



# Preguntas y respuestas: fitomejoramiento moderno para la seguridad alimentaria en el futuro

Traducción y adaptación: Pablo Adrián Otero<sup>1</sup>

\*Traducción del artículo publicado originalmente como: Q&A: modern crop breeding for future food security Kai P. Voss-Fels, Andreas Stahl & Lee T. Hickey. BMC Biology volume 17, Article number: 18 (2019).

## Resumen

En todo el mundo los agricultores experimentaron pérdidas significativas en las cosechas debido al intenso calor y la sequía. Estos fenómenos meteorológicos extremos y la necesidad de alimentar a una población que crece rápidamente generan preocupación por la seguridad alimentaria mundial. Si bien el fitomejoramiento produjo variedades de cultivos altamente productivas, la tasa de mejoramiento genético debería duplicarse para satisfacer las demandas futuras proyectadas. En este trabajo discutimos los principios básicos y las características del mejoramiento de cultivos y cómo las tecnologías modernas podrían impulsarlo frente a condiciones de producción cada vez más desafiantes.

### ¿Cuál es la demanda de productos alimenticios de origen vegetal?

Se estima que para 2050 el número actual de 7.600 millones de personas aumentará a 10.000 millones. Junto a este rápido crecimiento de la población, el mundo se ha vuelto cada vez más urbanizado y la proporción entre productores de alimentos y consumidores disminuyó significativamente. Actualmente esta demanda sobre la producción de alimentos está satisfecha por la una actividad agrícola intensificada y más eficiente. Sin embargo, existen serias preocupaciones de que el aumento (en hasta un 70 %) previsto en la demanda de productos de origen vegetal en las próximas tres o cuatro décadas no pueda satisfacerse utilizando las variedades de cultivos y las prácticas agrícolas actuales. Esto representa un desafío sin precedentes para todos los campos relacionados de la investigación agrícola y ambiental.

### ¿Qué cultivos comemos?

Aunque alrededor de 300.000 especies de plantas son comestibles, solo una pequeña fracción se utiliza para la nutrición humana. Se consumen regularmente alrededor de 200 especies, y solo tres de ellas, arroz, maíz y trigo, proporcionan el 60% de la energía en la dieta humana. Además de los cereales, otros cultivos alimentarios importantes incluyen raíces y tubérculos, azúcares, legumbres, nueces, cultivos oleaginosos, hortalizas, frutas, especias y otros como el té y el café. Aunque en los países desarrollados, los cultivos y

cosechas, contribuyen a la seguridad alimentaria a través del comercio mundial, en los países en desarrollo el hambre sigue siendo un grave problema. Muchos cultivos importantes para las dietas locales de los países en desarrollo han recibido poca inversión. Se los conoce como cultivos huérfanos (p. ej., sorgo, mijo africano y mandioca) y con un rápido mejoramiento genético podrían cultivarse más ampliamente para ayudar a diversificar las dietas humanas y mejorar los sistemas agrícolas a través de mejores rotaciones de cultivos.

### ¿Cómo evolucionaron nuestros principales cultivos alimentarios?

El inicio de los cultivos tiene su origen en Media Luna Fértil, una región que hoy abarca parte de los países de Irak, Palestina, Siria, Líbano, Chipre, Jordania, Israel, Egipto, Turquía e Irán. Recientemente surgieron nuevas pruebas de que hace 14.400 años en el suroeste de Asia se producían productos similares al pan [1]. Estos se elaboraban a partir de tubérculos (*Bolboschoenus glaucus*) y semillas de escanda salvaje (*Triticum boeoticum*), uno de los antepasados del trigo actual. Curiosamente, esto sería 4000 años antes de que surgiera la agricultura, lo cual sugiere que la cultura temprana de elaboración del pan puede haber impulsado la domesticación de nuestros primeros cultivos [1]. Durante el asentamiento y el advenimiento de la agricultura, los humanos seleccionaron las plantas más favorables de entre los tipos ancestrales disponibles, y este proceso de coevolución entre las especies de plantas y la humanidad dio como resultado los cultivos actuales. Las semillas de las plantas con mejor rendimiento se conservaban después de la cosecha y se sembraban en la temporada siguiente, lo que condujo a una mejora continua de las características favorables para la nutrición humana y la producción local. Esta primera forma de selección de reproducción, sin ningún cruce forzado, representó la principal forma de mejoramiento de plantas durante varios miles de años, cambiando las características de las plantas para aumentar su utilidad [2]. Los llamados rasgos de domesticación eran el requisito previo para un cultivo exitoso, un buen ejemplo fue la eliminación del mecanismo de dispersión de semillas en cereales como el trigo y la cebada, conocido como desgranado

