador de los últimos 25 años, todavía no se ha conseguido una mejora sustancial de la eficiencia fotosintética de los cultivos mediante ingeniería genética.

Otro de los grandes desafíos de la ingeniería genética de cultivos es obtener cereales con capacidad de asimilar nitrógeno atmosférico, como hacen algunas bacterias de vida libre (diazotróficas) o en simbiosis con las raíces de leguminosas [75-78]. Esto permitiría disminuir espectacularmente el uso de fertilizantes nitrogenados, limitar los efectos negativos para el medio ambiente y la salud de la población debidos a la acumulación de nitritos en el agua potable y contribuir a un mejor desarrollo sostenible, ya que el proceso de Haber-Bosch para la síntesis de amoníaco y la elaboración de fertilizantes nitrogenados es muy costoso en términos energéticos, al consumir cada año el 8,27% de la energía mundial. Una estrategia consiste en la transferencia, incorporación y expresión de genes *nif* bacterianos que

sean capaces de codificar, ensamblar y mantener en funcionamiento en la planta transgénica el complejo enzimático nitrogenasa, el responsable de la fijación del nitrógeno atmosférico, desafío nada fácil de conseguir por la elevada complejidad estructural y funcional de la nitrogenasa. Además, como esta enzima se inactiva irreversiblemente por el oxígeno desprendido en la fotosíntesis, su expresión debería limitarse al período de oscuridad o en tejidos no fotosintéticos, como las raíces. Otra estrategia consiste en desarrollar en las raíces de los cereales nódulos capaces de fijar nitrógeno en simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*, como los de las leguminosas. Para ello, se necesitaría la ingenierización y expresión de diversos genes *nod* necesarios para la formación del nódulo y de genes *nif* para la fijación de nitrógeno. Actualmente, se investiga sobre el proceso de formación de micorrizas arbusculares en las raíces de arroz y otros cereales, como posibles vehículos para establecer esta simbiosis con *Rhizobium* u otras bacterias fijadoras de nitrógeno. Finalmente, otra estrategia, aparentemente menos complicada desde el punto de vista biotecnológico, radica en favorecer la colonización de los tejidos del cereal por bacterias endofíticas fijadoras de nitrógeno. Se contempla la producción de un metabolito transgénico específico que modifique la rizosfera de la planta para facilitar su colonización por la bacteria diazotrófica necesaria. No obstante, hasta la fecha, tampoco se ha conseguido ningún cereal autótrofo para el nitrógeno.

### **La humanidad ¿domesticadora o domesticada?**

Como tema de reflexión, cabe preguntarse si ha sido la humanidad quien ha domesticado a las plantas o han sido éstas las que han domesticado a la humanidad. Trigo, cebada, maíz, soja, algodón, girasol..., han pasado de ser unas pocas hierbas en sus lugares de origen a ocupar millones de has en

todo el mundo y a emplear a cientos de millones de personas en su cultivo y propagación. Desde luego, si el éxito de la evolución consiste en conseguir el mayor número posible de cadenas de ADN, el éxito evolutivo de estas especies cultivadas ha sido espectacular, lo que no hubiese sucedido sin la Revolución Agrícola y el trabajo humano. En lugar de domesticación, ¿no sería quizás más apropiado hablar de una forma de mutualismo planta-humanidad?

### **Astronautas vegetales**

Desde mediados del siglo pasado se investiga activamente por rusos, americanos, chinos y europeos, la posibilidad de cultivar plantas en invernaderos en la Luna y en planetas como Marte [79,80]. De hecho, las primeras semillas viajaron a bordo del Sputnik-4 en 1960 y el Biosatélite-2 de la NASA llevó al espacio en 1967 cuatro plantas de pimiento. El primer cultivo vegetal extraterrestre se realizó en 1971, en la estación espacial rusa Salyut-1 donde germinaron 4 semillas de lino –otro de los cultivos fundadores–. En 2012 volvió a crecer una planta en el espacio, un girasol cultivado por el astronauta de la NASA Don Pettit. El 10 de agosto de 2015 se llevó a cabo por los astronautas de la Estación Espacial Internacional (EEI) la primera degustación de lechugas cultivadas íntegramente fuera de nuestro planeta. En 2016 se difundió una hermosa foto de una flor de Zinnia cultivada en la EEI como la primera planta florecida en el espacio, aunque en 1982 los astronautas rusos de la famosa estación espacial Salyut-7 ya habían hecho florecer un ejemplar de *Arabidopsis thaliana* bajo gravedad cero.

