

CÓMO DISEÑAR CULTIVOS RESISTENTES A LAS ENFERMEDADES

De los conocimientos básicos a la biotecnología

SELENA GIMÉNEZ-IBÁNEZ

Los registros antiguos describen cómo las enfermedades de las plantas se atribuían a muchas razones, como el poder divino, las creencias religiosas y la superstición. La situación ha cambiado mucho, y ahora tenemos un conocimiento detallado sobre el funcionamiento de la inmunidad vegetal. Las plantas emplean dos tipos de sensores para percibir y derrotar a la larga lista de organismos patógenos que las atacan, mientras que los microbios despliegan una infinidad de armas especializadas para contener la inmunidad y facilitar la infección. Esto abre una puerta para explotar dicho conocimiento e incrementar la resistencia de los cultivos. En este artículo describimos nuevos enfoques biotecnológicos para diseñar cultivos con mayor resistencia a las enfermedades que permitan combatir las pérdidas agrícolas y reducir los aportes químicos, con el objetivo de alcanzar una agricultura más sostenible que garantice la seguridad alimentaria.

Palabras clave: cultivos, enfermedades, biotecnología, seguridad alimentaria.

La vida en el siglo XXI hace difícil apreciar la manera en que las enfermedades de las plantas han afectado a las sociedades humanas y a nuestra propia historia. Un ejemplo devastador es el de la Gran Hambruna irlandesa de 1845, que se produjo cuando la enfermedad conocida como el mildiu de la patata, provocado por el patógeno oomiceto *Phytophthora infestans* (Figura 1), se convirtió en una epidemia que arrolló a la sociedad irlandesa. Provocó la muerte por inanición de cerca de un millón de personas, y otro millón se vio obligado a emigrar, lo que provocó la famosa diáspora irlandesa. Dos siglos después, el mildiu de la patata sigue siendo posiblemente la enfermedad más dañina que afecta a la patata a escala mundial. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), cada año se pierde entre el 20 y el 40 % de la producción mundial de los principales cultivos por culpa de enfermedades y plagas (Oerke, 2006). No es de extrañar que las pérdidas de cultivos sean más altas en aquellas regiones que ya se enfrentan al hambre y a la inseguridad alimentaria. Se prevé

que en 2050 la población mundial alcance los 9.000 millones de personas, un 34 % más que en la actualidad. Por lo tanto, la agricultura moderna debe proporcionar alimento para la creciente población mundial y protegerla de las epidemias incontrolables que amenazan la seguridad alimentaria.

Hoy en día la producción de alimento se basa en prácticas agrícolas que incluyen controles biológicos y de cultivos, el empleo de productos agroquímicos y el uso intencional de variedades resistentes. Si bien los pesticidas han contribuido mucho a mejorar nuestra seguridad alimentaria, el uso habitual de agroquímicos plantea problemas significativos relacionados con sus efectos negativos sobre la salud y el entorno. Este hecho subraya la necesidad de una transición

«Los cultivos actuales son el producto de miles de años de selección humana y mejoramiento tradicional a partir de las formas silvestres originales»

hacia una agricultura más sostenible. El uso intencional de variedades resistentes es un mecanismo benigno en términos ecológicos y económicos para gestionar las enfermedades de los cultivos. Los humanos han seleccionado plantas resistentes a la enfermedad desde los albores de la agricultura. Para los mejoradores modernos,

el desarrollo de un cultivar resistente a la enfermedad incluye dos pasos. En primer lugar, identificar plantas resistentes, normalmente a partir de cultivares silvestres estrechamente relacionados. Y en segundo lugar, incorporar los genes inmunes responsables de la resistencia a enfermedades en los cultivos seleccionados mediante mejoramiento clásico o ingeniería genética. Las metodologías de mejoramiento clásicas realizan una introgresión de genes resistentes en cultivares seleccionados mediante el cruce y la selección de los rasgos deseados en la descendencia. De hecho, los cultivos actuales son el producto de miles de años de selección humana y mejoramiento tradicional a partir de las formas silvestres originales. Este es un proceso largo e intensivo que restringe la mejora genética del cultivo a las especies con las que puede cruzarse sexualmente.

