

BACTERIAS PROMOTORAS DE CRECIMIENTO VEGETAL, IMPORTANCIA Y AVANCES EN LA AGRICULTURA

Piedad Cecilia Lopera Yepes ⁽¹⁾ José Rafael Rodríguez Núñez ⁽²⁾

1. Bióloga MS.C. Biología, Basil Farm SAS. Directora Técnica, Espinal Tolima, Colombia.
piceloye@gmail.com
2. Lic. Biología y Química, Esp. MS.C. Microbiología Agroindustrial., Tecnoparque Nodo Tolima, Línea de Biotecnología y Nanotecnología., GI Senagrotic., Centro Agropecuario La Granja Sena Regional Tolima. Espinal Tolima, Colombia. jrodriguezn@sena.edu.co

RESUMEN

En la actualidad, existen en el mercado productos a base de bacterias PGPR o sus compuestos activos con características Bioestimulantes, Biofertilizantes y acondicionadores de suelos; que llevan a la rizosfera nutrientes naturales que ayudan al rendimiento y crecimiento de los cultivos en diferentes procesos. La Formulación de Nanofertilizantes donde se utilizan nanomateriales, como nanopartículas de sílice, para encapsular o cargar las bacterias PGPR, ayuda a proteger las bacterias y facilita su liberación controlada. Brindar una mayor estabilidad que ofrecen protección a las bacterias PGPR, lo que les permite sobrevivir mejor en el suelo y en condiciones ambientales adversas. Las bacterias PGPR representan una herramienta valiosa para el aumento de la productividad agrícola, la reducción de la dependencia de productos químicos y la promoción de la sostenibilidad en la agricultura. Su estudio y aplicación siguen siendo temas importantes en la investigación agrícola y el desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Palabras Claves:

Rizobacterias, Agricultura, conservación, bioinsumo, biofertilización.

ABSTRACT

Currently, there are products on the market based on PGPR bacteria or its active compounds with Biostimulant, Biofertilizer and soil conditioner characteristics; that carry natural nutrients to the rhizosphere that help the performance and growth of crops in different processes. Nanofertilizer Formulation where nanomaterials, such as silica nanoparticles, are used to encapsulate or load the PGPR bacteria, helps protect the bacteria and facilitate their controlled release. Provide greater stability that offers protection to PGPR bacteria, allowing them to survive better in soil and adverse environmental conditions. PGPR bacteria represent a valuable tool for increasing agricultural productivity, reducing dependence on chemicals and promoting sustainability in agriculture. Its study and application continue to be important topics in agricultural research and the development of more efficient and environmentally friendly agricultural practices.

Keywords: Rhizobacteria, Agriculture, conservation, bioinput, biofertilization.

INTRODUCCIÓN

Existe bastante literatura en libros, revisiones científicas y artículos de investigación sobre la variabilidad observada en las bacterias benéficas inoculadas al suelo para promover la sanidad vegetal, que se hace urgente adelantar estudios en los procedimientos adecuados de inoculación de las mismas para garantizar la protección de cultivos. En adición, el uso de agroquímicos es considerado un riesgo para la biodiversidad y es urgente disminuir su uso e implementar prácticas fitosanitarias amigables con el medio ambiente, que permitan incurrir en mercados internacionales que exigen productos limpios. En la actualidad hay variedad de inoculantes microbianos a base de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR por sus siglas en inglés), los cuales son recomendados para la biofertilización y/o el biocontrol de plagas y enfermedades.

Algunos de estos productos están basados en cepas de *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Azospirillum* spp, ya que son microorganismos que estimulan positivamente el desarrollo de las plantas, son fácilmente cultivables en laboratorio y presentan algunas ventajas para su manipulación (Nakkeeran *et al.*, 2006; Ramírez y Kloepper, 2011). Dentro de los más abundantes y exitosos en el mercado se encuentran los del género *Bacillus*, gracias a que sus especies forman una estructura de resistencia a condiciones ambientales, la endospora, esto les permite ser formulados de manera más eficiente en "inoculantes bacterianos". La eficacia de su aplicación dependerá de la consistencia en los resultados reflejados en las plantas.

