

LA INNOVACIÓN EN EL DESARROLLO AGRÍCOLA

Francisco García Olmedo
Dr. Ing. Agr. ; Ldo en Química
Real Academia de Ingeniería

El balance mundial en la producción de alimentos ha sido claramente positivo durante las últimas décadas, a pesar de las indudables sombras. Si nos atenemos a las cifras absolutas, en torno a mil millones de personas padecían hambre en los años cincuenta del pasado siglo y, esencialmente, el mismo número la padecen ahora. En el último quinquenio se han producido notables oscilaciones en el precio de los alimentos y en su disponibilidad, originándose una crisis agroalimentaria. El hambre sigue siendo sin duda una de las mayores lacras de la humanidad.

Sin embargo, el número de personas que reciben el mínimo de las calorías diarias que necesitan, ha aumentado de los 2.000 millones a los 5.700 millones en cincuenta años, lo que apunta a que, en ese periodo, han debido abundar más los aciertos que los errores en la producción del pan de nuestros días. Así por ejemplo, China e India, que en su momento se consideraron como casos sin solución, se han convertido en ejemplos de prosperidad agrícola.

En China, el número de hambrientos descendió de 303 millones en 1979-81 a 122 millones en 2003-2005, y en India, a pesar del crecimiento vertiginoso de la población, se pasó de 262 a 231 millones de subnutridos en el mismo periodo. Y no sólo se han dado aumentos de la productividad por hectárea y de la producción agraria global sino que se ha mejorado la calidad de los alimentos, haciéndose éstos más adecuados a los grupos de población más vulnerables, como las mujeres y los niños.

El reto técnico

El reto de aumentar la disponibilidad de alimentos en un 70 por ciento para el año 2050 no es ni mucho menos exclusivamente técnico, aunque no hay duda de que para responder a él no basta con aplicar el actual estado del arte sino que habrá que realizar una serie de avances técnicos cuyo buen fin es por ahora incierto. La dificultad radica en las limitaciones que ya han surgido y seguirán surgiendo en las disponibilidades de factores esenciales para la producción agrícola, como son el suelo laborable, el agua, la energía y los nutrientes, así como el continuo cambio de las reglas del juego que lleva consigo el cambio climático.

Las mencionadas limitaciones han de situarse en el marco actual de la dominación humana de los ecosistemas de la Tierra (Tabla 1).

Es sabido que, hace más de dos siglos, Robert Malthus supuso que mientras la población humana iba a crecer según una progresión geométrica, la producción de alimentos lo iba a hacer según una progresión aritmética. La realidad se ha encargado de desmentir a Malthus, al menos hasta muy recientemente, ya que, aunque la población creció más deprisa que lo predicho, la producción de alimentos aumentó a una tasa mayor que la del crecimiento de la población.

Hasta mediados del siglo XX, fue el aumento de la superficie cultivada el que resolvió principalmente el problema, aunque también se produjeron variedades mejoradas genéticamente que aumentaron el rendimiento por hectárea. A partir de ese momento, el aumento de la producción de alimentos ha dependido casi

exclusivamente del aumento del rendimiento por unidad de superficie, ya que para esas fechas se habían puesto en cultivo todas las tierras idóneas para tal fin, junto a millones de hectáreas que jamás debieron cultivarse. Desde hace medio siglo, el suelo es un factor de producción limitado: si entonces se disponía de media hectárea por persona para alimentarnos, en el 2050, de acuerdo con las predicciones, dispondremos de menos de un tercio de esa cifra. Por supuesto que todavía puede ponerse nuevo suelo en cultivo, sobre todo, con algunas enmiendas técnicas, en África y América del Sur, pero el suelo laborable se destruye a mayor velocidad de la que se crea, debido a la expansión de las ciudades y las infraestructuras, la erosión, la desertización o la salinización.

Tabla 1. Magnitud aproximada de los impactos humanos sobre la Tierra*

Alteración de los ecosistemas terrestres	Fracción alterada
Transformación del territorio por el ser humano	42 % de la superficie
Consumo humano de la biomasa vegetal (incl. bosques)	40 % del total
Invasión de hábitats por plantas foráneas	20% de las especies
Extinción de pájaros en los dos últimos milenios	22 % de las especies
Pesquerías explotadas al máximo, en exceso, o extintas	60 % de la marinas
Emisiones de CO ₂ de origen antropogénico	20 % del total emitido
Fijación artificial de nitrógeno	58% de fijación biológica
Agua dulce renovable apropiada por el ser humano	> 54 %

*Basado en Vitousek et al. *Science* 277, 294 (1997)

El suelo agrícola se ha convertido en un bien de carácter estratégico que hace bastante tiempo atrae las inversiones de los grandes especuladores financieros. Así por ejemplo, son numerosas las grandes fortunas que han comprado considerables extensiones en países tales como Namibia, Chile o Argentina, país este último en el que una docena de propietarios han acaparado más de una docena de millones de hectáreas que cubre más de la mitad de sus acuíferos.

Más recientemente, países como China, Corea del Sur, Arabia Saudí, Emiratos, Qatar o incluso Suráfrica, andan comprando o arrendando a largo plazo millones de hectáreas en otros países, sobre todo africanos. Así por ejemplo, la venta fallida de miles de hectáreas a Corea del Sur hizo caer recientemente el gobierno de Madagascar.

