



Se estima que la población mundial se incremente a más de 8.5 mil millones de habitantes para el 2030, y que rebase los 10 mil millones en 2050. Este crecimiento poblacional trae consigo la necesidad ineludible de aumentar la producción agrícola para cubrir los requerimientos nutricionales y mantener la seguridad alimentaria

BIOINOCULANTES

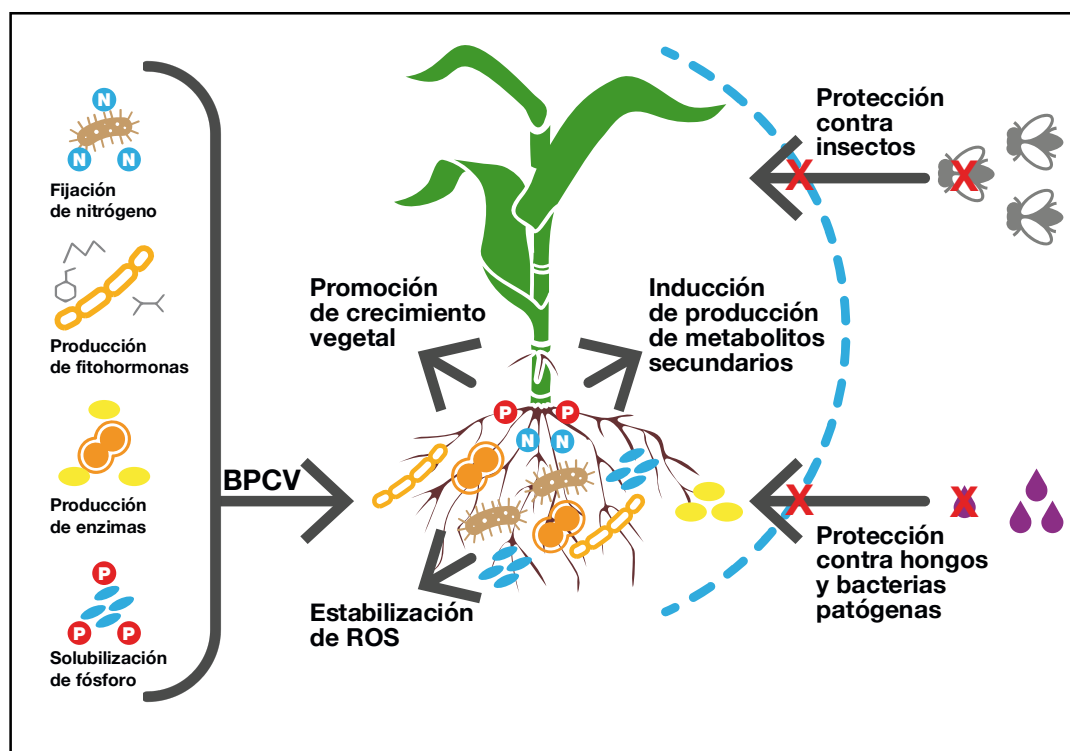
Aliados versátiles para promover la salud y prevenir enfermedades en cultivos agrícolas

Ian Luis Herrera Simpson y Luis Herrera Estrella

¿Es posible hacer un manejo de los microorganismos asociados a los cultivos que ayuden en su nutrición y a protegerlos contra condiciones adversas? Veamos: de acuerdo con las proyecciones de las Naciones Unidas se estima que la población mundial se incremente a más de 8.5 mil millones de habitantes para el 2030, y que rebase los 10 mil millones en 2050 [1]. Este crecimiento poblacional trae consigo la necesidad ineludible de aumentar la producción agrícola para cubrir los requerimientos nutricionales y mantener la seguridad alimentaria, lo que anticipa un aumento en el uso de diversos compuestos químicos sintéticos (insecticidas, herbicidas, fertilizantes y otros), para uso agrícola, también denominados de manera genérica *agroquímicos*. El uso excesivo de dichos compuestos está relacionado con ciertos efectos adversos en la salud humana, el medio ambiente y los ecosistemas naturales. No obstante, y a pesar de los aspectos negativos de los agroquímicos, su uso sigue siendo fundamental para la producción agrícola, considerando el compromiso entre fines y medios para la producción y la conservación. Más aún, en términos de sostenibilidad, ha sido necesario generar tecnologías alternativas que permitan la reducción en el uso de los diversos agroquímicos y a su vez, que incrementen rendimientos de producción

Figura 1. Efectos de las BPCV en las Plantas.