<sup>1</sup> Pablo Adrián Otero: Biólogo (UBA). Docente CBC (UBA) y ISFD N° 186. Editor Revista Boletín Biológica. pabloadrianotero@gmail.com

de semillas. Si bien el desmenuzamiento de semillas en la maduración es esencial para que las hierbas silvestres se dispersen y reproduzcan, esta característica no es deseable para la agricultura. Por lo tanto, en el proceso de domesticación se seleccionaron genotipos de plantas que retenían sus semillas y mostraban menores pérdidas de rendimiento. Debido a que solo unas pocas plantas portaban las mutaciones deseables, la fuerte presión de selección actuó como un cuello de botella genético en la diversidad disponible en nuestros cultivos modernos (Figura 1a). Teniendo en cuenta la extremadamente larga evolución de los cultivos, el aporte del fitomejoramiento moderno solo se ha practicado después de la formulación de las Leyes de la herencia de Mendel en 1865. Los primeros estudios genéticos de Mendel sobre los guisantes y sus teorías resultantes sobre la herencia y la segregación de rasgos allanaron el camino para el cruce dirigido entre genotipos parentales, una práctica que sustenta el mejoramiento de cultivos moderno. Sin embargo, para poder hacer frente al aumento en la demanda de productos de origen vegetal, las tasas de mejoramiento genético deberán duplicarse para mediados de este siglo.

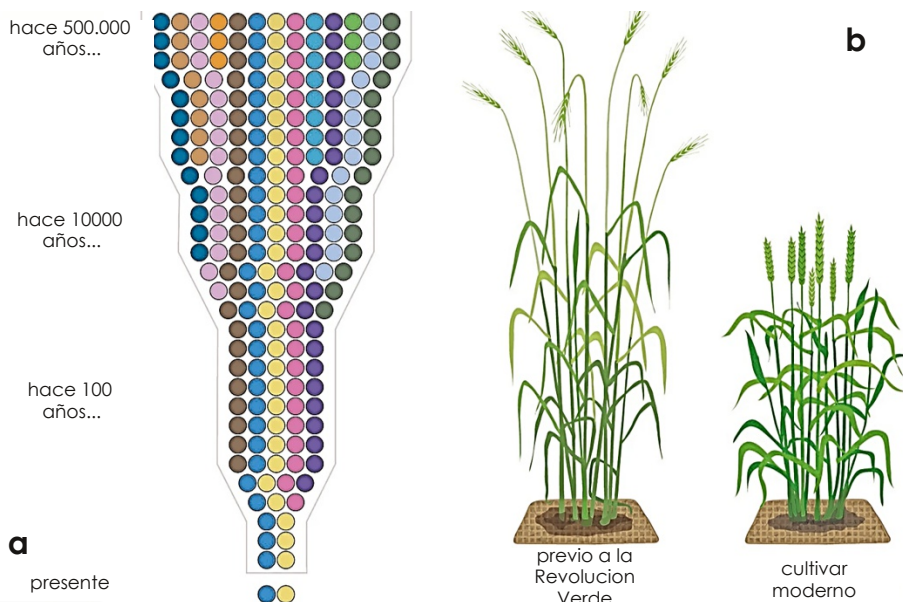
### ¿Por qué la urgencia?