Proyectos como MELiSSA (*Micro-Ecological Life-Support System Alternative*) [81] de la Agencia Espacial Europea, Veggie (*Vegetable*

*Production System*) de la NASA [82] o EDEN ISS (*Vegetable Cultivation for Moon and Mars*) [83] de un consorcio mundial, estudian desde hace años el funcionamiento de los vegetales en el espacio para conocer como las plantas ajustan su fisiología y necesidades para crecer en un entorno tan alejado de su experiencia evolutiva. Se trata de obtener información clave sobre fenómenos como el fototropismo y gravitropismo bajo condiciones de gravedad reducida y ausencia del campo magnético terrestre, adaptaciones a la alta radiación, a la ausencia del transporte de fluidos por convección y a la alteración de las fuerzas de tensión-cohesión que rigen el transporte de agua y la absorción de nutrientes bajo la gravedad terrestre [84-86].

En enero de 2019 se informó que la misión china *Chang'e 4* había conseguido germinar semillas de algodón en la cara oculta de la Luna. En un futuro cercano la NASA planea enviar a Marte un miniinvernadero con semillas de *Arabidopsis thaliana*. ¿Estaremos ante unos nuevos cultivos fundadores, verdaderos astronautas vegetales? ¿Será el inicio de una nueva Revolución Agrícola hacia las estrellas?...

La respuesta está en el viento.

En el Viento Solar.

He dicho.

## Referencias bibliográficas

- [1] Bellwood P (2005). *First Farmers: The Origins of Agricultural Societies*. Blackwell Pub., Oxford, GB.
- [2] Cubero JI (2018). *Historia General de la Agricultura. De los pueblos nómadas a la Biotecnología*. Guadalmezán, Talenbook, Córdoba.
- [3] Diamond J (1977). *Guns, Germs, and Steel: the Fates of Human Societies*. Norton, New York.
- [4] Mazoyer M, Roudart L (2006). *History of World Agriculture*. J.M. Membrez, Earthscan, London.
- [5] Kent F (1973). *The origins of agriculture*. *Ann Rev Anthropol* 2: 271-310, 1973.
- [6] Rindos D (1984). *The Origins of Agriculture: An Evolutionary Perspective*. Academic Press, New York.
- [7] Harlan J (1975). *Crops and Man*. American Society of Agronomy. Madison, Wis, EEUU.
- [8] Diamond J (2002). *Evolution, consequences and future of plant and animal domestication*. *Nature* 418:700-707.
- [9] Stuart AJ (2014). *Late Quaternary megafaunal extinctions on the continents: a short review*. *Geol J* 50: 338-363.
- [10] Hillman G (1966). *Late pleistocene changes in wild plant-food available to hunter-gatherers of the northern Fertile Crescent: Possible preludes to cereal cultivation*. In: Harris DR (ed.). *The Origins and Spread of Agriculture and Pastoralism in Eurasia*, pp. 159-203, UCL Press and Smithsonian Institution Press, London.
- [11] Kисley ME (1992). *The agricultural situation in the Middle East in the VIIth millennium BP*. In: Anderson PC (ed.). *Préhistoire de l'agriculture; nouvelles approches expérimentales et ethnographiques*. pp. 87-93, Edition du CNRS, Monographie du Centre de Recherche Archéologiques, Paris.

[12] Barigozzi C (ed.). *The Origin and Domestication of Cultivated Plants*, Elsevier, Amsterdam, 1986.

[13] Zohary D, Hopf M (2000). *Domestication of Plants in the Old World*. 3rd ed. New York: Oxford University Press Inc., Oxford.

[14] Evans LT (1993). *Crop evolution, adaptation and yield*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

[15] Taiz L (2013). *Agriculture, plant physiology and humankind*. *Theor Exp Plant Physiol* 25: 167-181.

[16] Flint-Garcia SA (2013). *Genetics and Consequences of Crop Domestication*. *J. Agric. Food Chem.* 61, 8267–8276.

[17] Meyer RS, DuVal AE, Jensen HR (2012). *Patterns and processes in crop domestication: an historical review and quantitative analysis of 203 global food crops*. *New Phytol* 196: 29–48.