Promueven el crecimiento vegetal mediante la producción de hormonas, compuestos volátiles y la provisión de macro y micronutrientes. Inducen la producción de metabolitos secundarios en las plantas, activan los mecanismos de defensa de la planta contra insectos y determinan en olor, sabor y color del cultivo. Las BPCV inducen la producción de enzimas antioxidantes que estabilizan las especies reactivas de oxígeno (ROS), que en altas concentraciones dañan el DNA de manera irreversible y producen muerte celular, y sintetizan enzimas, antibióticos y otros compuestos que impiden la colonización por bacterias y hongos potencialmente patógenos.



Algunos de los procesos por los que las BPCV tienen efectos benéficos en los vegetales, son la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo, así como la producción de fitohormonas, antibióticos, enzimas y ciertas moléculas volátiles

iguales o mayores que con las prácticas actuales. Una de las estrategias que ha demostrado un enorme potencial y ha extendido su uso a nivel global para lograr dicho propósito, es la aplicación de los *bioinoculantes*, compuestos por (Rizo)bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (PGPR's por sus siglas inglesas, referidas aquí como BPCV). Las BPCV son microorganismos que viven contiguos a la zona radicular (rizosfera), o dentro de los tejidos de las plantas (bacterias endófitas) y que, mediante simbiosis o en vida libre, son capaces de inducir la resistencia a diversos tipos de enfermedades y a la sequía, además de promover el crecimiento vegetal por diversos mecanismos [2]. Algunos de los procesos por los que las BPCV tienen efectos benéficos en los vegetales, son la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo, así como la producción de fitohormonas, antibióticos, enzimas y ciertas moléculas volátiles. Este tipo de productos

biológicos estimulan cambios fisiológicos y bioquímicos en las plantas, que incrementan la resistencia sistémica a varios retos o limitaciones (estrés) a los que se enfrentan durante su crecimiento y desarrollo [3]. Las dos categorías de estrés que soportan las plantas son los factores bióticos (generado por otros organismos como bacterias, hongos e insectos que causan enfermedades en las plantas) y los abióticos (derivados de condiciones climáticas y ambientales adversas como la sequía, la inundación, la salinidad y las altas y bajas temperaturas). Además de ampliar la tolerancia a diversos tipos de estrés, las BPCV tienen la capacidad de estimular el crecimiento y mejorar, comparativamente, la productividad de los cultivos agrícolas tratados con estos microorganismos. Es importante explicar ciertos detalles de los mecanismos más estudiados que intervienen para desarrollar resistencia ('natural', adquirida o inducida), al estrés biótico o abiótico, así

como aquellos que participan en la promoción del crecimiento vegetal [Fig. 1].

Estrategias y mecanismos de resistencia

Cuando una planta presenta o activa una respuesta de resistencia, es capaz de prevenir o evitar —casi completamente— un ataque o afectación por factores bióticos o abióticos adversos; si sólo se reduce tal afectación (hasta un cierto límite), se considera como tolerancia. Y para lograrlo, las plantas y los BPCV recurren a:

1) *Producción de metabolitos secundarios*. En muchas plantas es común encontrar compuestos producidos mediante algunas reacciones bioquímicas que surgen de rutas metabólicas que no son esenciales para sus actividades básicas, pero que están involucradas en funciones especiales. La síntesis de metabolitos secundarios es activada o incrementada

por las BPCV; algunos de estos compuestos pertenecen a grupos conocidos como alcaloides, taninos, aceites volátiles, flavonoides y resinas, entre otros; poseen valor económico y agregado en diversos cultivos, pues están directamente relacionados con el sabor, el olor y el color. Pero también, son importantes para repeler plagas, resistir enfermedades y otros organismos [4]. Existen metabolitos secundarios como el DIMBOA (perteneciente a una clase química denominada benz-ox-az-inoides), y algunos glicosinolatos (compuestos azufrados presentes en hortalizas como la col y el brócoli), que participan específicamente en la defensa a largo plazo contra diversos tipos de enfermedades, como el ataque de insectos e infecciones bacterianas, así como en la resistencia a algunos tipos de estrés abiótico [5].

2) *Producción de enzimas hidrolíticas.* Algunas BPCV producen enzimas ‘desarmadoras’ como mecanismo de defensa contra otros organismos y que, al ser liberadas en la rizosfera o la superficie de las plantas, protegen a éstas contra algunas enfermedades. La biosíntesis de amilasas, celulasas, pectinasas y proteasas —que degradan distintos biopolímeros— contribuyen a la degradación de las paredes celulares de bacterias y hongos potencialmente patógenos, tales como los hongos *Fusarium solani* y *Botrytis cinerea* [6,7].