Las nuevas tecnologías y los avances en la ciencia ofrecen nuevas oportunidades para mejorar aún más la eficiencia de la agricultura al mismo tiempo que reducen su huella ambiental y enriquecen las dietas humanas con alimentos más nutritivos. A partir de la Revolución Verde, se produjeron aumentos constantes en la productividad de los cultivos, pero parece que la mejoría en los rendimientos está comenzando a estabilizarse. La tasa actual de mejora del rendimiento anual oscila entre el 0,8 y el 1,2 %, pero debería duplicarse para satisfacer la futura demanda de productos de origen vegetal [3]. Teniendo en cuenta el comportamiento actual del consumidor mundial, si no hay nuevos enfoques que ayuden a impulsar la productividad de los cultivos básicos a través de la mejora genética, la seguridad alimentaria mundial se

verá gravemente comprometida en las próximas dos o tres décadas. Existen dos vías principales por las cuales se puede mejorar la productividad: 1) el uso de variedades genéticamente superiores, o 2) mediante la implementación de mejores prácticas de manejo. Idealmente, ambos se deberían abordar en paralelo para proporcionar un cambio radical en la productividad, similar a lo que se logró durante la Revolución Verde (ver más abajo). Uno de los principales cuellos de botella del fitomejoramiento es el tiempo que lleva desarrollar una variedad de cultivo mejorada. Tradicionalmente, puede tomar una o dos décadas debido a los muchos pasos de cruce, selección y prueba requeridos. Por lo tanto, los fitomejoradores e investigadores de todo el mundo están desarrollando nuevas tecnologías y enfoques para ayudar a acelerar la eficiencia del mejoramiento de cultivos. En los campos, la utilización de prácticas de gestión deficientes o subóptimas da como resultado una "brecha" de rendimiento ya que no se aprovecha el rendimiento potencial de los cultivos. Esta brecha, que existe incluso en los países desarrollados, es más grande en los países en desarrollo donde la maquinaria, suministros y asesoramiento no están disponibles para todos. Achicar esta brecha de rendimiento es un objetivo desafiante, pero prioritario, para mejorar la productividad y la seguridad alimentaria mundial.

### ¿Qué determina el rendimiento de los cultivos?

Uno de los rasgos más importantes que los fitomejoradores pretenden mejorar es el rendimiento. Dependiendo de la especie, esto puede ser rendimiento de grano, biomasa total o cantidad total de azúcar por área cosechada. El rendimiento representa una característica altamente cuantitativa, lo que significa que está determinada por numerosos factores: muchos genes subyacentes interactuando aunque cada uno con una influencia pequeña (G), las condiciones ambientales en las que se cultivan las plantas (E) y las prácticas de manejo aplicadas (M). En la mayoría de las circunstancias, existe una fuerte



Figuras 1: a: Desarrollo de cultivos a lo largo del tiempo, incluida la pérdida de la diversidad a través de los cuellos de botella genéticos de la domesticación, la selección de variedades locales y el fitomejoramiento moderno. b: ejemplo de un alto variedad local de trigo cultivada antes de la Revolución Verde y una variedad moderna de alto rendimiento seleccionada para reducir la altura de la planta.

interacción entre G, E y M, lo que da como resultado un alto grado de complejidad a nivel de expresión de los rasgos [4]. A su vez cada uno de esos factores posee varios componentes. En cereales, por ejemplo, el componente G para el rendimiento de grano puede entenderse como el resultado de varios componentes determinados genéticamente que afectan conjuntamente. Para un cultivo como el trigo, los componentes importantes incluyen el número y el tamaño de los granos por mazorca y el número de macollos que producen mazorcas por planta. Cada uno de esos componentes principales del rendimiento se desarrolla en varios componentes fisiológicos de nivel inferior, por ejemplo, la cantidad de espiguillas por espiga y la cantidad de granos que se producen por espiguilla. La constitución genética de una variedad determina directamente su potencial de rendimiento, por ejemplo al considerar las resistencias genéticas contra las enfermedades causadas por patógenos fúngicos o bacterianos. Los principales efectos ambientales que son relevantes para el fitomejoramiento son la cantidad de agua disponible para la planta (principalmente determinada por la frecuencia y distribución de las precipitaciones), la composición del suelo, la intensidad de la radiación y la temperatura. Las interacciones de G y E son más fuertes cuando el orden en productividad de las diferentes variedades cambia según las condiciones ambientales en las que se cultivaron. Por ejemplo, en un lugar de suelos arenosos con poca capacidad de almacenamiento de agua y lluvias frecuentes durante la temporada de crecimiento una variedad de maíz que produce un sistema de raíces muy poco profundo (asigna pocos recursos a las partes subterráneas), podría rendir más que una variedad que produce un sistema de raíces grandes. Sin embargo, la situación cambia por completo si ambas variedades se cultivan en un sitio de suelo profundos con una alta capacidad de almacenamiento de agua y precipitaciones extremadamente bajas durante la temporada de crecimiento. Especialmente los rasgos relacionados con la fenología, como el tiempo de floración, también pueden desempeñar un papel clave en la determinación del rendimiento de las plantas en un entorno determinado.