[18] FAO “*How\_to\_Feed\_the\_World\_in\_2050.pdf*.” Último acceso 12 de julio de 2020. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert\\_paper/How\\_to\\_Feed\\_the\\_World\\_in\\_2050.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf)

[19] Bonjean AP, Angus W, van Ginkel M (eds) (2011). *The World Wheat Book. A History of Wheat Breeding*. Tec & Doc/Intercept Ltd., Paris.

[20] Abbo S, Lev-Yadun S, Gopher A (2010). *Agricultural Origins: Centers and Noncenters; A Near Eastern Reappraisal* *Crit Rev Plant Sci* 29:317–328

[21] Moragues M, García del Moral LF, Moralejo M, Royo C (2006). *Yield formation strategies of durum wheat landraces with distinct pattern of dispersal within the Mediterranean basin: I. Yield components*. *Field Crops Res* 95:194-205.

[22] Moragues M, García del Moral LF, Moralejo M, Royo C (2006). *Yield formation strategies of durum wheat landraces with distinct pattern of dispersal within the Mediterranean basin: II. Biomass production and allocation*. *Field Crops Res* 95:182-193.

[23] Soriano JM, Villegas D, Aranzana MJ, García del Moral LF, Royo C (2016). *Genetic structure of modern durum wheat cultivars and*

*Mediterranean landraces matches with their agronomic performance.* PLoSOne.11: e0160983.

[24] Hartley NM, Murphy GP, Devos KM, Flintham JE, Beales J, Fish LJ, Worland AJ, Pelica F, Christou P *et al.* (1999). *Green revolution genes encode mutant gibberellin response modulators.* Nature 400: 256–261.

[25] Hesser L (2006). *The Man Who Fed the World. Nobel Peace Prize Laurate Norman Borlaug and his Battle to End World Hunger.* Durban House Pubs. Comp., Inc., Dallas, Texas.

[26] Jackson SA, Iwata A, Lee S-H, Schmutz J, Shoemaker R (2011). *Sequencing crop genomes: approaches and applications.* New Phytol 191: 915–925

[27] Bolger ME, Weisshaar B, Scholz U, Stein N, Usadel B, Mayer KF (2014). *Plant genome sequencing – application for crop improvement.* Curr Opin Biotech 26:31-37.

[28] Maccaferri M, Sanguineti MC, Corneti S, Araus JL, Ben-Salem M, Bort J, DeAmbrogio E, Garcia del Moral LF *et al.* (2008). *Quantitative Trait Loci for Grain Yield and Adaptation of Durum Wheat (Triticum durum Desf.) across a Wide Range of Water Availability.* Genetics 178:489–511.

[29] Maccaferri M, Sanguineti MC, Demontis A, El-Ahmed A, Garcia del Moral LF, Maalouf F, Nachit M *et al.* (2011). *Association mapping in durum wheat grown across a broad range of water regimes.* J. Exp. Bot. 62: 409-438, 2011.

[30] Royo C, Maccaferri M, Álvaro F, Moragues M, Sanguineti MC, Tuberosa R, Maalouf F, García del Moral LF (2010). *Understanding the relationships between genetic and phenotypic structures of a collection of elite durum wheat accessions.* Field Crops Res.119:91-105.

[31] Martos V, Royo C, Rharrabti Y, García del Moral LF (2005). *Using AFLPs to determine phylogenetic relationships and genetic erosion in durum wheat cultivars released in Italy and Spain throughout the 20th century.* Field Crop Res 91: 107-116.

[32] Wang T, Zhang H, Zhu H. (2019). *CRISPR technology is revolutionizing the improvement of tomato and other fruit crops.* Hortic Res 6:1–13.