Este nuevo fenómeno ha tomado por sorpresa incluso a instituciones especializadas como la FAO, que han debido apresurarse a estudiar el fenómeno para poder tomar decisiones apropiadas a sus objetivos. La limitación del factor suelo hace gravitar sobre otros factores el cumplimiento del objetivo antes enunciado de aumentar un 70 por ciento la producción de alimentos para el año 2050.

Agua de riego

Las necesidades humanas de agua componen una demanda global cuya dimensión obliga a considerarla como un recurso natural que puede resultar limitante para el desarrollo económico. No es sencillo establecer cuál es el umbral de la pobreza respecto a la disponibilidad de agua dulce (limpia o contaminada), ya que si bien las necesidades fisiológicas para beber se establecen de forma objetiva, el mínimo necesario para mantener una adecuada calidad de vida es más elusivo.

Algunos expertos han cifrado en 100 litros por persona y día las necesidades mínimas para bebida, cocina, higiene y otros fines domésticos. A esta cifra hay que añadir la del agua necesaria para la actividad agrícola, la producción industrial y la generación de energía, lo que supone varios centenares de litros adicionales.

Una situación se considera como de escasez extrema si las disponibilidades totales de agua dulce no superan los 1.000 metros cúbicos por persona y año, mientras que la ausencia de estrés hídrico se sitúa por encima del límite de 1.700 metros cúbicos por persona y año. De forma aproximada, el 15 % del agua se destina a fines domésticos, otro 15 % a usos industriales y la mayor parte, el 70 %, a la producción agrícola. En España, país cuya pluviosidad es limitada, se dedica a regadíos una proporción del agua bastante superior a la media europea. Además, éste es uno de los países con mayor número de embalses para la producción hidroeléctrica, un uso que es compatible con el agrícola.

En contraste con la proporción de la población mundial que pasa hambre, que viene disminuyendo, aunque no de forma satisfactoria, la de los que padecen escasez extrema de agua va en aumento, del 3 % en 2000 al 7 % que se predice para 2025, al igual que la de los que padecen estrés hídrico, del 5 % al 31 % en el periodo señalado.

El agua dulce es el principal factor limitante de la producción agrícola. A diferencia de otros recursos naturales, el agua no tiene sustitutos para la mayor parte de sus usos y su transporte es costoso e impracticable más allá de unos cientos de kilómetros. El agua dulce representa menos del 3 % del volumen total de agua que hay en el planeta y, además, dos tercios de ella se encuentran atrapados en forma de hielo en polos y glaciares, mientras que el tercio restante se distribuye entre seres vivos, atmósfera, ríos, lagos, zonas pantanosas, acuíferos subterráneos y poros del suelo. No toda el agua dulce es renovable, ya que existen vastos depósitos de agua fósil subterránea, acumulada en tiempos pretéritos sin que se explote o se renueve. Éste es el caso del depósito existente en el subsuelo de la desértica Libia, a partir del cual se está procediendo a crear un río artificial que se secará cuando éste se agote.

Lo que llueve sobre tierra es del orden de 110 *mkmc* (mil kilómetros cúbicos), de los que 70 *mkmc* vuelven a la atmósfera en forma de vapor y 40 *mkmc* fluyen hacia el mar, ya sea en corrientes superficiales –ríos y escorrentías– o subterráneas, completándose así el ciclo hidrológico. Se estima que un 26 % de los 70 *mkmc* de agua dulce que vuelven a la atmósfera desde tierra, corresponden a la evapo-transpiración de la masa vegetal de los cultivos, pastos y bosques que nos apropiamos.

Energía

La agricultura moderna depende en gran medida de la energía fósil. El progreso de la actividad agrícola a lo largo del siglo XX ha llevado asociado un

incremento notable de la energía consumida tanto de modo directo, en la realización de las distintas operaciones, como indirectamente, en la producción de los insumos necesarios para dicha actividad, tales como los fertilizantes, los productos fitosanitarios o la maquinaria.

Este incremento de la energía consumida ha sido uno de los factores responsables del notable aumento de la producción de alimentos que ha tenido lugar, especialmente desde los años sesenta. Como ejemplo ilustrativo puede utilizarse el caso del maíz en Estados Unidos: en 1910, el consumo directo de combustible por tonelada de grano era desdeñable frente a los 20 litros que se consumían en 1980, lo mismo que el consumo indirecto imputable a los fertilizantes (5 kg/Tm), los fitosanitarios (0,5 kg/Tm) o la maquinaria. En contraste, la mano de obra necesaria bajó de más de 60 horas/Tm a menos de 2 horas/Tm. El rendimiento de maíz por hectárea se multiplicó por 3 entre 1940 y 1980. La relación entre el insumo de energía y el rendimiento no es lineal, de modo que un menor consumo de energía no sólo disminuye el rendimiento sino que aumenta el consumo de energía por tonelada de alimento producido.

La disminución de la mano de obra necesaria ha contribuido a mejorar la eficiencia de la producción de alimentos y ha liberado al ser humano del duro trabajo en el surco, hasta el punto que una sola persona pueda manejar hasta 300 hectáreas de maíz de un modo altamente mecanizado y tecnificado. Sin embargo, el precio creciente de la energía, las previsibles limitaciones en el uso de los combustibles fósiles y la necesidad de limitar las emisiones de anhídrido carbónico, hacen de la mejora de la eficiencia energética de la producción agrícola y el aumento de su dependencia de energías renovables una prioridad imperiosa. La producción de fertilizantes nitrogenados consume cantidades ingentes de gas, junto a algo de carbón, y representa más de la mitad del consumo agrícola de energía.