3) *Inducción de enzimas antioxidantes.* Como la mayoría de los organismos, las plantas contienen moléculas del tipo ‘radicales libres’ o peróxidos, que son inestables, pero químicamente muy activas. Se denominan Especies Reactivas de Oxígeno (ROS por sus siglas en inglés) y, a concentraciones bajas, los ROS son moléculas esenciales para la señalización y regulación de procesos del crecimiento y desarrollo normal de las plantas, así como de la respuesta a distintos tipos de estrés; no obstante, concentraciones elevadas de ROS causan un

daño irreversible al ADN, así como la muerte celular. Estas concentraciones elevadas y perjudiciales de ROS se generan principalmente en situaciones de estrés biótico y abiótico. Por su lado, las BPCV tienen la capacidad de estimular la producción de enzimas antioxidantes en las plantas —un ejemplo es la catalasa que encontramos en los rábanos—, que capturan los ROS y los convierten en moléculas estables, disminuyendo su efecto negativo en el organismo y consecuentemente, habilitando a las plantas para resistir condiciones climáticas adversas e infecciones por patógenos [8].

4) *Producción de hormonas.* Las células vegetales sintetizan compuestos conocidos como fitohormonas o reguladores de crecimiento vegetal (hay también distintos tipos y abreviaturas frecuentes para cada tipo), las cuales se difunden por tejidos y órganos y participan promoviendo el crecimiento y la diferenciación; influyen

Cuando una planta presenta o activa una respuesta de resistencia, es capaz de prevenir o evitar — casi completamente— un ataque o afectación por factores bióticos o abióticos adversos; si sólo se reduce tal afectación (hasta un cierto límite), se considera como tolerancia



A pesar de que el nitrógeno es abundante en la atmósfera en la forma química de nitrógeno bimolecular (N_2 en 78%), las plantas no lo pueden utilizar de manera directa para su nutrición, ya que es necesario primero convertirlo en formas químicas que la planta pueda asimilar como es el amonio (NH_4^+)

en el rendimiento agrícola y también, en las respuestas al estrés biótico y abiótico [9]. Las fitohormonas son cruciales para la activación de diversas rutas de señalización que regulan gran cantidad de procesos fisiológicos y del desarrollo de las plantas, incluyendo respuestas de defensa. Ciertos microorganismos del grupo de las BPCV tienen la capacidad de producir o estimular la producción, en los tejidos vegetales, de las distintas clases de fitohormonas como el ácido indol-3-acético (IAA), ácido giberélico (GA's), ácido jasmónico (JA), ácido salicílico (SA), etileno (C_2H_4 , que es gaseoso) y ácido abscísico (ABA), las cuales modulan mecanismos de tolerancia a estrés abiótico y de defensa contra plagas y enfermedades.

Mecanismos y aplicaciones para promover el crecimiento

Incluso antes de conocerse que podían inducir los mecanismos de defensa a estrés biótico y abiótico, ya se sabía que las BPCV tienen la capacidad de estimular el crecimiento y desarrollo de las plantas a través de varios componentes. La promoción del crecimiento de las plantas por BPCV se relaciona con procesos fisiológicos mediados por fitohormonas vegetales y por el suministro de macronutrientes (compuestos nitrogenados y fosfatados), que impulsan significativamente el crecimiento de la planta. En el caso de los mecanismos que mejoran el flujo nutrimental son relevantes la fijación bio-

lógica de nitrógeno (atmosférico), la 'solubilización' del fósforo y el aporte de hierro bioasimilable por bacterias sideróforas. El nitrógeno y el fósforo son indispensables para la biosíntesis de proteínas, ácidos nucleicos y en el metabolismo energético. En el caso del nitrógeno, las formas asimilables no son muy abundantes en el suelo y las plantas lo obtienen a través de sales de amonio o nitratos, y suplementados mediante fertilizantes industriales. A pesar de que el nitrógeno es abundante en la atmósfera en la forma química de nitrógeno bimolecular (N_2 en 78%), las plantas no lo pueden utilizar de manera directa para su nutrición, ya que es necesario primero convertirlo en formas químicas que la planta pueda asimilar como es el ión amonio (NH_4^+). Algunas BPCV tienen la capacidad





de fijar el N_2 de la atmósfera y convertirlo en formas químicas útiles para las plantas. Estas bacterias fijadoras del nitrógeno pueden asociarse a las plantas en vida libre o de forma mucho más estrecha estableciendo una endosimbiosis con ciertos tipos de plantas como son el frijol, la soya y otras leguminosas. Por su parte, el fósforo es abundante en los suelos alrededor del mundo, sin embargo, a veces está atrapado en conformaciones químicas difíciles de aprovechar por la mayoría de los seres vivos. Ciertas BPCV que tienen la capacidad de ‘soltarlo’ (solubilizarlo) desde compuestos fosforados del suelo, liberando fosfatos asimilables por las plantas [10]. Los bioinoculantes con ambos tipos de BPCV (simbióticas o de vida libre que fijan nitrógeno y las solubilizadoras del fósforo), contribuyen a reducir significativamente la aplicación de fertilizantes industriales, los que, además de no siempre estar accesibles a los pequeños productores, su aplicación excesiva contribuye al calentamiento global y causan graves problemas ecológicos al contaminar aguas profundas y superficiales.