- [33] Mojica FJ, Ferrer C, Juez G, Rodríguez-Valera F (1995). *Long stretches of short tandem repeats are present in the largest replicons of the Archaea Haloferax mediterranei and Haloferax volcanii and could be involved in replicon partitioning*. Mol Microbiol 17: 85-93.
- [34] Le Thierr D'Ennequin M, Toupance B, Robert T, Godele B, Gouyon P (1999). *Plant domestication: a model for studying the selection of linkage*. J Evol Biol 12:1138–1147.
- [35] Tang H, Sezen U, Paterson AH (2010). *Domestication and plant genomes*. Curr Opin Plant Biol 13: 160-166.
- [36] Pickersgill B (2009). *Domestication of plants revisited – Darwin to the present day*. Bot J Linn Soc 161: 203-212.
- [37] Meyer RS, Purugganan MD (2013). *Evolution of crop species: genetics of domestication and diversification*. Nat Rev Genet 14: 841-852.
- [38] Ross-Ibarra J, Morrell PL, Gaut BS (2007). *Plant domestication, a unique opportunity to identify the genetic basis of adaptation*. Proc Natl Acad Sci USA 104: 8641-8648
- [39] Gepts P (2004). *Crop domestication as a long-term selection experiment*. Plant Breed Rev 24: 1-44.
- [40] Larson G, Piperno DR, Allaby RG, Purugganan MD, Andersson L, Arrollo-Kalin M, Barton L, Vigueira CC, Denham T, et al. (2014). *Current perspectives and the future of domestication studies*. Proc. Natl Acad. Sci. 111: 6139-6146.
- [41] Olsen KM, Wendel JF (2013). *A Bountiful Harvest: Genomic Insights into Crop Domestication Phenotypes*. Annu Rev Plant Bio .64:47-70.
- [42] Gepts P (2014). *The contribution of genetic and genomic approaches to plant domestication studies*. Curr Opin Plant Biol 18:51–59.
- [43] Purugganan MD, Fuller DQ (2009). *The nature of selection during plant domestication*. Nature 457: 843-848.
- [44] Guerra-Garcia A, Piñero D (2017). *Current approaches and methods in plant domestication studies*. Bot. Sci. 95: 345-362.

- [45] Tajima F (1989). *Statistical methods to test for nucleotide mutation hypothesis by DNA polymorphism*. *Genetics* 123:585–595.
- [46] Wright SI, Vroh I, Schroeder SG, Yamasaki M, Doebley JF, McMullen MD, Gaut BS (2005) The effects of artificial selection on the maize genome. *Science* 308:1310–1314
- [47] Hufford MB, Lubinsky P, Pyhäjärvi T, Devengenzo MT, Ellstrand NC, Ross-Ibarra J (2013). *The genomic signatures of crop-wild introgression in maize*. *PLOS Genetics* 9: e1003477.
- [48] Wright S, Gaut BS (2005). *Molecular population genetics and the search for adaptive evolution in plants*. *Mol Biol Evol* 22:506–519.
- [49] Doebley J, Gaut BS, Smith BD (2006). *The molecular genetics of crop domestication*. *Cell* 127, 1309 – 1321.
- [50] Smýkal P, Nelson MN, Berger JD, Von Wettberg EJB (2018). *The Impact of Genetic Changes during Crop Domestication*. *Agronomy* 8(7):119.
- [51] Purugganan MD, Boyles AL, Suddith J (2000). *Variation and selection at the CAULIFLOWER floral homeotic gene accompanying the evolution of domesticated Brassica oleracea*. *Genetics* 155: 855-862.
- [52] Iwata H, Gaston A, Remay A, Thouroude T, Jeauffre J, Kawamura K, Hibrand-Saint Oyant L *et al.* (2012). *The TFL1 homologue KSN is a regulator of continuous flowering in rose and strawberry*. *Plant J* 69: 116–125.
- [53] Komatsuda T, Pourkheirandish M, He C, Azhaguvel P, Kanamori H, Perovic D, Stein N, Graner A, Wicker T, Tagiri A. *et al.* (2007). *Six-rowed barley originated from a mutation in a homeo domain-leucine zipper I-class homeobox gene*. *Proc Natl Acad. Sci* 104:1424-1429.
- [54] Tsiantis M (2011). *A transposon in tb1 drove maize domestication*. *Nat Genet* 43, 1048–1050.
- [55] Schmutz J, McClean PE, Mamidi S, Wu GA, Cannon SB, Grimwood J, Jenkins J, Shu S, Song Q, Chavarro C *et al.* (2014). *A reference genome for common bean and genome-wide analysis of dual domestication*. *Nature Genetics* 46: 707-713.