Nutrientes

Las plantas contienen los elementos nitrógeno, fósforo y potasio en unas proporciones fijas que están determinadas genéticamente, de tal modo que si falta alguno de ellos como nutriente (en forma de nitrato, amonio, urea, fosfato, potasa, etc.) el crecimiento queda detenido y, en condiciones de escasez, el más escaso de los tres se convertirá en limitante del crecimiento. Es sencillo calcular las cantidades de estos elementos contenidas en la totalidad de la producción anual de alimentos y obvio que deberemos devolver al suelo aquello que hemos extraído, en la debida forma y momento, si queremos cosechar año tras año. El volumen de lo producido ha alcanzado tal dimensión que dicha devolución plantea problemas en la actualidad y, sobre todo, los planteará en el futuro. Estos problemas son específicos para cada uno de los elementos y nos referiremos a ellos de forma sucesiva.

El nitrógeno puede aportarse al suelo como componente del abono orgánico (materia vegetal, estiércol, compost) o en forma inorgánica (fertilizantes nitrogenados), pero las plantas sólo pueden absorberlo en forma inorgánica, por lo que el abono orgánico deberá degradarse (mineralizarse), para liberar en forma inorgánica el nitrógeno que contiene y poder ser útil a la planta. Puede decirse que la planta necesita nitrógeno inorgánico (nitrato, amonio...) y lo absorbe sin importarle su procedencia, sea esta la fabricación por síntesis química a partir del nitrógeno atmosférico, la lenta mineralización de la materia orgánica o el contenido en el agua de lluvia.

Además ciertas plantas, como las leguminosas, pueden fijar el nitrógeno atmosférico en simbiosis con ciertas bacterias, notablemente especies bacterianas

del género *Rhizobium*. En la fijación simbiótica de nitrógeno se consume una considerable cantidad de energía fotosintética, lo que va en claro detrimento de la producción de grano y, en definitiva, de las calorías alimentarias generadas por hectárea. En contra de una creencia muy generalizada, la conversión de la planta de trigo en fijadora de nitrógeno, algo técnicamente casi inimaginable, le haría perder su principal gracia, que es la de ser uno de los principales sustentos de la humanidad, ya que tendría que dedicar gran parte de la energía luminosa captada a la fijación de nitrógeno, en lugar de hacerlo en la producción de biomasa.

La idea de incluir las leguminosas en la rotación de cosechas como modo de enriquecer el suelo en nitrógeno está justamente implantada desde antiguo en la buena práctica agrícola, pero no es una respuesta eficaz a la demanda global de nitrógeno. Sin la síntesis química de fertilizantes nitrogenados, no sería posible alimentar a la humanidad, ni en la actualidad ni en el futuro, pero la cantidad que se necesita fabricar es tal que plantea y planteará importantes problemas en lo que se refiere al gasto energético y a las emisiones de gases con efecto invernadero. Además, el suelo apenas es capaz de retener el nitrógeno aportado, salvo en forma de materia orgánica, por lo que el que no es absorbido por la planta, acaba eutrofizando las aguas de ríos y lagos, con graves consecuencias medio-ambientales. Los retos técnicos para paliar estos problemas son considerables.

Para aportar fósforo a los cultivos disponemos exclusivamente de fosfatos minerales cuyos yacimientos se distribuyen irregularmente por el planeta. Existen regiones, como China y el Norte de África, que son especialmente ricas en estos minerales, pero no cabe duda que estamos ante un recurso natural finito cuyo plazo de agotamiento definitivo dependerá de la tasa de uso y de la magnitud de las reservas estimadas.

La magnitud de estas reservas es incierta por el momento, ya que su estimación se sustenta en un inventario basado en las declaraciones de los países que las poseen, lo que le resta fiabilidad. Como con todo recurso finito, parte de la incertidumbre se debe al desconocimiento de cuáles serán las dificultades crecientes para su extracción. Los más pesimistas alertaron de que el máximo de extracción se produciría ya en 1989, aunque esa predicción catastrofista no se confirmó. Las posturas de la FAO o de la industria de fertilizantes tienden a ser menos pesimistas, y una estimación más reciente y aquilatada sitúa el pico del fósforo hacia el 2030. Sin embargo, la calidad del fosfato roca que va quedando es cada vez menor y sus costes de extracción y producción, cada vez mayores.

La planta sólo aprovecha una fracción del fosfato que se aporta al suelo y la mayor parte del no aprovechado es retenido en el suelo al transformarse en fosfatos insolubles. Existe un cierto margen para mejorar el aprovechamiento eficiente del fosfato por la planta cultivada, mediante técnicas de solubilización y por la vía genética, mientras que son prioritarias las investigaciones para mejorar la gestión de este nutriente, incluida su recuperación de aguas residuales, tanto animales (purines) como humanas, y a partir de las aguas marinas.

Los suelos en general van liberando lentamente cierta fracción del potasio que las plantas necesitan para desarrollarse, el resto de esta necesidad debe cubrirse mediante la aportación de potasa, un mineral del que existen amplias reservas en distintos países del mundo, notablemente en Canadá, y respecto al cual no existe una preocupación tan acuciante como en el caso del fosfato.

Aparte de nitrógeno, fósforo, potasio, y otros macronutrientes (magnesio, azufre), las plantas necesitan en menores proporciones otros elementos minerales, de micronutrientes (p.ej., hierro), que en el futuro pueden convertirse en limitantes de la producción y cuyo acopio puede presentar problemas.