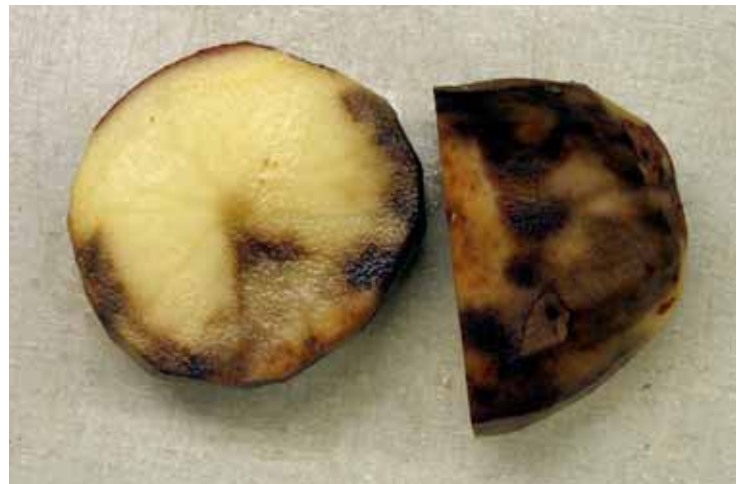
Una forma alternativa de introducir nuevos genes resistentes en los cultivares seleccionados es a través del uso de ingeniería genética, que permite alterar directamente los genes de un organismo utilizando biotecnología. En concreto, permite insertar, modificar o eliminar genes específicos. Tal vez la ventaja más importante de la ingeniería genética es que permite intercambiar material genético entre diferentes especies, o introducir nuevos genes de resistencia contra patógenos en los cultivos que se propagan de forma vegetativa (no sexual) como el plátano, la yuca y la patata, y así sobrepasar los límites impuestos por el mejoramiento clásico. La ingeniería genética tiene potencial para ampliar en gran medida la eficiencia y precisión de posibles modificaciones mediante el uso de tecnologías de edición genética de vanguardia como CRISPR/Cas9 (siglas en inglés de «repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas/proteína asociada a CRISPR 9»). Todas estas estrategias de ingeniería genética amplían las posibilidades de introducir resistencias a enfermedades en cultivos para los que los programas de mejoramiento clásicos plantean obstáculos o no son factibles.

■ EL SISTEMA INMUNE DE LAS PLANTAS

La investigación de los últimos treinta años con especies vegetales modelo y en cultivos ha llevado a una comprensión conceptual detallada sobre los mecanismos moleculares que controlan la resistencia y susceptibilidad a las enfermedades de las plantas. Estas investigaciones están sintetizadas de manera elegante en el modelo de Jones y Dangl, conocido como «modelo de zigzag» (Jones y Dangl, 2006). Esta teoría postula que las plantas emplean dos tipos de sensores para resistir el ataque de organismos



Howard F. Schwartz, Colorado State University (CC BY)



Ben Millet CC BY-NC-ND 2.0

Figura 1. El patógeno *Phytophthora infestans* fue el causante de la epidemia de mildiu de la patata a finales del siglo XIX en Irlanda, lo que provocó la que es conocida como la Gran Hambruna irlandesa de 1845. En la imagen, efectos del patógeno en una patata y en hojas de la planta de la patata.

**«La batalla entre las plantas
y sus patógenos proporciona información
que se puede utilizar para diseñar cultivos
resistentes»**





Figura 2. Las estrategias de ingeniería genética para transferir una serie de sensores de superficie celular a especies cultivables han demostrado ser muy eficaces. Entre otras, estas estrategias han proporcionado una mayor resistencia ante enfermedades como la marchitez bacteriana del plátano causada por *Xanthomonas*, que representa una amenaza a la producción agrícola en algunas zonas. En las imágenes, detalles de tallos, frutos y hojas afectadas por *Xanthomonas campestris* y, abajo, cultivo de plátanos en Tanzania en la que se observan los efectos de la bacteria.