- [56] Sang T, Ge S (2013). *Understanding rice domestication and implications for cultivar improvement*. *Curr Opin Plant Biol* 16:139–146.
- [57] Rodriguez GR, Muñoz S, Anderson C, Sim SC, Michel A, Causse M, Gardener BB, Francis D, van der Knaap E (2011). *Distribution of SUN, OVATE, LC and FAS in the tomato germplasm and the relationships to fruit shape diversity*. *Plant Physiol* 156: 275-285.
- [58] Taguchi-Shiobara F, Yuan Z, Hake S, Jackson D (2001). *The fasciated ear2 gene encodes a leucine-rich repeat receptor-like protein that regulates shoot meristem proliferation in maize*. *Genes Develop* 15:2755–2766.
- [59] Xia En-H, Zhang Hai-B, Sheng J, Li K, Zhang Qun-J, Kim Ch, Zhang Y, Liu Y *et al.* (2017). *The tea tree genome provides insights into tea flavor and independent evolution of caffeine biosynthesis*. *Molec Plant*, 10:866-877.
- [60] Feldman M (2001). *Origin of cultivated wheat*. In: Bonjean P., Angus W.J.(eds.). *The World Wheat Book. A History of Wheat Breeding*, pp. 3-56. Tec & Doc/Intercept Ltd, Paris.
- [61] Pozzi C, Salamini F (2007). *Genomics of wheat domestication*. In: Varshney RK, Tuberosa R (eds.), *Genomics-Assisted Crop Improvement, Vol 2: Genomics Applications in Crops*, pp. 453-481, Springer, Dordrecht, The Netherlands,
- [62] Jantasuriyarat C, Vales MI, Watson CJ, Riera-Lizarazu O (2004). *Identification and mapping of genetic loci affecting free-threshing habit and spike compactness in wheat (Triticum aestivum L.)*. *Theor Appl Genet* 108: 261-273.
- [63] Wu GA, Prochnik S, Jenkins J, Salse J, Hellsten U, Murat F, Perrier X, Ruiz M, Scalabrin S, Terol J *et al.* (2014). *Sequencing of diverse mandarin, pummelo and orange genomes reveals complex history of admixture during citrus domestication*. *Nature Biotech* 32: 656–662.
- [64] Heslop-Harrison JS, Schwarzacher T (2007). *Domestication, genomics and the future for banana*. *Ann Bot* 100: 1073–1084.
- [65] Kyndt T, Quispe D, Zhai H, Jarret R, Ghislain M, Liu Q, Gheysen G, Kreuze JF (2015). *The genome of cultivated sweet potato contains Agrobacterium T-DNAs with expressed genes: An example of a naturally transgenic food crop*. *Proc Natl Acad Sci* 112: 5844-5849.

- [66] Zaenen I, Van Larebeke N, Teuchy H, Van Montagu M, Schell J (1974). *Supercoiled circular DNA in crown-gall inducing Agrobacterium strains*. J Mol Biol 86: 109–127.
- [67] Barton KA, Binns AN, Matzke AJM, Chilton, M-D (1983). *Regeneration of intact tobacco plants containing full length copies of genetically engineered T-DNA, and transmission of T-DNA to R1-progeny*. Cell 32:1033–1043.
- [68] Herrera-Estrella L, Depicker A, Van Montagu M, Schell J (1983). *Expression of chimaeric genes transferred into plant cells using a Ti-plasmid-derived vector*. Nature 303:209–213.
- [69] García del Moral Garrido, LF (2021). *Biotecnología Vegetal. Fundamentos y aplicaciones*. Universidad de Granada, Granada 2021.
- [70] Evans JR (2013). *Improving photosynthesis*. Plant Physiol 162:1780–1793.
- [71] Dann M, Leister D (2017). *Enhancing (crop) plant photosynthesis by introducing novel genetic diversity*. Phil Trans R Soc. B 372: 20160380
- [72] Simkin AJ, López-Calcagno PE, Raines CA (2019). *Feeding the world: improving photosynthetic efficiency for sustainable crop production*. J Exp Bot 70:1119–1140.
- [73] Garcia del Moral LF, Boujenna A (2020). *Biotechnological approaches to improve carbon fixation in agricultural crops*. Mod Concept Devel Agrono 7: 721-724. MCDA. 00066.
- [74] Furbank RT, Sharwood R, Estavillo GM, Silva-Perez V, Condon AG (2020). *Photons to food: genetic improvement of cereal crop photosynthesis*. J. Exp. Botany 71: 2226–2238.
- [75] Rosenblueth M, Ormeño-Orrillo E, López-López A, Rogel MA, Reyes-Hernández BJ, Martínez-Romero JC, Reddy PM, Martínez-Romero E. (2018) *Nitrogen Fixation in Cereals*. Front Microbiol 9:1794.
- [76] Liu D, Liberton M, Yu J, Pakrasi HB, Bhattacharyya-Pakrasi M (2018). *Engineering nitrogen fixation activity in an oxygenic phototroph*. mBio 9:e01029-18.