Medio ambiente y cambio climático

La práctica agrícola ha sido contraria al medio ambiente desde su implantación y, de hecho, tanto más contraria al medio ambiente cuanto más primitiva. No se van a resolver los problemas del futuro recurriendo, como postulan algunos, a las técnicas del pasado, técnicas que fueron responsables hasta de la desaparición de más de una cultura. Buena parte del debate actual sobre el impacto ambiental de la producción de alimentos está desenfocado por el errado empeño de referir los impactos a la hectárea de suelo laborable, cuando en realidad debe referirse a la tonelada de alimento producida, como se hace, por ejemplo, con el acero al consignar la energía o el agua consumidas para producirla.

El impacto ambiental causado por la producción de una tonelada de trigo es tanto menor cuanto más eficiente es el sistema productivo, cuanto mejor se aprovechen los insumos necesarios: si abonamos por debajo del nivel óptimo, seguramente necesitemos más abono por tonelada de grano, y una variedad moderna de trigo necesitará menos suelo, menos energía y menos productos químicos para producir una tonelada de grano que una de hace 30 años. Una mayor eficiencia de la producción evitará tener que invadir suelo virgen para aumentar el tonelaje total producido. La agricultura moderna es más compatible con el medio ambiente que la tradicional, pero todavía queda mucho por andar para hacerla más limpia.

A las constricciones medioambientales que las veleidades del clima imponen en la actualidad a la producción de alimentos vienen a sumarse nuevas demandas derivadas del proceso de cambio climático en que estamos inmersos. Según los modelos de cambio climático, se espera un cierto incremento de las temperaturas entre el momento actual y el año 2050, incremento que puede cambiar la geografía agrícola actual, al tener como consecuencia una redistribución de las sequías y las lluvias, de la frecuencia e intensidad de los acontecimientos meteorológicos de dimensión catastrófica y, en fin de las regiones favorables y desfavorables para la agricultura.

La elevación del nivel del mar amenaza con inundar suelos óptimos para el cultivo, y la aumentada fusión de los hielos, con cambiar drásticamente la hidrología de los regadíos actuales. En la ruleta del cambio habrá ganadores y perdedores, y unos y otros tendrán que adaptarse a las nuevas circunstancias, especialmente en lo que se refiere a la mejora genética para adaptar las variedades cultivadas al nuevo entorno.

La planta cultivada

De la planta cultivada nos viene el alimento, lo que significa que en ella deben anudarse todos los avances técnicos dirigidos a aumentar la producción agrícola global. Más adelante nos referiremos a las distintas combinaciones o alternativas agrícolas en las que pueden organizarse dichos avances, aquí nos referiremos brevemente a la planta cultivada. Ya vimos que los incrementos de producción en la revolución verde se basaron en la mejora del índice de cosecha, el manejo de la resistencia a plagas y enfermedades o el acortamiento del ciclo vital. A la vuelta del siglo, los avances técnicos que caracterizaron a la citada revolución flaquearon en su capacidad de aumentar los rendimientos, por lo que en la actualidad es imperativo adoptar otras estrategias para mejorarlos.

Los rendimientos récord de las distintas cosechas son difíciles de superar, pero existe todavía un amplio margen para acercar los rendimientos medios a

dichas marcas. Los rendimientos medios en la imperfecta realidad de las explotaciones actuales son más bajos que los que se obtienen en los campos experimentales, donde supuestamente se aplica el estado del arte, y éstos están a su vez muy por debajo de los récords, tanto por causas que sería posible solucionar o paliar mediante innovaciones, tales como la resistencia o tolerancia a los distintos estreses bióticos y abióticos, como causas frente a las cuales será difícil encontrar soluciones.

La mera difusión generalizada del estado del arte acercaría significativamente los rendimientos medios a los experimentales, mientras que en el acercamiento de los rendimientos experimentales a los rendimientos récord deberán desempeñar un papel destacado tanto la mejora genética tradicional como las innovaciones aportadas por la genómica y ingeniería genética.

Las plantas transgénicas constituyen una vía segura y eficaz para solucionar los problemas que se plantean entre la planta cultivada y su entorno. Las que se han ido introduciendo en los últimos 15 años, cuya seguridad está ampliamente contrastada, han alcanzado ya una extensión global de 140 millones de hectáreas, casi la mitad de éstas en países en desarrollo, de la mano de pequeños agricultores. Se trata de una nueva tecnología cuyo potencial para mejorar aspectos concretos de la planta cultivada están ya fuera de duda y únicamente en Europa están sujetas a un rechazo de raíz ideológica, no basado en la evidencia científica. Sería insensato vetar el uso de una herramienta tan eficaz que puede contribuir a responder a un reto tan formidable como alimentar a la humanidad en el futuro.

Sostenible, un término ambiguo

La ausencia de los términos sostenible/sostenibilidad en el Diccionario de la Real Academia Española era insostenible, dado el protagonismo que habían alcanzado en el discurso cotidiano, siendo raro el día que no formaran parte de títulos de nuevos libros e informes o de titulares de periódicos.

Cuando por fin se decidió incluirlos en sus páginas, se ha hecho de un modo tan contundente que es incompatible con el uso que venía haciéndose de ellos: «sostenible. Dicho de un proceso: Que puede mantenerse por sí mismo, p.ej. un desarrollo económico sin ayuda exterior ni merma de los recursos existentes.» y «sostenibilidad. Calidad de sostenible.»