patógenos, mientras que los microbios inducen infecciones utilizando toda una serie de armas especializadas. Por un lado, la primera línea de defensa de las plantas la proporcionan los sensores inmunes especializados de la superficie celular, que detectan la presencia de microbios en el exterior de las células de la planta al percibir estructuras o patrones microbianos. Este reconocimiento activa su inmunidad y es la razón por la que las plantas son generalmente resistentes a la gran cantidad de microbios que las rodean. ¿Cómo es posible, entonces, que existan patógenos vegetales? Como respuesta a esta situación, los patógenos competentes producen fitotoxinas y distribuyen moléculas virulentas llamadas «efectores» en las células vegetales, con el objetivo de atacar dianas concretas de las plantas huésped y provocar la infección. Los efectores contribuyen colectivamente a la patogénesis atacando múltiples procesos celulares defensivos, y su acción es esencial para la progresión de la enfermedad. La segunda línea de defensa vegetal la protagonizan los receptores inmunes intracelulares, que detectan a los efectores cuando son introducidos en las células de la planta. Tras la detección, los receptores intracelulares despliegan la inmunidad en su forma más fuerte, asociada habitualmente con la muerte de la célula huésped en el lugar de la infección, y restablecen la inmunidad completa. Este «modelo de zigzag» predice una batalla coevolutiva continua entre plantas y patógenos basada en cambios adaptativos para inclinar la balanza hacia uno u otro lado, pero también proporciona información que se puede utilizar para diseñar cultivos resistentes a las enfermedades.

■ INCORPORACIÓN DE SENSORES DE SUPERFICIE CELULAR PARA LA PRIMERA LÍNEA DE DEFENSA

Una nueva estrategia prometedora para aumentar la resistencia a enfermedades de los cultivos se basa en el despliegue de sensores inmunes especializados en la superficie celular para mejorar el reconocimiento de patógenos. Los sensores de superficie celular conllevan una mejora cuantitativa de la resistencia a las enfermedades. Por definición, los patrones microbianos percibidos por estos sensores son componentes moleculares muy conservados dentro de una clase de microbios y con una función esencial para su aptitud o supervivencia, lo que implica que los microorganismos no pueden modificarlos fácilmente para superar su detección. Por ejemplo, la quitina, un elemento estructural fundamental de todas las paredes celulares de los hongos, actúa como un patrón microbiano importante, que es percibido por la mayoría de especies de plantas y activa la inmunidad de la planta. Por lo tanto,

una forma de lograr una resistencia de amplio espectro que además sea duradera es mediante la transferencia de estos sensores especializados de la superficie celular que detectan una amplia variedad de moléculas microbianas, como la quitina en el caso de los patógenos fúngicos, a aquellos cultivos que carecen de ellos.

En 2010 se produjo un gran avance cuando el equipo liderado por Cyril Zipfel demostró que la transferencia del sensor de superficie celular que percibe el factor de alargamiento Tu –uno de los patrones microbianos más abundantes en las bacterias– desde una pequeña planta de la familia de la mostaza al tomate utilizando técnicas de ingeniería genética aumentaba la resistencia frente a una amplia gama de patógenos bacterianos (Lacombe et al., 2010). Desde entonces se han utilizado enfoques similares de ingeniería genética para transferir una serie de sensores de superficie celular a especies cultivables (Rodríguez-Moreno, Song y Thomma, 2017). Estas estrategias han demostrado ser muy eficaces. Han proporcionado una mayor resistencia en términos cuantitativos ante enfermedades como el chancro de los cítricos (que afecta a la naranja), la enfermedad bacteriana de las hojas del arroz, el mildiu de la patata y la marchitez bacteriana del plátano causada por la bacteria *Xanthomonas*. Esta última enfermedad representa una de las amenazas más importantes para la producción de plátanos en la región africana de los Grandes Lagos (Figura 2). Por lo tanto, los sensores inmunes de la superficie celular representan una fuente potente de resistencia duradera que se puede transferir incluso entre familias de plantas muy distantes para el control de enfermedades. Los genomas vegetales codifican varios centenares de estos sensores potenciales que podrían cumplir un papel en la percepción de microbios. Hoy en día, la identificación de nuevos sensores inmunes en la superficie celular que perciban microorganismos y su transferencia a los cultivos representa un enfoque emocionante para mejorar la resistencia de los cultivos a patógenos importantes.

■ CREACIÓN DE TRAMPAS BASADAS EN RECEPTORES INTRACELULARES CONTRA ENFERMEDADES CRÍTICAS

Los receptores inmunes intracelulares son herramientas importantes en los programas de mejoramiento que intentan gestionar las enfermedades de los cultivos. Este tipo de inmunidad se basa en un mecanismo de reconocimiento muy específico, desencadenado cuando un receptor inmune intracelular detecta su efector correspondiente dentro de la célula, inyectado por un patógeno que intenta inducir la enfermedad. De este modo, los receptores intracelulares suelen conferir resistencia solo ante aquellas cepas del patógeno que contienen el efector específico



Figura 3. En las imágenes, ensayos sobre el mildiu de la patata en cultivo. Muestran la variedad original de patata cultivada Désirée (A) y la misma variedad con el receptor intracelular *Rpi-vnt1.1* (B), que no muestra síntomas evidentes del mildiu, enfermedad provocada por el patógeno *Phytophthora infestans*. Las imágenes se tomaron en ensayos realizados en 2012, en una etapa avanzada de la plaga del mildiu, y son cortesía del profesor Jonathan D. Jones (The Sainsbury Laboratory, Norwich, Reino Unido).