- [77] Batista MB, Dixon R (2019). *Manipulating nitrogen regulation in diazotrophic bacteria for agronomic benefit*. Bioch Soc Trans 47:603–614.
- [78] Boujenna A, Garcia del Moral LF, (2021). *Biotechnological Approaches to Develop Nitrogen-Fixing Cereals: A review*. Spanish J Agric Res (en prensa).
- [79] Ferl R, Wheeler R, Levine HG, Paul AL (2002). *Plants in space*. Curr Opin Plant Biol 5:528–563.
- [80] Casado J (2006). *Cultivating the Future – Growing food in space*. Spaceflight, May 2006: 180–189.
- [81] Gòdia F, Albiol J, Montesinos JL, Pérez J, Creus N, Cabello F, Mengual X, Montras A, Lasseur C (2002). *MELiSSA: a loop of interconnected bioreactors to develop life support in Space*. J Biotechnol 99: 319–330.
- [82] Massa GD, Newsham G, Hummerick ME, Caro JL, Stutte GW, Morrow RC, Wheeler RM (2013). *Preliminary species and media selection for the VEGGIE space hardware*. Gravitational Space Research 1: 95-106.
- [83] Zabel P, Bamsey M, Zeidler C, Vrakking V, Johannes BW, Rettberg P, Schubert D et al. (2015). *Introducing EDEN ISS - A European project on advancing plant cultivation technologies and operations*. 45th International Conference on Environmental Systems ICES-2015-58 12-16 July 2015, Bellevue, Washington, pp. 1-13
- [84] Musgrave M E (2002). *Seeds in Space*. Seed Sci Res 12: 1–16.
- [85] Monje O, Stutte GW, Goins GD, Porterfield M, Bingham GE (2003). *Farming in space: environmental and biophysical concerns*. Adv Space Res 31:151–167.
- [86] Poulet L, Fontaine J-P, Dussap C-G (2016). *Plant's response to space environment: a comprehensive review including mechanistic modelling for future space gardeners*. Bot Lett 163: 1-11.

**Contestación al discurso de Ingreso en la Academia de Ciencias  
Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada del**

**Ilmo. Sr. D. Luis Garcia del Moral Garrido**

**por el**

**Ilmo. Sr. D. José Olivares Pascual**

Excmo. Sr. Presidente

Excmos. e Ilmos. Académicos

Señoras y Señores

Una vez más he de agradecer a la Academia la confianza que me presta al pedirme que conteste el discurso de entrada de un nuevo académico. En esta ocasión se trata de dar cumplimiento a la propuesta que hizo en su día la Sección de Naturales para que el profesor Luis García del Moral pasara a formar parte de esta docta corporación. Es para mí una satisfacción corresponder a esa confianza con unas palabras que expresen las cualidades

que como persona, docente y científico posee el hoy candidato que le han permitido el pase a este trámite de audiencia.

Mi primer punto de contacto con Luis García del Moral se remonta a sus inicios investigadores cuando pasó por el grupo de Fitopatología, dirigido por el doctor Ramos Clavero, que en aquellos tiempos estaba integrado en el Departamento de Microbiología de la Estación Experimental del Zaidín del que yo formaba parte. Su estancia allí fue breve pues como otras personas que pasaron por ese departamento terminaron acogidas en el de Fisiología Vegetal de la Universidad de Granada con el que había una estrecha relación, iniciada por el profesor Luis Recalde Martínez y mantenida en el tiempo por la hoy compañera nuestra, la académica profesora Carmen Lluch. Esta situación especial me ha permitido seguir la marcha de los integrantes de ese Departamento universitario y por tanto, no ser ajeno a la labor llevada a cabo por el profesor García del Moral.