Según esta definición, ningún proceso del mundo real, incluido el de producción de alimentos, sería sostenible. Por su esencia misma, una explotación agraria jamás cumpliría el citado criterio, ya que debe exportar cantidades considerables de un producto cuya generación requiere cantidades igualmente notables de insumos materiales, tales como agua, nutrientes, productos fitosanitarios y maquinaria, así como energía, ninguno de los cuales pueden generarse plenamente en la explotación, por lo que deben ser necesariamente importados a ésta.

Sustainable, la palabra equivalente inglesa se define de un modo más sensato y acorde con su uso universal, como dicha de un proceso que transcurre con el mínimo impacto posible sobre el medio ambiente. En general, todo proceso de desarrollo comporta una cierta degradación del medio, de modo que cuando se habla de desarrollo o de agricultura sostenibles sólo podemos aludir a procesos que se pretenden realizar con una degradación ambiental y un consumo de recursos que sean los mínimos posibles. Es esta definición más realista la que usaremos en

esta conferencia. En suma, lo sostenible representa el mal menor, que es a lo más que podemos aspirar los humanos.

Como ya se ha señalado, hay pocas oportunidades para poner nuevos suelos en cultivo, por lo que es imperativo producir más por hectárea para alimentar a una población creciente, existe falta de equidad en la distribución de alimentos, por lo que habría que priorizar el desarrollo agrícola en las regiones más deficitarias, y el proceso productivo debe hacerse lo más sostenible que sea posible, con especial referencia al uso del agua y la energía, a la emisión de gases con efecto invernadero y a la contaminación ambiental. Reiteremos que la llave para minimizar el impacto ambiental por tonelada de alimento es la eficiencia, dado que las aportaciones de insumos por debajo de los niveles óptimos conducen inexorablemente a un mayor gasto para una misma cantidad de alimento producida. De aquí que se postule una "intensificación sostenible" como respuesta a estos retos. A continuación examinaremos los aspectos científicos y técnicos de dicha respuesta.

Clima y rendimientos

Desde un punto de vista científico-técnico, la dificultad de conjeturar cuáles puedan ser los incrementos de los rendimientos de las cosechas hacia el 2050 se agrava por el hecho de que el clima está cambiando. Si se asume un escenario concreto, el resultante del curso de desarrollo designado A1B (*Special Report on Emissions Scenarios*. Nakicenovic & Stewart, 2000, Cambridge University Press), la concentración de dióxido de carbono podría aumentar de 370 a 550 partes por millón, la de ozono alcanzaría las 60 partes por mil millones y la temperatura subiría en casi 2 °C.

Estos cambios tendrían efectos múltiples y a veces contrapuestos sobre los rendimientos. Así por ejemplo, el aumento de la concentración de anhídrido carbónico aumentaría la eficiencia de la fotosíntesis y el rendimiento de algunas cosechas (técnicamente, tipo C3), tales como trigo, arroz, soja, girasol, colza, patata, remolacha y judía, mientras que no afectaría a otras (tipo C4) como maíz, caña de azúcar y sorgo. En uno y otro caso, la elevación del anhídrido carbónico disminuiría el consumo de agua, pero la elevación de la temperatura tendría el efecto contrario. La concentración de ozono, que puede tener efectos adversos sobre los rendimientos a partir de las 20 partes por mil millones, alcanza en la actualidad medias veraniegas de hasta 50 partes por mil millones, y el aumento predicho para el año 2050 se estima que produciría descensos de los rendimientos de entre el 4 y el 12 por ciento, según la especie cultivada.

Estos cambios ambientales medios esconden unos cambios drásticos en las distribuciones geográficas de las temperaturas y de la pluviosidad, lo que hace aún más difícil la integración de estos datos en modelos predictivos que puedan dibujarnos el mapa productivo en el horizonte del año 2050. Sin embargo, los datos climáticos proyectados sí permiten marcar el camino a seguir en la obtención de nuevas variedades cultivadas, sea mediante la mejora genética convencional o a través de la moderna ingeniería genética.

Mejora genética vegetal

Al inicio de esta charla nos hemos referido a los incrementos de la producción de alimentos en el último medio siglo. Así por ejemplo, estudios a escala

global de las producciones de las cosechas básicas, trigo, arroz y maíz, muestran como se han ido incrementado sus rendimientos de un modo casi lineal, a tasas anuales de hasta 33 kg por hectárea. Estos incrementos han dependido del desarrollo de nuevas variedades que responden bien al abono nitrogenado y de la mejora de la protección de los cultivos mediante productos fitosanitarios adecuados.

Los incrementos de producción obtenidos al optimizar la eficiencia del uso del abono nitrogenado o al controlar plagas, enfermedades o malezas, tienen límites concretos y, una vez obtenidos, no cabe llevarlos más allá. Por esta razón, los incrementos obtenidos en el pasado no pueden necesariamente servirnos de guía para los que habremos de obtener en el futuro si queremos mantener e incluso aumentar el alimento disponible per cápita. Sin embargo, para muchas cosechas existe evidencia de que se está produciendo un estancamiento en los incrementos de rendimiento.

Para aumentar el rendimiento, los mejoradores deben operar sobre distintos aspectos funcionales de la planta: la captura de energía solar por parte de las partes activas en la fotosíntesis, la eficiencia del uso de la radiación y el desvío preferente de la materia fotosintetizada hacia las partes comestibles de la planta. Recuerden, como ejemplo de esto último, que en los trigos semienanos de la Revolución Verde, una mayor proporción de la biomasa producida acaba en el grano en comparación con los que los precedieron: su índice de cosecha es mayor.