«La ingeniería genética está emergiendo como una herramienta viable, específica y versátil para reforzar la resistencia de los cultivos a las enfermedades»



Cortesía de Jonathan D. Jones

que reconocen. La inmunidad activada por estos receptores intracelulares es más rápida, intensa y efectiva contra el patógeno adecuado, en comparación con la resistencia creada por los sensores de la superficie celular. Los receptores intracelulares suelen proporcionar inmunidad completa frente a un patógeno concreto, mientras que los sensores superficiales contribuyen cuantitativamente a la resistencia contra una amplia variedad de microbios.

Sir Rowland Biffen demostró la efectividad de este tipo de resistencia por primera vez a principios del siglo XX, a través de un programa de mejoramiento genético del trigo (Biffen, 1905). Desde entonces, los receptores inmunes intracelulares se han utilizado ampliamente, especialmente en programas de mejoramiento clásico, gracias a los cuales se introducen este tipo de genes en cultivos actuales desde parientes silvestres resistentes. Al mismo tiempo, se han identificado e introducido numerosos receptores intracelulares en plantas utilizando técnicas de ingeniería genética para generar variedades resistentes a algunas enfermedades importantes. Un ejemplo destacado es la introducción en la patata cultivada de un receptor inmune intracelular conocido como *Rpi-vnt1.1*, aislado a partir de un pariente

sudamericano de esta especie, que confiere completa resistencia ante la devastadora enfermedad del mildiu de la patata (Figura 3) (Foster et al., 2009). Resulta notable que, en 2015, una variedad de patata resistente al mildiu que incluía este receptor intracelular se convirtió en el primer cultivo transgénico resistente a un patógeno no viral aprobado para uso comercial en los EE UU. Hoy en día la identificación de nuevos receptores inmunes intracelulares es un área de investigación extremadamente activa, que trata de proteger a los cultivos más importantes económicamente frente a sus patógenos más devastadores.

A día de hoy, se ha logrado transferir receptores inmunes intracelulares entre especies cercanas de plantas con relativo éxito. Por el contrario, su introducción en plantas más lejanas, como especies pertenecientes a otras familias, suele fracasar. Este fenómeno es la razón principal por la cual los investigadores prefieren identificar receptores inmunes intracelulares a partir de especies silvestres relacionadas con los cultivos, puesto que es mucho más probable que funcionen al introducirlos en una variedad cultivada cercana. Una forma alternativa de superar esta problemática podría ser a través del rediseño directo de los receptores inmunes endógenos de un cultivo para expandir su capacidad de detección. En este sentido, recientemente se ha generado una versión modificada sintéticamente del receptor inmune intracelular de la patata conocido como *R3a*, con capacidad para detectar al mismo tiempo varios efectores del patógeno oomiceto *Phytophthora infestans* (Segretin et al., 2014), mientras que otro receptor intracelular del tomate conocido como *I2* ya se ha modificado para proporcionar resistencia parcial a *Phytophthora infestans*, además de proporcionarla para el hongo *Fusarium oxysporum* (Giannakopoulou et al., 2015). Aunque estos experimentos se han realizado en una planta modelo sin valor agrícola, estos trabajos pioneros sugieren que se pueden modificar directamente los receptores inmunes endógenos para crear resistencia ante diversos patógenos. Estos conocimientos también se pueden ampliar utilizando tecnologías de edición del genoma como CRISPR/Cas9, que permite modificar de manera precisa genes existentes y podría ser explotada para desarrollar nuevas especificidades de detección en los receptores inmunes intracelulares preexistentes de los principales cultivos.