Sin embargo, no existe en el mercado mecanismos rápidos de aislamiento e identificación de este tipo de bacterias, la obtención de un cultivo bacteriano puro,

extraído de un ambiente agrícola requiere de técnicas de laboratorio, que permitan inducir su crecimiento en medios de cultivo artificiales que cumplan con las condiciones mínimas requeridas para su desarrollo y crecimiento que a posteriori permitan realizar su identificación y cuantificación. El método de aislamiento y los medios de cultivo para el desarrollo de una bacteria, se seleccionan de acuerdo al tipo de microorganismo PGPR del que se sospecha, la sintomatología y el hospedante de donde se aísla. Los aspectos importantes a considerar, son el tipo de síntoma, requerimiento nutricional, así como las características morfológicas tanto macro como microscopias que evidencien y que a su vez permitan la identificación Bioquímica y Molecular para su posterior clasificación. El aislamiento puede realizarse directamente de tejido rizosférico presente en el suelo fértil y en condiciones óptimas de crecimiento o a partir de material propagativo para confirmar la presencia o ausencia de microorganismo PGPR de interés.

En este artículo de revisión se pretende dar a conocer los diferentes tipos de bacterias PGPR especialmente las bacterias formadoras de Esporas (PGPR – FE), así como los mecanismos de acción y la eficacia y efectividad cuando son formulados en Inoculantes Microbianos, además, de algunas técnicas básicas de aislamiento, conservación e identificación de este grupo Bacteriano de gran importancia para la agricultura y sus aplicaciones; como las perspectivas y avances tecnológicos que se tiene para su posible identificación.

ESTADO DEL ARTE

Bacterias Aeróbicas Formadoras de Endospora (PGPR-FE)

El género *Bacillus* y algunos de sus relacionados, los cuales pertenecen al orden Bacillales, familia Bacillaceae. Están ampliamente distribuidas como saprofitas en gran variedad de suelos, aunque su

diversidad es mayor en las zonas rizosféricas (Garbeva *et al.*, 2002), también se encuentran en columnas y fondos de agua dulce y marina (Logan y Halket, 2011). Son cultivables en agar o caldos bacterianos, presentan células vegetativas, forma bastones, tienen diferentes tipos de agrupación dependiendo de la especie y son aerobias estrictos o anaerobias facultativos. Gram positivos, aunque las reacciones de tinción, incluso en cultivos jóvenes, puede ser Gram- variable o Gram-negativos (Sneath, 1984). Presentan flagelos peritricos, pero



su movilidad puede ser dependiente o independiente de flagelo y está en función de la quimiotaxis del ambiente (Berge et al., 2011).

Han desarrollado habilidades fisiológicas versátiles para su sobrevivencia, acidofílicas o alcalofílicas, termofílicas, sicrófilas y halófilas. Forman una estructura de resistencia a condiciones adversas del ambiente, la endospora que puede ser deformante o no con una espora por célula, durante su cultivo y asociadas a la formación de estas, se pueden formar cuerpos paraesporales con actividad plaguicida (Hofte y Whiteley, 1989). Tienen un sistema de comunicación de célula a célula, Quorum Sensing (QS), que les permite optimizar procesos durante la fase estacionaria, dando como respuesta un aumento en las densidades poblacionales. Forman Biofilms lo cual les permite mejorar funciones que podrían resultar ineficientes o imposibles para células individuales y tienen gran plasticidad genómica lo que les puede conferir ventajas selectivas, como la resistencia a los antibióticos, patogenicidad o adaptación a diferentes nichos (Berge et al., 2011).

Para la clasificación de las especies de este género se han usado varios métodos, los primeros se basan en caracterización morfológica y bioquímica utilizando técnicas convencionales (Sneath, 1984). En la actualidad, se hace identificación mediante secuenciación del gen ribosomal ARNr 16s, sin embargo, esta técnica tiene limitaciones en la resolución a nivel de especie, lo cual ha llevado a hacer identificaciones mediante técnicas moleculares más recientes y avanzadas como análisis multilocus, secuenciación del genoma y análisis de microarreglos (Logan y Halket, 2011).