Personalmente, siempre me ha interesado todo lo relacionado con la revolución verde. De hecho, el intento de sustitución de la fertilización nitrogenada por la fijación biológica de nitrógeno, llevada a cabo por bacterias libres o en asociación con las plantas, mencionado en un apartado de su conferencia, y que ha sido objeto de estudio en mis más de 50 años de investigación, se puede considerar, si no integrada, paralela al menos, en esa denominada revolución verde, derivada de la propuesta realizada por el Premio Nobel Borlaug en los años cincuenta del siglo pasado, sumando a la lucha contra el hambre la protección del medio.

Un segundo encuentro fue la participación, allá por los últimos setenta del pasado siglo, en un proyecto dirigido por el Profesor Recalde concedido a la Estación Experimental del Zaidín y a la Universidad de Granada por la

Fundación Ramón Areces en su I convocatoria Nacional. Con el título de “Aspectos conducentes a la disminución de las importaciones de soja y maíz”, este proyecto contemplaba el desarrollo de tres acciones, una de las cuales iba dirigida a estudios fisiológicos de los cultivos implicados, en los que se encuadraba el hoy profesor García del Moral, entonces como Ayudante, y otra para la mejora de la simbiosis Rhizobium-leguminosa, que entraba dentro de mi responsabilidad. Una tercera se ocupaba de estudios de nutrición animal dirigidos por el Doctor Julio Boza.

En su discurso reglamentario el profesor García del Moral nos ha dado una sucinta, pero clara visión del desarrollo de la agricultura desde que los cazadores-recolectores descubrieron las ventajas de crear sus propios huertos. De cómo a lo largo del tiempo y espacio se han ido seleccionándose las distintas especies vegetales con la aparición de las surgidas por simple selección natural de los diferentes caracteres adaptados a las condiciones ambientales reinantes entonces. Los recolectores se fijaron en aquéllos que les serían más aprovechables y así vinieron haciendo en el transcurso de los siglos. Al igual que se domesticaron los animales para distintos usos, se consiguió una colección de plantas también domesticadas, primero pequeña, que creció con el tiempo, si bien limitada comparada con el número total de especies que podían suministrar los requerimientos nutricionales de una población todavía no muy grande. Según hemos podido escuchar, la ciencia explica el porqué de esa limitación todavía no superada, a no ser que se recurra a la aplicación de los últimos recursos técnicos. El aumento de la población fruto del sedentarismo y de una mejor alimentación, llevó a insistir en el cultivo de las especies más rentables, unas 15 como acabamos de oír, en las que todavía se basa el 99 por ciento de la alimentación a nivel global, apoyado por la entrada en escena de prácticas agrícolas que favorecen el crecimiento,.

Dos hechos importantes hay en esta historia que han permitido incrementar la producción. Aparte de la puesta en cultivo de más suelo agrícola, aunque a costa a veces de efectos colaterales no deseables, pronto vieron nuestros antepasados que la adición al suelo de materia orgánica, principalmente en forma de estiércol, favorecía los cultivos, posiblemente al observar que las plantas que crecían próximas a los establos tenían mejor presencia. También se pudo apreciar que la cercanía a ciertos depósitos minerales tenía un efecto positivo sobre el crecimiento vegetal. De ahí surgió la práctica de la fertilización integral que más o menos desarrollada se ha mantenido a lo largo de la historia, mejorada y dirigida con la irrupción de la genética por Mendel. La citada revolución verde, que comenzó por Borlaug, es un ejemplo, y más recientemente con la introducción de la biología molecular al permitir la construcción de plantas con los caracteres más demandados por la sociedad, los consumidores, o resistentes a las distintas condiciones ambientales.

Pero los resultados actuales de todos conocidos no se habrían alcanzado si no se hubieran llevado a cabo unos intensos y extensos estudios sobre la fisiología de las plantas. Y aquí es donde nuestro candidato ha desarrollado toda su labor investigadora, después de los cortos y limitados escauceos con la fitopatología, como indiqué al comienzo.