### ¿Cómo funciona el fitomejoramiento?

El reino vegetal es extremadamente complejo y la estrategia óptima de fitomejoramiento depende en gran medida de la especie. Sin embargo, cualquier programa de mejoramiento se puede clasificar en términos generales en tres procesos principales: 1) la creación de una nueva variante genética, 2) la selección de candidatos en función de los objetivos definidos y 3) la prueba, propagación y liberación de las variedades mejoradas. La forma convencional de crear una nueva variante genética es hacer cruces dirigidos entre individuos seleccionados para crear una progenie que se distinga por el rasgo de interés. Después de eso, la tarea principal es identificar los individuos genéticamente superiores dentro de las poblaciones (que contienen miles a decenas de miles de

genotipos). Por lo general, esto implica varios años y diferentes lugares de ensayos de campo lo que permite estimar el potencial genético de un genotipo en una variedad de condiciones de cultivo con la mayor precisión posible. Es importante tener en cuenta que las especies de cultivos más importantes se pueden propagar como líneas puras o clones, lo que permite probar el mismo genotipo en diferentes condiciones. Para las especies más importantes, se han desarrollado estrategias de selección modernas que incorporan información genómica basada en tecnologías de secuenciación de ADN (ver más abajo). En la etapa final, se registran las variedades más prometedoras (por lo general, solo una o dos) en un departamento legal de pruebas de variedades el cual lleva a cabo pruebas de evaluación que requieren varios años y en diferentes ubicaciones para determinar si la variedad tiene características claramente mejoradas que justifiquen su reconocimiento oficial. Una vez registrada queda disponible para el resto de los agricultores. Dependiendo del cultivo, este proceso puede demorar de una a dos décadas, lo que hace que los programas de mejoramiento sean muy rígidos y complejos.

### ¿Cómo determina el modo de reproducción la estrategia de producción?

Las principales formas principales de propagación sexual relevantes para la mayoría de las especies de cultivos son el cruce y la autopolinización (consanguinidad) [4]. Las especies cruzadas se reproducen sexualmente a través de la fecundación de gametos de dos plantas diferentes, mientras que en la autopolinización (consanguinidad) ambos gametos se originan en la misma planta. Muchos cereales importantes, como el trigo y la cebada, producen flores hermafroditas. Estas flores tienen mecanismos biológicos que minimizan la autopolinización. Las estrategias clásicas de mejoramiento clásicas que se han utilizado para estos cultivos se denominan enfoques de mejoramiento de pedigrí, que generalmente dan como resultado variedades de línea totalmente homocigóticas. Aquí, los fitomejoradores hacen cruces quitando manualmente las anteras de la planta *femenina* y luego le aplican polen de una planta *macho* diferente. De esta forma, se pueden realizar cruces dirigidos incluso para especies que se autopolinizan. Dependiendo del tamaño del programa de mejoramiento, el número total de cruces dirigidos puede oscilar entre menos de 100 y unos pocos miles. La descendencia se separa y se seleccionan las mejores plantas durante múltiples rondas de endogamia recurrente y pruebas de campo. Un alto nivel de homocigosis es fundamental para garantizar que la variedad cultivada no exponga rasgos genéticos recesivos que tengan efectos perjudiciales en características agrónomicamente importantes. En el cruzamiento de especies, los mejoradores tienen como objetivo mejorar una población de plantas de la cual los mejores individuos se seleccionan y cruzan recurrentemente, lo que lo hace conceptualmente diferente del mejoramiento en línea para