Los inoculantes microbianos a base de PGPR-PGPR-FE

La expresión inoculantes microbianos es usada para referirse a todo el grupo de productos que contienen microorganismos capaces de impactar positivamente el desarrollo de las plantas, ya sea como biofertilizantes y/o biocontroladores (Fuentes y Caballero, 2006). Se han adelantado múltiples

estudios con hongos formadores de micorrizas, hongos controladores de plagas y enfermedades, bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno, hongos solubilizadores de fosfatos y PGPR (Banerjee et al., 2006). De esta forma se ha demostrado su potencial agrícola y se ha generado un interés en la industria para desarrollar productos comerciales de alta efectividad.

Desde hace dos décadas las PGPR han recibido considerable atención, debido a que son algunos de los habitantes más comunes de la rizosfera, son fáciles de aislar y cultivar, se pueden producir a gran escala ya que utilizan una amplia gama de sustratos, se les puede hacer manipulaciones genéticas (Raaijmakers et al., 2002) y se pueden caracterizar taxonómicamente sin dificultad. Además, tienen múltiples soportes como biofertilizantes, fitoestimuladores y/o biocontroladores tanto de plagas como de enfermedades (Banerjee et al., 2006).

En la actualidad hay un amplio grupo de bacterias PGPR que hacen parte potencial de inoculantes utilizados para la agricultura, en estas se encuentran especies principalmente de los géneros *Azospirillum*, *Bacillus* y *Pseudomonas*. En Colombia, donde la investigación sobre PGPR está apenas en sus inicios, se han encontrado algunas cepas con efectos interesantes sobre banano y crisantemo, como *Bacillus amyloliquefaciens* EA-CB0575 y *Bacillus subtilis* UA321, respectivamente. En ambos casos, estas cepas producen fitohormonas y han mostrado producción abundante de antibióticos que antagonizan con algunos fitopatógenos limitantes en cultivos, dando como resultado la promoción del crecimiento de las plantas (Moneada y Sierra, 2009; Rarmírez, 2008; Ramírez, 2012).

Sin embargo, para lograr la efectividad de un producto hay que elegir la cepa adecuada después de un largo trabajo de investigación. Los estudios en los métodos de aislamiento, caracterización bioquímica, morfológica, almacenamiento e identificación están más esclarecidos (Logan y

Halket, 2011; Sneath., 1984). De igual manera, estudios de escalonamiento masivo y comercialización han permitido que en la actualidad se encuentren en el mercado inoculantes bacterianos efectivos para la sanidad y mejora de los cultivos. Los estudios involucrados en los mecanismos de la promoción del crecimiento vegetal (Ramírez y Kloepper, 2011; Rodríguez y Fraga, 1999), aunque son varios y con avances importantes aún son contradictorios.

El producto formulado puede ser líquido, polvoso, sólido, en suspensión o granular (Banerjee et al., 2006), pero la formulación final debe mantener la viabilidad de la bacteria en el tiempo que transcurre, desde el momento de la formulación hasta su aplicación en campo. Por lo anterior, la producción industrial de inoculantes ha estado dominada por cepas pertenecientes al género *Bacillus* (Ramírez, 2010), el más representativo dentro del grupo de las PGPR-FE. La endospora les confiere una cualidad única, larga vida útil de más de un año, mínimo tiempo requerido tanto para el tratamiento de semillas biológicas comerciales como para la formulación, garantizando de esta forma una integración exitosa en el mercado agrícola (Driks, 2004; Kloepper et al., 2004).