■ PROTECCIÓN DE LOS TALONES DE AQUILES DE LAS PLANTAS

Los patógenos vegetales utilizan toda una serie de estrategias moleculares para suprimir la inmunidad de las plantas. Las dianas de estas estrategias se conocen habitualmente como «genes vegetales de susceptibilidad», porque es necesario manipularlos o suprimirlos para

que la enfermedad progrese. Sorprendentemente, múltiples patógenos que no están relacionados atacan las mismas dianas de susceptibilidad dentro de la planta, lo que sugiere que estas dianas son, de hecho, importantes talones de Aquiles para la planta. Por lo tanto, una estrategia reciente para proteger a los cultivos de las enfermedades se basa en la eliminación o modificación de estos genes de susceptibilidad para evitar que los patógenos los manipulen.

Varios ejemplos recientes ilustran cómo se pueden aplicar con éxito las nuevas técnicas de edición genética en los cultivos para proteger a los genes vegetales de susceptibilidad atacados por los patógenos. Las tácticas empleadas frecuentemente por los patógenos vegetales para inducir enfermedades incluyen, por ejemplo, la manipulación de genes de defensa activados durante el proceso de infección, así como la manipulación de las principales rutas hormonales de defensa de las plantas, en las que se incluye la hormona del ácido jasmónico. En este contexto, recientemente se reeditó en tomate un sensor de ácido jasmónico llamado *JAZ2* mediante tecnología CRISPR/Cas9 para impedir que lo manipulara una fitotoxina producida por muchas cepas de la bacteria *Pseudomonas syringae* (Figura 4). El resultado fue el desarrollo de tomates resistentes a la enfermedad de la peca bacteriana provocada por esta bacteria fitopatógena (Ortigosa, Gimenez-Ibanez, Leonhardt y Solano, 2018). En otro ejemplo muy elegante se utilizó una estrategia similar para modificar tres genes de susceptibilidad del arroz, conocidos como genes *SWEET*. Esto ha permitido desarrollar una variedad de arroz que muestra una amplia resistencia contra el patógeno bacteriano *Xanthomonas oryzae*, causante del tizón bacteriano en este cultivo y que es una enfermedad grave en gran parte de Asia y en algunas zonas de África (Oliva et al., 2019). Todos estos ejemplos muestran cómo se pueden utilizar las nuevas tecnologías de edición genética para proporcionar de manera sencilla resistencia a los cultivos.

■ ESTRATEGIAS PARA CREAR UNA RESISTENCIA DURADERA

Desafortunadamente, la resistencia a las enfermedades conferida por los receptores inmunes intracelulares, aunque es muy efectiva, suele durar poco tiempo en la práctica. Esto se debe a que los patógenos evolucionan rápidamente para evadir la detección, por ejemplo, perdiendo o modificando un efector detectado de su abundante repertorio. Para superar este problema, una posible estrategia es a

«Hoy en día existen solo unos pocos cultivos transgénicos resistentes a las enfermedades que hayan sido aprobados para su uso comercial»

través del desarrollo de variedades multilínea, que contienen una mezcla de semillas con diferentes genes receptores intracelulares, lo que reduce la presión selectiva sobre un patógeno en comparación con los monocultivos resistentes, que contienen el mismo y único receptor intracelular en todas las semillas. Otra estrategia se basa en la imple-

mentación de múltiples receptores inmunes intracelulares en la propia semilla, proceso conocido habitualmente como «apilamiento de genes». Esta estrategia produce una inmunidad de larga duración, puesto que son necesarios múltiples cambios simultáneos en el patógeno para superarla, y la probabilidad de que esto ocurra es muy baja. Un ejemplo de la efectividad de esta estrategia es el reciente apilamiento mediante ingeniería genética de tres receptores inmunes intracelulares en variedades de patata de los altiplanos de África Oriental contra la enfermedad del mildiu de la patata. Esto ha dado lugar a una variedad que es resistente a esta enfermedad, con una producción entre tres y cuatro veces superior respecto a la media nacional (Ghislain et al., 2019). Estas variedades de patata resistentes al mildiu se podrían adoptar rápidamente si el entorno regulatorio de los cultivares mejorados con técnicas de ingeniería genética fuera favorable. Esto supondría aumentos significativos en los ingresos de los pequeños agricultores, frente a una enfermedad que provoca pérdidas anuales de entre el 15 y el 30 % en el África subsahariana.



Figura 4. Las nuevas tecnologías de edición genética pueden proporcionar de una manera sencilla resistencia a los cultivos frente a enfermedades, como por ejemplo frente a la bacteria *Pseudomonas syringae*. En la imagen, efectos de esta bacteria en un tomate.