consanguíneos, que da como resultado una sola línea genéticamente mejorada homocigota. La tasa de éxito de los programas de mejoramiento depende de si los rasgos deseados se expresan antes o después de la floración, lo que determina con que eficiencia se pueden eliminar los individuos desfavorables para garantizar que no transmitan material genético a la siguiente generación. Una de las estrategias más populares para cruzar especies de cultivos es la hibridación. En este caso, se cruzan dos líneas endogámicas genéticamente distantes para generar híbridos F1 completamente uniformes que muestran un rendimiento significativamente mayor que los parentales. Este enfoque aprovecha el fenómeno conocido como heterosis (o vigor híbrido) que, aunque se han desarrollado diferentes teorías que lo explican, su base biológica sigue siendo difícil conocer. En el maíz, se han logrado aumentos de rendimiento espectaculares desde la implementación del mejoramiento híbrido a principios del siglo XX. En arroz hay híbridos que producen hasta un 30% más de rendimiento que las líneas endogámicas comunes. Sin embargo, un gran desafío es garantizar en la práctica el cruzamiento dirigido y la producción eficiente de semillas híbridas. Los fitomejoradores suelen aplicar mecanismos de esterilidad genética para asegurarse de que el genotipo A solo se polinice con polen del genotipo B sin contaminación de otras fuentes (por ejemplo, otros genotipos o autopolinización). Esto restringe la disponibilidad de variedades híbridas para algunos cultivos, como el trigo y la cebada. Para los mejoradores comerciales, las variedades híbridas son muy atractivas porque los agricultores no pueden volver a sembrar las semillas que cosecharon, sino que tienen que comprar nuevas semillas en cada temporada de cultivo. Esto se debe a que las semillas cosechadas de los híbridos F1 (es decir, la generación F2) tendrá graves disminuciones en el rendimiento (debido a la segregación 1:2:1).

### ¿Quién mejora las variedades de cultivos?

Los programas de mejoramiento de cultivos se llevan a cabo tanto en el sector público como en el privado. Los programas públicos de fitomejoramiento suelen producir germoplasma, que está disponible gratuitamente para los productores, investigadores y otros fitomejoradores. Por otra parte, las semillas producidas por programas privados de fitomejoramiento se rigen por normas más estrictas y deben comprarse a una empresa o distribuidor de semillas. Existen varias instituciones internacionales que ejecutan programas públicos de mejoramiento de cultivos. CGIAR, por ejemplo, representa una asociación global que consta de quince organizaciones de investigación agrícola cuya agenda conjunta tiene como objetivo mejorar la seguridad alimentaria mundial, reducir la pobreza, mejorar la salud y la nutrición humanas. Sus inversiones conjuntas en la mejora de cultivos ascienden a miles de millones de dólares estadounidenses. Uno de los socios es el CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo) con sede en México, que lidera los

programas de mejoramiento de trigo y maíz. El CIMMYT ha desarrollado numerosas variedades cultivadas en millones de hectáreas en todo el mundo. Otra importante organización pública de mejoramiento de cultivos, que está muy involucrada en la mejora de las variedades de arroz, es el Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI), con sede en Filipinas, que representa la organización de investigación agrícola sin fines de lucro más grande de Asia. Los programas públicos de mejoramiento de cultivos también son importantes para el premejoramiento, que une la investigación de descubrimiento y el mejoramiento de cultivos aplicado. Por otro lado, está el sector privado de fitomejoramiento, que está dominado por grandes empresas multinacionales como Bayer, Syngenta y Corteva. Estas empresas producen y comercializan semillas de variedades altamente productivas que pueden ser compradas por los agricultores. En Europa también existen pequeñas y medianas empresas de fitomejoramiento. Mientras que los grandes actores utilizan sus propias instalaciones y recursos, las empresas más pequeñas suelen depender de colaboración con instituciones públicas y/u otras empresas pequeñas.