Mecanismos de acción de los inoculantes a base de PGPR

Existen múltiples estudios tratando de dilucidar cuales son los mecanismos de acción por los cuales las bacterias PGPR ejercen su efecto benéfico sobre las plantas. Aunque ya se han hecho avances significativos al respecto, aún hay muchas publicaciones que son contradictorias y el panorama general es que aún falta mayor esclarecimiento. La evidencia in vitro de la producción de una hormona, un compuesto o una estructura benéfica, no significa necesariamente que el hallazgo es el mecanismo bacteriano directo, responsable de la respuesta vegetal y aunque es un avance significativo, no es la demostración que dicha propiedad bacteriana va a comportarse de igual manera y alcanzar los niveles deseados, generando

así el beneficio en la interacción (Asghar et al., 2002). Sin embargo, en la actualidad, dos mecanismos son discutidos: Directos e indirectos, en general los mecanismos directos son aquellos por los cuales las rizobacterias incrementan el crecimiento vegetal por medio de la producción de fitohormonas y/o la solubilización de minerales, mientras los mecanismos indirectos se refieren a la promoción del crecimiento como resultado de la supresión de enfermedades (Hassan et al., 1997). En este texto nos referiremos a uno y otro como biofertilización y biocontrol respectivamente.

Dentro de los mecanismos directos se tienen, la fijación de nitrógeno (N) por parte de bacterias diazotróficas de los géneros *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Herbaspirillum* y *Paenibacillus* (Vessey, 2003). No obstante, en experimentos recientes encontraron que bacterias del género *Azospirillum*, las cuales tienen históricamente reportes como fijadoras de nitrógeno, no siempre ayudan a la planta a fijar N y se sugiere en cambio que sus principales mecanismos en la promoción de crecimiento vegetal podría ser la producción de fitohormonas (Bashan y de-Bashan, 2010).

Con respecto a los mecanismos indirectos se conocen varios estudios donde se demuestra la capacidad de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal para controlar plagas y enfermedades indeseables para la planta. Una forma en que pueden ejercer dicho control, es mediante los mecanismos de resistencia sistémica inducida (ISR, por sus siglas en inglés), la producción de toxinas y antibióticos (Hernández et al., 2006).

Efectividad de los inoculantes en el biocontrol según el tipo de suelo

La introducción de bacterias específicas a los Suelos se ha realizado durante décadas, los principales objetivos de esta práctica son además de los ya expuestos, mejorar la estructura del suelo e intervenir en procesos de bioremediación y revegetalización (Ehrlich y Brierley, 1980). No obstante, el suelo forma un ambiente muy

heterogéneo e impredecible, donde factores bióticos y abióticos juegan un rol fundamental en el establecimiento de las bacterias introducidas. El nicho ecológico de organismos vivos que intervengan en las bacterias inoculadas, lo cual puede incluir competencia por sitios nutricionalmente favorables, especialmente fuentes de carbono orgánico provenientes de los exudados de la semilla o la raíz (Brown, 1974), secreciones vegetales inhibidoras para el microorganismo y relaciones de antagonismo y predación (Van Veen et al., 1997).

De esta forma, las PGPR-FE que se inoculen tendrán que ser capaces de encontrar nichos adecuados, en los cuales puedan hacer frente a condiciones adversas y fluctuantes. Es por ello la importancia de conocer cada uno de los factores Bióticos y Abióticos que conlleva el aislamiento, conservación e identificación de diferentes tipos bacterianos de importancia agrícola; ya que a su vez son los precursores de formulaciones de inóculos y/o biofertilizantes que serán aplicados al suelo, con niveles de eficiencia y eficacia capaces de recuperar un suelo o simplemente controlar plagas y enfermedades que aquejan el desarrollo fisiológico de los cultivos.

Formulación y desarrollo de Bioinsumos

1. Aislamiento, Conservación y Preservación

El aislamiento de bacterias implica la obtención y separación de estas cepas beneficiosas del suelo o de las raíces de plantas sanas. Es importante conocer y elegir la fuente de la que desea aislar las bacterias PGPR, como el suelo de un campo agrícola o las raíces de plantas saludables. La recolección de las muestras de suelo o raíces utilizando herramientas estériles para evitar la contaminación.