Gregori Martín/EurekAlert

Aunque la mayoría de estrategias pasadas se han centrado en la introducción de receptores inmunes intracelulares con bastante éxito, es probable que la estrategia más eficaz para combatir las enfermedades a largo plazo aún esté por llegar. Intuitivamente, esta estrategia debe estar basada en piramidalizar varias capas de defensa al mismo tiempo, donde un mismo cultivar combine sensores superficiales, receptores inmunes intracelulares y la desactivación de genes de susceptibilidad específicos. Esto debería conferir una resistencia más duradera frente a una amplia variedad de patógenos, gracias a los sensores de la superficie celular, e inmunidad completa a cepas patógenas específicas, mediante los receptores inmunes intracelulares y los genes de susceptibilidad desactivados. Esta estrategia combinada debería ser mucho más duradera en la práctica.

■ EL FUTURO QUE NOS ESPERA

Los enfoques de ingeniería genética están emergiendo como herramientas viables, específicas y versátiles para reforzar la resistencia de los cultivos frente a las enfermedades, especialmente en los cultivos cuya propagación es principalmente vegetativa para los que los programas clásicos de mejoramiento no son factibles. Las estrategias descritas aquí podrían permitir el desarrollo de cultivos «mejorados» que detecten y respondan de manera más efectiva a los patógenos invasores que intentan invadirlos, o que eviten las estrategias microbianas que son usadas para inducir la enfermedad, muy posiblemente sin reducir la productividad de los cultivos mejorados. Hoy en día existen solo unos pocos ejemplos de cultivos transgénicos resistentes a las enfermedades que hayan sido aprobados para uso comercial. Esto es debido a las actuales restricciones legislativas en torno a los transgénicos, pese al consenso científico de que estos cultivos son tan seguros como los desarrollados mediante los métodos clásicos (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2016). Estas estrategias biotecnológicas son más efectivas, respetuosas con el medio ambiente y seguras que muchos métodos actuales de control basados en el uso de agroquímicos. De hecho, se estima que el apilamiento de receptores inmunes intracelulares puede reducir el uso de fungicidas contra el mildiu de la patata en más de un 80 % (Haverkort et al., 2016). Con el crecimiento continuado de la población mundial, no podemos seguir ignorando los enfoques de ingeniería genética para introducir fuentes de resistencia en los cultivos contra sus principales enfermedades. La razón es simple: estas variedades superiores tienen el potencial para combatir las pérdidas agrícolas relacionadas con las plagas en el campo, permitirían reducir los aportes químicos y representan una potente herramienta hacia una agricultura más sostenible que garantice la seguridad alimentaria. ☺