### ¿Qué fue la revolución verde?

La Revolución Verde describe el tremendo aumento del rendimiento de granos asociado con la mejora genética y la aplicación de fertilizantes minerales y productos químicos protectores de los cultivos. Si bien los seres humanos tardaron casi 10 000 años en producir mil millones de toneladas de grano en todo el mundo, la Revolución Verde duplicó esa cantidad en solo 40 años entre 1960 y 2000. Un impulsor clave de la Revolución Verde fue la introducción en el trigo de los llamados genes de semienanismo (genes Rht). Las variedades que portaban los genes Rht eran más bajas (Figura 1) y mejores en la utilización del nitrógeno aplicado, en comparación con las variedades más altas, que tienden a quedar planas en el suelo (encamado) como resultado de la fertilización con alto contenido de nitrógeno y/o el aumento de la carga de grano; así las variedades portadoras de Rht contribuyen a una mejor eficiencia en el uso del nitrógeno, evitando que se desperdicie y contamine ecosistemas vecinos [5]. Hoy en día, los genes de enanismo están muy extendidos en las variedades modernas de cereales y se han caracterizado una variedad de genes Rht diferentes. Los primeros genes Rht desplegados, incluidos Rht-B1b (anteriormente Rht1) y Rht-D1b 8b (anteriormente Rht2) se originaron a partir de la variedad de trigo japonesa 'Norin 10', que es descendiente de la variedad nativa semienana japonesa 'Daruma' y una variedad americana de alto rendimiento. Norin 10 fue fundamental para la creación de varias variedades importantes de trigo de la Revolución Verde. También para cebada y maíz se descubrieron los genes ortólogos *sln1* y *dwarf8*. Estos genes generalmente codifican factores de transcripción que se dirigen a componentes de la vía del ácido de giberelina (GA), que regulan la respuesta

del GA. GA es un ácido diterpenoide tetracíclico que es importante para el inicio de la floración y el desarrollo del polen, así como un determinante clave de la elongación celular y, por lo tanto, la altura de la planta. En consecuencia, las plantas de trigo y arroz que portan genes de semenanismo son más cortas y obtienen un índice de cosecha más alto, definido como la proporción de rendimiento de grano sobre la biomasa total de la planta. El advenimiento de variedades más pequeñas y estables con un índice de cosecha más alto fue acompañado por varios efectos positivos, incluida una mejor asignación de nutrientes y asimilados a los granos y una reducción de la biomasa vegetal residual [5].

### ¿Cómo afecta el cambio climático a la producción de cultivos?

El cambio climático es un término genérico que describe el cambio reciente y pronosticado de múltiples parámetros ambientales. La mayoría de ellos afectan el crecimiento de las plantas, incluidos la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, la temperatura y la frecuencia y cantidad de precipitaciones. Si bien una concentración más alta de CO<sub>2</sub> generalmente aumenta la fotosíntesis, la falta de lluvia en las etapas críticas de desarrollo disminuye el rendimiento de los cultivos. Las sequías récord del Milenio en 1996/97, 2001-2003, 2006 y 2018 en Australia o 2003, 2010, 2015 y 2018 en Europa son ejemplos de los efectos extremos de la sequía en la producción de cultivos. Por otro lado, al igual que la concentración de CO<sub>2</sub>, el aumento de la temperatura puede acelerar el crecimiento de las plantas debido a una mayor actividad enzimática. Más allá de la temperatura óptima, que es muy específica para el cultivo y la variedad, las temperaturas más altas provocan estrés por calor, que se considera una de las principales causas de la pérdida de rendimiento del trigo en los países en desarrollo. Se ha estimado que cada aumento de un grado centígrado conduce a una disminución de la producción mundial de trigo del 6% [6]. El aumento de la temperatura también puede afectar indirectamente el rendimiento de debido a una mayor aparición de plagas y enfermedades. Claramente, la magnitud del impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos dependerá de la región geográfica. Por ejemplo, se ha pronosticado que un aumento en la temperatura de cuatro grados centígrados en las regiones tropicales reducirá los rendimientos de trigo en un 20-30%, mientras que en las regiones templadas probablemente no causará pérdidas de rendimiento dramáticas [7]. Es muy difícil atribuir fenómenos meteorológicos específicos al cambio climático, ya que los efectos se pueden medir principalmente como tendencias a largo plazo. Además, los efectos ambientales sobre el rendimiento de los cultivos pueden variar mucho de un año a otro. Hay argumentos de que con el aumento de las temperaturas, la atmósfera puede contener más agua. Sin embargo, las diferentes tasas de evaporación espaciotemporal que no están sincronizadas con una mayor capacidad de retención de agua atmosférica

impulsan cambios en la precipitación global. Por lo tanto, se pronostica que los eventos de sequía serán más frecuentes y severos en muchas regiones. Se espera que el fitomejoramiento desempeñe un papel central para enfrentar el desafío de adaptar los cultivos a las condiciones de crecimiento futuras.