Ya en el laboratorio Dilución para el aislamiento se realiza bajo métodos tradicionales de diluciones seriadas, en soluciones estériles y extiende las

diluciones en placas de agar selectivo, como el agar King B o el agar R2A. La incubación se debe realizar a la temperatura adecuada (generalmente alrededor de 28-30°C) durante unos días, que permita observar en las placas y seleccionar colonias que parezcan ser bacterias PGPR, basándose en características como la morfología macroscópica y microscópica de la colonia y el color como parámetros cualitativos iniciales para su identificación y aislamiento (Rojas, 2011).

Las diferentes pruebas de promoción de crecimiento conllevan a suplementar los medios de cultivo con fuentes de fósforo (P) con el fin de conocer si son solubilizadoras de fosfatos, medios libres de nitrógeno, producción de sideróforos y medios con actividad lítica como celulasas, proteasas, amilasa, lipasas entre otros que permitan confirmar la actividad PGPR. Una vez previamente identificadas se procede a la conservación de las cepas aisladas (Rodríguez, 2006).

La conservación de bacterias PGPR (Promotoras del Crecimiento de Plantas) es fundamental para mantener estas cepas beneficiosas viables a lo largo del tiempo. Las técnicas más comunes de conservación para este tipo de bacterias radican en procesos de Refrigeración que permite almacenar las cepas a una temperatura de 4°C es adecuado para la conservación a corto plazo, generalmente hasta un par de meses las cepas se mantienen en agar sólido o en caldo de cultivo con baja concentración de nutrientes. (Schaad et al. 2001). La Congelación es un método de conservación a largo plazo, se pueden almacenar las cepas en un ultracongelador a -80°C, las cepas se mantienen en un medio con crioprotectores como glicerol, aceite mineral, leche descremada, soluciones de glucosa o fructosa o dimetilsulfóxido (DMSO) que ayudan a evitar daños por congelación. Por otro lado, la liofilización es una técnica y/o método de conservación que implica la eliminación del agua de las bacterias, lo que las hace una técnica altamente estable a temperatura ambiente. Las cepas liofilizadas se almacenan en viales sellados herméticamente y su periodo de conservación puede

durar más de un año si las condiciones de almacenamiento se cumplen con los protocolos establecidos. La elección de la técnica de conservación depende de la duración prevista de la conservación y de los recursos disponibles. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas, por lo que es importante seleccionar la más adecuada para sus necesidades. Además, es esencial mantener registros precisos de las cepas, incluyendo información sobre su origen, características y métodos de conservación.

2. Identificación y clasificación

La identificación de este tipo de bacterias implica determinar la identidad y características específicas de estas cepas beneficiosas, los métodos primarios más comunes de identificación se atribuye a los Fenotipos de las colonias, estos métodos se basan en las características macroscópicas observables de las colonias como su tamaño, tipo de colonia, textura, color, apariencia y hemólisis de los medios de cultivo; la morfología microscópica de las colonias, se observa con procesos de tinción de Gram, movilidad y características de crecimiento en diferentes medios (German Bou et al., 2011). Las pruebas bioquímicas, se realizan para identificar características bioquímicas específicas, como la capacidad de solubilizar fosfato, fijación de nitrógeno, producción de sideróforos y producción de enzimas beneficiosas para las plantas. Dentro de esta gama de pruebas tenemos pruebas en tiempo real no mayor a 6 horas como Catalasa y oxidasas, hidrólisis del hipurato, β -galactosidasa, aminopeptidasas, urea, prueba del indol entre otras; a su vez test o ensayos bioquímicos que requieren un proceso y periodo de incubación de 24 a 48 horas que permita llevar a cabo procesos de oxidación – reducción fermentativo de los medios, en las que encontramos pruebas bioquímicas como Voges Proskauer, Caldo de Nitratos, medio con agar almidón, medio calcio caseína, citratos, malonatos, prueba de la gelatina, lipasa, coagulasa y fermentación de azúcares (monosacáridos).