REFERENCIAS

- Biffen, R. H. (1905). Mendel's laws of inheritance and wheat breeding. *The Journal of Agricultural Science*, 1(1), 4–48. doi: [10.1017/S0021859600000137](https://doi.org/10.1017/S0021859600000137)
- Foster, S. J., Park, T. H., Pel, M., Brigneti, G., Sliwka, J., Jagger, L., ... Jones, J. D. G. (2009). *Rpi-vnt1.1*, a *Tm-2(2)* homolog from *Solanum venturii*, confers resistance to potato late blight. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 22(5), 589–600. doi: [10.1094/MPMI-22-5-0589](https://doi.org/10.1094/MPMI-22-5-0589)
- Ghislain, M., Byarugaba, A. A., Magembe, E., Njoroge, A., Rivera, C., Roman, M. L., ... Kiggundu, A. (2019). Stacking three late blight resistance genes from wild species directly into African highland potato varieties confers complete field resistance to local blight races. *Plant Biotechnology Journal*, 17(6), 1119–1129. doi: [10.1111/pbi.13042](https://doi.org/10.1111/pbi.13042)
- Giannakopoulou, A., Steele, J. F., Segretin, M. E., Bozkurt, T. O., Zhou, J., Roßatzek, S., ... Kamoun, S. (2015). Tomato I2 immune receptor can be engineered to confer partial resistance to the oomycete *Phytophthora infestans* in addition to the fungus *Fusarium oxysporum*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 28(12), 1316–1329. doi: [10.1094/MPMI-07-15-0147-R](https://doi.org/10.1094/MPMI-07-15-0147-R)
- Haverkort, A. J., Boonekamp, P. M., Hutten, R., Jacobsen, E., Lotz, L. A. P., Kessel, G. J. T., ... Visser, R. G. F. (2016). Durable late blight resistance in potato through dynamic varieties obtained by cisgenesis: Scientific and societal advances in the DuRPh project. *Potato Research*, 59(1), 35–66. doi: [10.1007/s11540-015-9312-6](https://doi.org/10.1007/s11540-015-9312-6)
- Jones, J. D., & Dangl, J. L. (2006). The plant immune system. *Nature*, 444(7117), 323–329. doi: [10.1038/nature05286](https://doi.org/10.1038/nature05286)
- Lacombe, S., Rougon-Cardoso, A., Sherwood, E., Peeters, N., Dahlbeck, D., Van Esse, H. P., ... Zipfel, C. (2010). Interfamily transfer of a plant pattern-recognition receptor confers broad-spectrum bacterial resistance. *Nature Biotechnology*, 28(4), 365–369. doi: [10.1038/nbt.1613](https://doi.org/10.1038/nbt.1613)
- National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. (2016). *Genetically engineered crops: Experiences and prospects*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: [10.17226/23395](https://doi.org/10.17226/23395)
- Oerke, E. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–34. doi: [10.1017/S0021859605005708](https://doi.org/10.1017/S0021859605005708)
- Oliva, R., Ji, C., Atienza-Grande, G., Huguet-Tapia, J. C., Perez-Quintero, A., Li, T., ... Yang, B. (2019). Broad-spectrum resistance to bacterial blight in rice using genome editing. *Nature Biotechnology*, 37(11), 1344–1350. doi: [10.1038/s41587-019-0267-z](https://doi.org/10.1038/s41587-019-0267-z)
- Ortigosa, A., Gimenez-Ibanez, S., Leonhardt, N., & Solano, R. (2018). Design of a bacterial speck resistant tomato by CRISPR/Cas9-mediated editing of *Sl-JAZ2*. *Plant Biotechnology Journal*. doi: [10.1111/pbi.13006](https://doi.org/10.1111/pbi.13006)
- Rodríguez-Moreno, L., Song, Y., & Thomma, B. P. (2017). Transfer and engineering of immune receptors to improve recognition capacities in crops. *Current Opinion in Plant Biology*, 38, 42–49. doi: [10.1016/j.pbi.2017.04.010](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.04.010)
- Segretin, M. E., Pais, M., Franceschetti, M., Chaparro-García, A., Bos, J. I. B., Banfield, M. J., & Kamoun, S. (2014). Single amino acid mutations in the potato immune receptor R3a expand response to *Phytophthora* effectors. *Molecular Plant-Microbe Interaction*, 27(7), 624–637. doi: [10.1094/MPMI-02-14-0040-R](https://doi.org/10.1094/MPMI-02-14-0040-R)
- AGRADECIMIENTOS: La autora quiere agradecer a John Rathjen, Andrea Chini y Sophie Kneeshaw por su lectura crítica y sus útiles observaciones, así como al profesor Jonathan D. Jones (The Sainsbury Laboratory, Norwich, Reino Unido) por facilitar las imágenes de los ensayos sobre el mildiu de la patata en variedades que expresan el receptor intracelular *Rpi-vnt1.1*. Este trabajo ha sido financiado por los proyectos del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades número BIO2014-55884-JIN y RTI2018-094526-J-I00 para Selena Giménez-Ibáñez. La autora no declara ningún conflicto de intereses.
- SELENA GIMÉNEZ-IBÁÑEZ.** Investigadora en el Departamento de Genética Molecular de Plantas del Centro Nacional de Biotecnología CSIC (CNB-CSIC), Madrid (España). Estudió Ingeniería Agrónoma en la Universitat Politècnica de València y realizó su tesis en la Universidad de Wageningen (Países Bajos) en la especialidad de biotecnología de plantas y mejoramiento genético. Posteriormente se trasladó a The Sainsbury Laboratory (Centro John Innes, Reino Unido), un centro líder en las relaciones entre las plantas y sus patógenos, para realizar sus estudios de doctorado. Desde 2010 ha desarrollado su carrera de investigación en el CNB-CSIC, donde desarrolla su actividad en relación con las interacciones planta-microbio, centrada en entender los mecanismos de defensa que controlan la resistencia de las plantas frente a las plagas y cómo diferentes tipos de microbios pueden convertirse en patógenos competentes, lo que podría ayudar a diseñar nuevas estrategias para la protección de los cultivos. ✉ selena.gimenez@cnb.csic.es