### ¿Cuál es la era de la genómica en el mejoramiento de cultivos?

Durante los últimos 10000 años, los cultivos se mejoraron principalmente a través de la selección de individuos superiores que mostraron características favorables para la nutrición y producción humana, pero sin involucrar cruza forzosas. La formulación de las leyes mendelianas anunció el comienzo del fitomejoramiento moderno, que ha cambiado enormemente en los últimos 150 años. La introducción y el desarrollo continuo de marcos teóricos, incluidos los principios de la genética cuantitativa y los rápidos avances en el campo de la biotecnología y la genómica modernas, han convertido al fitomejoramiento en una disciplina muy compleja [2]. Los programas de fitomejoramiento modernos involucran equipos altamente interdisciplinarios de expertos que combinan conjuntos de habilidades muy amplios y diferentes, como genética, estadística, agronomía, bioquímica, fisiología, bioinformática, biología molecular y economía. Los avances en las tecnologías de secuenciación del ADN han revolucionado el mejoramiento y la investigación de cultivos, abriendo la *era genómica*. Hoy en día, las secuencias de ADN del genoma completo están disponibles para las especies de cultivos más importantes y se han desarrollado plataformas de genotipado muy rentables para las plantas con *huellas dactilares de ADN*. El marcador de ADN elegido suele ser el polimorfismo de un solo nucleótido (SNP) porque son ubicuos en los genomas de los cultivos y son muy fáciles y rentables de puntuar. Por lo tanto, se ha convertido en una práctica estándar en el mejoramiento de cultivos modernos el genotipado de grandes poblaciones de plantas con miles a decenas de miles de marcadores de manera rutinaria. Incluso los datos de resecuenciación del genoma completo están cada vez más disponibles, lo que proporciona información sin precedentes sobre la diversidad estructural en los genomas de los cultivos [8]. Usando los últimos enfoques de genética estadística, se utilizan enorme cantidad de datos de genotipo para varios propósitos. Por ejemplo, una estrategia de selección moderna muy prometedora que incorpora información de marcadores de ADN de todo el genoma es la *selección genómica* en la que se implementan modelos estadísticos o algoritmos de aprendizaje automático para vincular los polimorfismos genómicos con la variación fenotípica. El fundamento teórico subyacente del enfoque es que los genes (o loci de rasgos cuantitativos (QTL) más genéricos) que afectan el rasgo de interés (por ejemplo, el rendimiento de grano) están etiquetados por marcadores de ADN, lo que permite derivar aproximaciones de efectos para cada uno de esos

QTL en el rasgo deseado. Se utiliza una ecuación de predicción para calcular un valor genético estimado genómico para cada genotipo, en función de los perfiles de marcadores del genoma completo, sin realmente probar esos genotipos en ensayos de campo. Esto permite a los fitomejoradores predecir el rendimiento del genotipo tan pronto como se puedan generar perfiles de marcadores de ADN (es decir, en la etapa de plántula). En última instancia, el tiempo hasta que se toman las decisiones de selección se reduce significativamente, lo que conduce a una mayor ganancia genética por unidad de tiempo. Desde su introducción formal en 2001, la selección genómica ha llevado a enormes aumentos en la ganancia genética en la cría de animales (por ejemplo, ganado lechero) y también tiene un enorme potencial para la mejora de cultivos.

¿Pueden las nuevas tecnologías acelerar la mejora de los cultivos?