Existen en el mercado diferentes test de identificación bioquímica cualitativos y automatizados, pero en su mayoría por no decir que en un 90% son aplicables a cepas de características patógenas o de origen clínico, sin embargo, la naturaleza misma del microorganismo y su memoria metabólica podría ayudar al desarrollo específico de pruebas o test propios para bacterias PGPR. Entre este tipo de pruebas cualitativas encontramos sistemas API de la empresa Biomerieux, Enterotube de BBL, Oxi/Ferm de BD, RapID y Micro ID de Remel – Oxoid que en muchas ocasiones solo permiten una clasificación del 90 – 95% a Género sp., y sistemas automatizados como Vitek, MicroSCAN, ABT, Pasco, Phoenix que atribuyen una clasificación de Género y especie hasta en un 95%. Este tipo de pruebas son probables, más no definitivas en el proceso de identificación.

Dentro de las características genotípicas específicas los métodos moleculares con marcadores genéticos son los más utilizados y empleados que permiten una identificación del grupo bacteriano PGPR en Género y especie hasta en un 99,5%. La secuenciación de genes específicos, como el gen 16S rRNA para bacterias, puede proporcionar información genética para la identificación precisa. (German Bou et al., 2011). La secuenciación del gen 16S rRNA es especialmente común para la identificación bacteriana. La hibridación de ADN permite identificar cepas específicas utilizando sondas de ADN complementario que se unen a secuencias de genes específicos en el ADN de la bacteria. Y dentro de estas técnicas moleculares incluyen la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y la electroforesis en gel para analizar fragmentos de ADN específicos.

También se pueden utilizar técnicas más avanzadas, como la secuenciación de nueva generación (NGS) para obtener información detallada sobre el genoma de la bacteria. Hoy por hoy existen bancos de genes como GenBank NCBI y software avanzado como el Ribosomal Database Project (RDP), BLAST y BIBI que contienen la secuenciación de millones de microorganismo identificados y clasificados según

géneros y especies. En este caso cuando un microorganismo o grupo bacteriano PGPR no es identificado se podría decir que es una nueva especie aislada, conservada e identificada. (German Bou et al., 2011).

Es por ello que la identificación precisa de bacterias PGPR es esencial para comprender sus características y aplicaciones en la agricultura. La combinación de múltiples técnicas puede proporcionar una identificación más completa y precisa de estas cepas beneficiosas. Es importante llevar a cabo este proceso en condiciones de laboratorio estériles y documentar adecuadamente los pasos para garantizar la pureza de las cepas de PGPR aisladas. Estas cepas pueden utilizarse posteriormente en aplicaciones agrícolas para mejorar el crecimiento y la salud de las plantas.

Una vez conocidas estas cepas PGPR, se procede al desarrollo y registro de los diferentes inóculos bacterianos como Biofertilizantes, que cumplen el control y el aseguramiento de la calidad como uno de los principales factores en el proceso de producción y comercialización de biofertilizantes, pues permite asegurar la eficacia del producto a los consumidores finales (Benintende, 2010; Herrmann & Lesueur, 2013; Lupwayi et al., 2000; Vessey, 2003; Young, 2007).

En la actualidad, existen en el mercado productos a base de bacterias PGPR o sus compuestos activos con características Bioestimulantes, Biofertilizantes y acondicionadores de suelos; que llevan a la rizosfera nutrientes naturales que ayudan al rendimiento y crecimiento de los cultivos, a la estructura física y química del suelo, a la protección integral frente al ataque de plagas y enfermedades y al equilibrio biológico con la absorción y mejora de nutrientes. ***¿Pero cuál podría ser el futuro de los Biofertilizantes a base de PGPR?*** Se podría pensar en la nanotecnología para el desarrollo de nanofertilizantes a base de bacterias PGPR (Promotoras del Crecimiento de Plantas) ya que son una innovación en la agricultura que combina los beneficios de los PGPR con tecnología de

nanomateriales. Estos nanofertilizantes tienen como objetivo mejorar la eficiencia de entrega de los PGPR a las plantas.