En comparación con las variedades actuales, el incremento del rendimiento de las futuras variedades vendrá probablemente de un aumento de la capacidad de captura de energía solar mediante el retraso genético de la senescencia (aumento del periodo de captura de luz). Esto sería especialmente relevante en relación con el calentamiento global, ya que un tiempo más cálido tendería a acortar el periodo de maduración de los granos, con pérdida de rendimiento, lo que se evitaría con plantas de senescencia más tardía.

Un amplio horizonte para mejorar los rendimientos es el representado por la mejora genética de la resistencia o tolerancia a factores adversos, tanto bióticos como abióticos, que causan cuantiosas pérdidas a las cosechas. Nos referimos a la resistencia a enfermedades y plagas, a temperaturas extremas, a la acidez o la salinidad del suelo y, de modo prominente, a la sequía. La resistencia a enfermedades causadas por microorganismos es una característica altamente relevante en un momento en el que se están prohibiendo por razones ambientales muchos de los productos fitosanitarios de mayor utilidad. Aunque la mejora genética convencional ha hecho y seguirá haciendo contribuciones notables a la resistencia o tolerancia de las plantas a factores adversos, es la ingeniería genética la que en el futuro tendrá mayor protagonismo. En el siguiente apartado nos referiremos específicamente a este asunto.

Así como las principales cosechas han sido objeto de intensos programas de mejora genética, hay muchas especies cultivadas, poco importantes a escala global, pero decisivas en regiones concretas, a las que no se les ha prestado tanta atención y para las que existe un amplio margen para la mejora. Así por ejemplo, la yuca es el alimento básico de millones de personas en zonas tropicales y subtropicales que, sin embargo, apenas ha sido sometida a un proceso de mejora. Algo parecido ocurre con la quinoa, una planta de origen suramericano, que podría aportar más a la alimentación en ciertas regiones y que se empieza tímidamente a tener en cuenta.

Biotecnología molecular. Plantas transgénicas.

El término biotecnología alude a cualquier tecnología que tenga un componente biológico, sea un organismo completo, como una bacteria, una levadura o un organismo superior, sea una parte de un organismo, tal que una enzima como la que está presente en el cuajo. Esta definición engloba procesos milenarios, desde la producción de vino, cerveza o queso, hasta la propia producción agrícola. En las últimas décadas ha irrumpido una nueva forma de biotecnología en la que los elementos biológicos son los genes y las moléculas, principalmente el ADN y las proteínas. El potencial utilitario de la biotecnología molecular ha acabado alcanzando de lleno a la producción agroalimentaria a través de la posibilidad de modificar microorganismos y plantas mediante técnicas moleculares como el aislamiento y caracterización de genes y la transgénesis. Estas técnicas han sido, antes que nada, poderosas herramientas de conocimiento, y más tarde, fundamento de aplicaciones de interés agronómico.

Una planta transgénica es aquélla cuyo genoma, que puede contener en torno a 30.000 genes, ha sido modificado mediante ingeniería genética, por adición de uno o varios genes o por alteración de la función o por inutilización de un gen propio. El propósito de esta operación es corregir de una forma apropiada los caracteres agronómicos de una variedad cultivada. El gen añadido o alterado se transmitirá a la descendencia como uno más del genoma. La nueva tecnología añade una importante dimensión a la mejora vegetal tradicional, pero no viene a sustituirla, de tal modo que si se hace ingeniería genética con una mala variedad se obtendrá una mala variedad y si se practica con una buena variedad se conseguirá una buena variedad, mejorada en algún aspecto relevante, como pueda ser la resistencia a una nueva cepa patógena o a algún factor adverso del suelo o del clima. Una variedad transgénica es indistinguible de la no transgénica de partida excepto por la característica añadida. Nadie es capaz de distinguir en el campo un maíz transgénico resistente al taladro salvo cuando aparece la plaga.

Según el *Internacional Service for the Acquisition of Agri-Biotec (ISAAA)*, en su "Informe Anual sobre la situación mundial de la comercialización de cultivos genéticamente modificados en 2010.", la superficie mundial de cultivos transgénicos alcanzó los 148 millones de hectáreas, una extensión equivalente a tres veces la de España. Esta cifra representa un crecimiento de 14 millones de hectáreas con respecto a 2009 (10,5 por ciento), una superficie equivalente al conjunto de Castilla y León, Galicia, Asturias y Cantabria.

En un total de 29 países, que representan casi el 60 por ciento de la población mundial, se sembraron plantas transgénicas en 2010. De los 15,4 millones de agricultores que adoptaron esta tecnología, 14,4 millones (el 93,5 por ciento) eran pequeños agricultores de países en vías de desarrollo, países en los que la implantación ha crecido rápidamente hasta casi igualar en superficie sembrada a la de los desarrollados. En cuanto al tipo de cosecha, los cuatro grandes cultivos transgénicos fueron la soja tolerante a herbicida (73,3 millones de hectáreas), el maíz Bt resistente al taladro (46,8 millones de hectáreas), el algodón resistente a plagas (21 millones de hectáreas) y la colza modificada (7 millones de hectáreas). En los catorce años de implantación generalizada de estos cultivos se han incrementado significativamente las producciones: la soja, 83,5 millones de toneladas, el maíz, 130,5 millones, algodón, 10,5 millones, y colza, 5,5 millones.