En estos tiempos de rápido crecimiento demográfico y cambio climático, la tasa de mejora del rendimiento genético tiene que aumentar más allá de las tasas actuales si queremos proteger la seguridad alimentaria mundial. Por lo tanto, se necesitan enfoques nuevos o diferentes para acelerar el proceso de mejoramiento de cultivos. Durante las últimas décadas, han surgido numerosas tecnologías que pueden acelerar el mejoramiento de plantas, como la selección genómica (descrita anteriormente). Además otras metodologías nuevas, como la tecnología de edición de genes, están evolucionando rápidamente y los protocolos se han perfeccionado para la mayoría de las principales especies de cultivos. En los sistemas de edición de genes CRISPR, el ARN guía dirige la enzima Cas9 al sitio de ADN objetivo y corta el ADN. Esto se puede usar para activar o desactivar alelos de un gen objetivo para mejorar el rendimiento de la planta, por ejemplo mediante la mejora de la resistencia a las enfermedades o la tolerancia a la sequía [9]. A pesar de la promesa de la edición de genes y el fuerte apoyo de la literatura científica con respecto a la seguridad y la sostenibilidad, muchos países han empleado marcos legales estrictos como consecuencia de controversias principalmente impulsadas por cuestiones ideológicas y el rechazo de los alimentos genéticamente modificados. Por otro lado, un método de reproducción ampliamente utilizado y aceptado es la reproducción por mutación, que utiliza productos químicos o radiación para inducir mutaciones aleatorias en todo el genoma en lugar de mutaciones genéticamente modificadas (dirigidas). De hecho, las mutaciones espontáneas ocurren naturalmente en el genoma de una planta. Por ejemplo, en un campo de trigo del tamaño de una hectárea, ocurren alrededor de 20 mil millones de mutaciones cada año (Prof. Detlef Weigel, comunicación personal). Esta es la razón por la cual la mayoría de la comunidad científica argumenta que las mutaciones inducidas, donde no se introduce ADN extraño, no deben considerarse una herramienta de modificación genética. Alternativamente, la *reproducción rápida*

desarrollada por el Dr. Lee Hickey y sus colegas proporciona una ruta de no modificación genética para introducir o acumular rápidamente nuevas variaciones de rasgos. Esta técnica utiliza condiciones ambientales controladas y fotoperíodos prolongados para lograr hasta seis generaciones por año, en lugar de solo una o dos en el campo. Esto puede acelerar el desarrollo de líneas puras después de un cruce, similar a la tecnología de doble haploide, que es una técnica basada en laboratorio que ha sido una revelación para cultivar cultivos como el maíz y el trigo de invierno. Está demostrado que la mayoría de estas tecnologías modernas ayudan al desarrollo de mejores variedades de cultivos. Sin embargo, estrategias de mejoramiento más eficientes que combinen efectivamente estas tecnologías podrían conducir a un cambio radical en la tasa de ganancia genética. Es necesaria la inversión continua de los sectores público y privado para sostener una mejoría en los cultivos para que sean capaces de alimentar al mundo en el futuro.

#### Referencias bibliográficas

- 1) Arranz-Otaegui A, Gonzalez Carretero L, Ramsey MN, Fuller DQ, Richter T. Archaeobotanical evidence reveals the origins of bread 14,400 years ago in northeastern Jordan. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2018;115:7925–30. <https://doi.org/10.1073/pnas.1801071115>.
- 2) Hickey JM, Chiurugwi T, Mackay I, Powell W. Genomic prediction unifies animal and plant breeding programs to form platforms for biological discovery. *Nat Genet*. 2017;49:1297–303. <https://doi.org/10.1038/ng.3920>.
- 3) Li H, Rasheed A, Hickey LT, He Z. Fast-forwarding genetic gain. *Trends Plant Sci*. 2018;23:184–6. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.01.007>.
- 4) Bernardo R. *Essentials of plant breeding*. Woodbury Minnesota: Stemma Press; 2014.
- 5) Hedden P. The genes of the green revolution. *Trends Genet*. 2003;19:5–9.
- 6) Aasseng S, Ewert F, Martre P, Rötter RP, Lobell DB, Cammarano D, et al. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nat Clim Chang*. 2015;5:143–7. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2470>.
- 7) Challinor AJ, Watson J, Lobell DB, Howden SM, Smith DR, Chhetri N. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nat Clim Chang*. 2014;4:287–91. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2153>.
- 8) Voss-Fels K, Snowdon RJ. Understanding and utilizing crop genome diversity via high-resolution genotyping. *Plant Biotechnol J*. 2016;14:1086–94. <https://doi.org/10.1111/pbi.12456>.
- 9) Liang Z, Chen K, Li T, Zhang Y, Wang Y, Zhao Q, et al. Efficient DNA-free genome editing of bread wheat using CRISPR/Cas9 ribonucleoprotein complexes. *Nat Commun*. 2017;8:14261. <https://doi.org/10.1038/ncomms14261>.
- 10) Wulff BBH, Dhugga KS. Wheat – the cereal abandoned by GM. *Science*. 2018;361:451–2.