Más allá de las defensas y la promoción de crecimiento

Actualmente existen varios consorcios agroindustriales de investigación y desarrollo (I&D), nacionales y globales, que producen diferentes tipos de bioinoculantes ya sea incluyendo un solo BPCV o integrados por ‘consorcios’ de diferentes bacterias, con actividades benéficas complementarias, para cultivos y regiones determinadas. Este es un tema de mucha relevancia y actualidad, pero es preciso incluir a los microbiomas, como catálogos amplios técnica y racionalmente identificados —aunque no sean cultivables en el laboratorio— de las poblaciones bacterianas que son muestreadas en algún sitio. Pues bien, hay empresas que han realizado análisis comparativos entre los microbiomas presentes en diversos cultivos agrícolas y el microbioma intestinal del humano y cuyos estudios mostraron que hay especies de microorganismos compartidas entre plantas y el intestino humano. Lo anterior sugiere

que al menos algunos microorganismos que integran el microbioma intestinal humano se adquieren a través del consumo de verduras frescas. Es decir, el secreto del aporte a la salud humana del consumo de las verduras frescas no solo reside en su aporte de fibra a la dieta, sino además de microorganismos benéficos (probióticos) que en concentraciones adecuadas promueven beneficios a la salud. Esto sugiere que es posible cultivar hortalizas enriquecidas con probióticos para el mantenimiento o restauración de un microbioma intestinal humano sano (ver *BiotechMov* No. 5, p.30; No. 12, p. 6 y 30; No. 23, p. 22) o también, para la prevención de padecimientos nutricionales (osteopenia y osteoartritis) en personas de edad avanzada. Derivado de los conocimientos en microbiología, genómica y fisiología, hay un campo abierto para el desarrollo de probióticos conteniendo BPCV que tengan tanto efectos benéficos en los cultivos, así como para una alimentación animal y humana más saludable.

Contacto: ilhs.ibt@gmail.com,
lherrerae@cinvestav.mx

Referencias

1. United Nations. Population 2030: “Demographic challenges and opportunities for sustainable development planning.” United Nations Economic and Social Affairs. 2015. <https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/trends/Population2030.pdf>
2. Bhattacharyya P & Jha D. (2012). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World J Microbiol Biotech.* 2012; **28**(4): 1327-1350.
3. Meena M, Swapnil P, Divyanshu K, et al. (2020) PGPR-mediated induction of systemic resistance and physicochemical alterations in plants against the pathogens: Current perspectives. *J Basic Microbiol* **60**(10): 828-861.
4. Wink M (1988). Plant breeding: the importance of secondary metabolites for protection against pathogens and herbivores. *Theor Appl Genet* **75**: 225-233.
5. Hatami M & Ghorbanpour M (2016). Changes in phytochemicals in response to rhizospheric microorganism infection. En: Choudhary D, Varma A (eds) *Microbial-mediated induced systemic resistance in plants*. Singapore: Springer.
6. Hao H-T, Zhao X, Shang QH, et al. (2016). Comparative digital gene expression analysis of the *Arabidopsis* response to volatiles emitted by *Bacillus amyloliquefaciens*. *PLoS ONE* **11**(8):e0158621.
7. Elad Y & A Stewart (2004). “Microbial Control of *Botrytis* spp.”, pp. 223-241 En: *Botrytis: Biology, Pathology and Control*, Elad Y, et al (eds.). Springer.
8. Yasmeen T, A Ahmad, M Arif et al. (2020) Biofilm forming rhizobacteria enhance growth and salt tolerance in sunflower plants by stimulating antioxidant enzymes activity. *Plant Physiol Biochem* **156**: 242-256
9. Kudoyarova G, Arkhipova T, Korshunova T, et al. (2019) Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses. *Front Plant Sci* **10**: 1368-1374
10. Backer R, Rokem J, Ilangumaran G, et al. (2018). Plant-growth promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Front Plant Sci* **9**: 1-17.

El Dr. Ian Luis Herrera-Simpson, labora en la empresa Biofábrica Siglo XXI en el Parque Científico y Tecnológico de Morelos. El Dr. Luis R. Herrera-Estrella, adscrito al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Irapuato, México, realiza una estancia en el Texas Tech University, en Lubbock, TX (EEUU)