La Unión Europea ha sido el único ámbito refractario a la implantación de los cultivos transgénicos: en seis países se cultivaron 91.193 hectáreas de maíz Bt resistente al taladro, y en tres países, la República Checa, Suecia y Alemania, se incorporó tímidamente el cultivo de la patata transgénica Amflora. España ocupa continuadamente la vanguardia europea en esta cosecha, ya que se han cultivado

76.575 hectáreas de maíz Bt resistente al taladro, un 23,8 por ciento del total de maíz sembrado en España y la mayor parte del territorio en que esta plaga es un problema recurrente. Esta es la razón por la que Aragón (31.396 hectáreas) y Cataluña (29.218 hectáreas) son las regiones en las que el cultivo está más extendido. El liderazgo de España a este respecto en la Unión Europea es comprensible porque somos los mayores importadores de grano en dicho ámbito, debido a que nuestra producción animal depende de los piensos en mucha mayor medida que el resto de los países miembro.

El rendimiento récord de una cosecha se obtiene en la hectárea más favorable para el cultivo de la mejor variedad, en el año meteorológico más propicio y según el tratamiento y el manejo más apropiados. En contraste, el rendimiento medio es muy inferior, hasta en un 80 por ciento, debido a que la actividad agrícola se realiza habitualmente en condiciones subóptimas. Algunos factores que determinan el desfase entre el rendimiento máximo potencial, representado por el record, y el rendimiento medio pueden ser más o menos sometidos al control humano, mientras que otros no. Entre los primeros están una serie factores adversos frente a los cuales es posible actuar mediante la modificación genética de la planta, y entre los segundos estarían factores como los climáticos o las características básicas del suelo, de difícil control. La mejora genética tradicional ha venido manipulando las características relacionadas con la tolerancia a factores adversos con mayor o menor éxito, pero, al depender muchas de ellas de uno o pocos genes, la ingeniería genética y la transgénesis pueden ser muy eficaces para realizar las modificaciones necesarias.

Entre los primeros éxitos indudables de la ingeniería genética de plantas hay que mencionar la soja tolerante a herbicida, que ha facilitado la doble cosecha anual y el cultivo sin laboreo; el maíz resistente al taladro, que blindo a dicha cosecha frente a una plaga devastadora; el algodón resistente a las tres especies de insectos que destruyen la cápsula, y la colza híbrida, que sería imposible de obtener sin esta tecnología y que permite aprovechar el vigor híbrido o heterosis. Tras el probado éxito de estas aplicaciones, existen centenares de otras posibles que ya han salido de los laboratorios y que están más o menos lejos de llegar al mercado, aunque se encuentran ante un injustificado clima de rechazo ideológico. Antes de referirnos a dicho rechazo, lo haremos brevemente a los beneficios ya obtenidos.

Los beneficios adicionales imputables a los cultivos transgénicos han sido recientemente cuantificados por los economistas ingleses Graham Brookes y Peter Barfoot (www.pgeconomics.co.uk). Según este estudio, que abarca desde 1996 hasta 2009, los cultivos transgénicos han logrado unos beneficios adicionales para los agricultores de 64.700 millones de dólares, un 57 por ciento de éstos gracias al incremento de los rendimientos medios y un 43 por ciento debido a la reducción de los costes de producción.

Además de estos beneficios económicos, los transgénicos han propiciado importantes reducciones del impacto medio-ambiental de la producción de alimentos: en el periodo considerado, se redujo el uso de productos fitosanitarios en 393 millones de toneladas, un 8,7 por ciento del consumo total que no fue vertido al medio ambiente. Como esta reducción en el tonelaje ha ido acompañada de la sustitución de los productos en uso por otros más compatibles con el medio ambiente, la reducción del impacto ambiental debido a los fitosanitarios se redujo en realidad en un 17 por ciento. La introducción del maíz Bt resistente al taladro ha supuesto no sólo beneficios para los que lo han cultivado, por disminución de pérdidas y aumento del rendimiento medio, sino que ha producido beneficios aún mayores para los que no lo han adoptado, ya que se han beneficiado de la notable reducción de la plaga sin haber pagado por ello. En cuanto a las emisiones de

anhídrido carbónico a la atmósfera, sólo en 2009, los cultivos transgénicos supusieron una reducción de 17.700 millones de kilogramos, emisión equivalente a la anual de casi 8 millones de automóviles. Si en 2009 no se hubieran cultivado variedades transgénicas, se hubiera necesitado sembrar casi 25 millones de hectáreas adicionales para conseguir la producción obtenida.

Ha transcurrido un cuarto de siglo desde la obtención de la primera planta transgénica sin que se haya producido un solo incidente adverso a la salud humana, mientras que la incidencia de su cultivo sobre el medio ambiente ha sido claramente inferior a la de las cosechas convencionales. No hay razón alguna para el irracional rechazo que sufren por parte de ciertos sectores ecologistas. Rechazo ideológico aparte, las plantas transgénicas reúnen todos los requisitos para ser integradas en cualquiera de las opciones productivas, desde la mal llamada agricultura ecológica hasta la más sofisticada agricultura de precisión.

No sólo genética

Hemos señalado cómo las plantas pueden y deben ser modificadas para mejorar la eficiencia con que utilizan los nutrientes y la capacidad para defenderse de plagas y enfermedades. Pasaremos ahora revista brevemente a algunos aspectos extra-genéticos relacionados con esos dos objetivos.

El suelo laborable en muchas regiones sufre un expolio de nutrientes, al extraerse más de lo que se aporta, practicándose lo que se llama "minería de nutrientes", o se le aportan cantidades subóptimas de fertilizante nitrogenado, lo que supone rendimientos subóptimos y un mayor consumo de fertilizante por tonelada de alimento producida.