El denominador común en sus más de veinte proyectos dirigidos o participados, financiados por la Unión Europea, las Agencias estatal o autonómica, empresas, etc., ha sido los estudios fisiológicos y genéticos llevados a cabo sobre cebada, especialmente la cervecera, triticale (híbrido de trigo y centeno) y sobre todo trigo duro. Los resultados derivados del desarrollo de estos proyectos se han difundido en un centenar de

publicaciones y expuestos como ponencias o posters en numerosas reuniones científicas nacionales o internacionales. El objeto de la investigación se ha volcado sobre las condiciones de cultivo y la mejora genética con vistas a la selección de variedades por sus rendimientos o resistencia a distintos factores ambientales, desarrollada por su grupo o en colaboración con otros nacionales o extranjeros, como apoyo o posibilitar una visión más global del problema.

Hasta el momento puedo citar aquí algunos de los resultados, tales como la definición de un fenotipo de cebada cervecera para ambientes mediterráneos, recomendaciones, ya recogidas en manuales de agronomía y adaptado por los agricultores, sobre el uso de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de cebada, así como de la observación y descripción del efecto beneficioso de la aplicación foliar de azufre elemental. No podemos dejar atrás el aprovechamiento del triticale, cereal mencionado arriba, derivado de su propia experiencia. Y por último, para no cansar a la audiencia, la utilización de marcadores moleculares en la mejora genética de los cereales dirigida a mitigar los efectos del cambio climático.

Aparte de su labor docente llevada a cabo desde que se incorporó como Ayudante en el citado Departamento de Fisiología Vegetal, se pueden citar otras actividades, como, y valgan de ejemplo, diversas estancias en el extranjero, entre ellas, en la Universidad de Bolonia, en el Centro Internacional para la Investigación Agrícola en Zonas Áridas, ICARDA (Siria), la Universidad de Chile o el Centro Internacional para la Mejora del Maíz y el Trigo, CIMMYT (Méjico), donde tuvo la oportunidad de conocer al citado arriba Dr. Borlaugh, que fue invitado a Granada, cuya Universidad le nombró Doctor Honoris Causa, título que recogió en 2005 en el acto protocolario en el que el Profesor del Moral actuó de padrino. En otro orden

de cosas, nuestro propuesto fue por siete años Delegado del Rector de la Universidad de Granada para asuntos relacionados con Marruecos, en cuyo periodo se firmaron varios convenios y establecieron diversas colaboraciones con diferentes instituciones. Hay también que resaltar su faceta como divulgador de su ciencia.

Muy recientemente, y lo hemos podido leer en la prensa, se le ha concedido el proyecto “Sustainable”, del programa Horizon de la Comisión Europea. Su objetivo estratégico resumido es integrar sistemas de Inteligencia Artificial de vanguardia que faciliten procedimientos de gestión de la agricultura. El grupo de trabajo está formado por investigadores de 15 Instituciones de 8 países. El tema es interesante y entra de lleno en una de las siete prioridades que la ONU ha marcado recientemente para terminar con el hambre y proteger el planeta. Por otro lado, acaba de aparecer su libro, publicado por la Universidad de Granada, titulado “Biotecnología vegetal. Fundamentos y Aplicaciones”. Volumen de más de 400 páginas de interesante lectura y aplicación.

El Prof. García del Moral puede presumir desde hoy de algo no muy frecuente como ser el tercer académico de su familia, pues allá por 1968 un tío suyo entraba en la Real Academia de San Dionisio de Ciencias, Artes y Letras, de Jerez, y otro algo más tarde, en los 80, pintor y poeta, era recibido en la Real de Bellas Artes de Santa Isabel de Hungría, de Sevilla. Aunque parezcan distintas estas Academias y la nuestra tienen en común el cultivo del arte porque, ¿qué es la investigación sino la observación de la naturaleza, estudiarla y plasmarla en algo tangible para darla a conocer? Escrito esto me vino al paso una frase de Fabiola Gianotti, directora del CERN, que confirma lo dicho: “El humanismo, las artes y las ciencias son expresiones de la misma fuente: la creatividad y el genio humano”.

Para terminar, sólo me queda decir que, aparte del buen concepto personal que cada uno de nosotros pueda tener del candidato presentado hoy aquí, ha quedado claro que después de oídos estos parlamentos, reúne con creces méritos suficientes para su incorporación a esta Academia, que en contrapartida se beneficiará, sin duda, de los conocimientos que pueda aportar, por lo que todos nos damos la enhorabuena.

Gracias









Godet  
Editorial

ISBN 978-84-17970-24-6

9 788417 970246

D.L. - GR 3633-2023