Los datos en la Tabla 2 dan una idea aproximada de las grandes diferencias inter-regionales en el abonado. El mayor nivel de aplicación en el Este Asiático se debe a la práctica común de la doble cosecha. En los países en transición, es decir, la antigua Unión Soviética y su entorno, descendieron drásticamente los niveles de aplicación durante el cambio de régimen y ahora empiezan a recuperarse. Los países industrializados han ajustado sus aplicaciones a niveles más próximos al óptimo, después de unos ciertos excesos, y en el África Subsahariana es urgente que se subsane la pobreza que limita su acceso a un mayor nivel de fertilización. En general, de cara al 2050 hay margen para incrementar la fertilización, pero hay que tener en cuenta el extremado coste energético del abono nitrogenado y la necesidad de gestionar con extremo cuidado las reservas limitadas de fosfato, siendo urgente el desarrollo de métodos de reciclado de este nutriente.

Tabla 2. Aplicación anual media de fertilizantes (N+P₂O₅+K₂O)*

Región	Cantidad de fertilizante (kg/ha)
Mundo	92
Este Asiático	195
Países industrializados	118
Sur Asiático	102
Oriente Próximo & África del Norte	71
Iberoamérica	56
Países en Transición	28
África Subsahariana	5

*FAO, 2003

Los productos fitosanitarios (herbicidas, insecticidas y fungicidas) han tenido un papel importante en la consecución de los pasados incrementos de producción y los seguirán teniendo en el futuro. Como en toda lucha biológica, los retos de la protección vegetal son los de combatir nuevas cepas de patógenos y nuevas variantes de las plagas que tal vez plantearán problemas de dificultad creciente debido al cambio climático. Los nuevos productos fitosanitarios deberán ser más compatibles con el medio ambiente: más activos, selectivos y biodegradables.

Agricultura: un nombre con varios apellidos.

A modo de conclusión, puede afirmarse que, para conseguir la seguridad alimentaria hacia la mitad del siglo XXI, la agricultura habrá de ser más intensiva y más compatible con el medio ambiente de lo que es ahora. Conseguir este objetivo requiere desarrollar nuevos modos en todas las facetas y tecnologías de la producción, así como en el comercio y la distribución. La conciencia ambiental ha dado paso a la formulación de programas de actuación que no son muy distintos entre sí, aunque sus promotores propongan nombrarlos mediante la adición de distintos apellidos a la palabra "Agricultura". Así por ejemplo, se usan los términos ecológicos, orgánicos, integrados, sostenibles, de conservación y de precisión, para adjetivar el concepto central.

Difícilmente la agricultura mal llamada ecológica u orgánica puede ser una respuesta al problema global, entre otras razones porque necesita más suelo y le afectan mayores precios que sus alternativas, aparte de que sus principales pretensiones no están respaldadas científicamente. La llamada agricultura integrada no es más que un sistema de certificación inspirado por la iniciativa de la agricultura ecológica, si bien proponiendo una buena práctica fundamentada para una producción intensiva y competitiva. Ya nos hemos referido a la ambigüedad del término "sostenible", que a la hora de la verdad no describe otra cosa que una práctica intensiva que tiene en cuenta lo más posible la conservación del medio ambiente. Más afortunado me parece el apelativo "de conservación", que alude a la necesidad de la conservación del medio productivo y de su entorno.

A la hora de encarnar la necesidad de una intensificación sostenible, me inclino por lo que se denomina una agricultura de precisión, que busca rendimientos óptimos (no necesariamente máximos) mediante un conjunto de tecnologías que combinan sensores, sistemas de información, maquinaria avanzada y gestión informada para tener en cuenta la variabilidad y las incertidumbres inherentes a los sistemas agrícolas. Al poderse ajustar los insumos a las características de cada punto dentro de una parcela, o al animal individual dentro de la explotación, se consigue un mejor uso de los recursos para mantener la calidad del medio y una mejora de la sostenibilidad de la producción de alimentos.

En conclusión, es de esperar que, con un esfuerzo considerable, podamos alimentar a una población humana en continua expansión, provisto que, más allá del aprovechamiento de la lignocelulosa y los subproductos, no desviemos una parte de los recursos a la producción de biocarburantes.

Referencias

¹*Millions Fed. Proven successes in agricultural development.* Coordinado por David J. Spielman y Rajul Pandya-Lorch. International Food Policy Research Institute. Washington D.C. 2009.

²Alimentar a la humanidad. Aciertos del último medio siglo. F. García Olmedo. Revista de Libros, nº 163-164, julio-agosto 2010

³*The state of food insecurity in the world. Addressing food insecurity in protracted crisis.* FAO. Roma, 2010.

⁴*Global Food Crisis.* D. Headey y Sh. Fan. IFPRI. Washington, 2010

⁵*Global food and farming futures.* Extenso documento coordinado por J. Beddington, Consejero Científico Principal del Gobierno Británico. (varias decenas de autores) Phil. Trans. R. Soc. B 365: 2767-3097, 2010

⁶*Reaping the benefits of crop research.* Coordinado por D. Baulcombe (varios autores) Science vol 327. 2010

⁷*Environmental impacts of food production and consumption.* Varios autores. Manchester Business School. 2006.

⁸*The coming famine.* J. Cribb. University of California Press. 2010

⁹*Animal agriculture and global food supply.* Coordinado por J.W. Oltjen. Cast Report Nº 135. 1999.