Procesos como la Formulación de Nanofertilizantes donde se utilizan nanomateriales, como nanopartículas de sílice, para encapsular o cargar las bacterias PGPR., ayuda a proteger las bacterias y facilita su liberación controlada. Brindar una mayor estabilidad que ofrecen protección a las bacterias PGPR, lo que les permite sobrevivir mejor en el suelo y en condiciones ambientales adversas. La tecnología de nanomateriales permite una liberación gradual de las bacterias PGPR, lo que garantiza una interacción prolongada con las raíces de las plantas y una mayor eficacia. Mejoran la absorción y la capacidad de las plantas para absorber nutrientes del suelo, lo que lleva a un mejor crecimiento y rendimiento. Ayudan a la reducción del uso de fertilizantes químicos lo que es beneficioso para el medio ambiente y la sostenibilidad agrícola. Es importante señalar que esta tecnología es relativamente nueva y está en constante evolución. La investigación y el desarrollo continuos son necesarios para optimizar la eficacia y la seguridad de los nanofertilizantes a base de bacterias PGPR, así como para comprender su impacto en el medio ambiente.

CONCLUSIONES

Las bacterias PGPR representan una herramienta valiosa para el aumento de la productividad agrícola, la reducción de la dependencia de productos químicos y la promoción de la sostenibilidad en la agricultura. Su estudio y aplicación siguen siendo temas importantes en la investigación agrícola y el desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Las bacterias PGPR tienen la capacidad de mejorar la salud y el crecimiento de las plantas al promover la absorción de nutrientes, controlar patógenos, y ayudar a tolerar el estrés abiótico. La utilización de bacterias PGPR puede reducir la necesidad de fertilizantes químicos y pesticidas, lo que

contribuye a la agricultura sostenible y a la conservación del medio ambiente.

El aislamiento y la identificación precisos de cepas PGPR son fundamentales para su aplicación efectiva en la agricultura.

La formulación de nanofertilizantes y productos bioestimulantes a base de bacterias PGPR promete mejorar aún más su eficacia en la promoción del crecimiento de las plantas. Por ello, la investigación en el campo de las bacterias PGPR está en constante evolución, lo que significa que seguimos descubriendo nuevas cepas y aplicaciones para mejorar la agricultura.

REFERENCIAS

1. Banerjee, M.R., L. Yesmin y J.K. Vessey. 2006. Plant growth-promoting rhizobacteria as biofertilizers and biopesticides. p. 137-181. En: (ed.). R. M. K. (ed.). Handbook of microbial biofertilizers. Food Products Press. New York.
2. Berge, O., P. Mavingui y T. Heullin. 2011. Exploring Diversity of Cultivable Aerobic Endospore-forming Bacteria: From Pasteurization to Procedures Without Heat-Shock Selection. En: Logan N. A. y vos P. d. (eds). Endospore forming soil bacteria, Vol. 27. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York.
3. Brown, M.E. 1974. Seed and root bacterization. Annual Review of Phytopathology 12, 181-197.
4. Ehrlich, H.L. y C.L. Brierley. 1980. Microbial mineral recovery. New York. p.
5. Enfermedades de las plantas: Manejo biológico: 101-131.
6. Fuentes, R.L. y M.J. Caballero. 2006. Bacteria Biofertilizers. p. 143 - 145. En: Siddiqui Z. A. (ed.). PGPR: Biocontrol and Biofertilization. Springer. Netherlands.
7. Garbeva, P., J.A. Van Veen y J.D. Van Elsas. 2002. Predominant *Bacillus* spp. in Agricultura! Soil under Different Management Regimes Detected via PCR-DGGE, pp. 302-316 Microbial Ecology, Vol. 45, New York.
8. Germán Bou, Ana Fernández-Olmos, Celia García, Juan Antonio Sáez-Nieto, Sylvia Valdezate, Métodos de identificación bacteriana en el laboratorio de microbiología, Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica, Volume 29, Issue 8, 2011, Pages 601-608, SSN 0213-005X.
9. Hassan, G., M.Y. Zargar y G.M. Beigh. 1997. Biocontrol of Fusarium Root Rot in the Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by using Symbiotic *Glomus mosseae* and *Rhizobium leguminosarum* 1. Microb. Ecol 34, 74-80.
10. Hernández, F.D., A. Aguirre, R.H. Lira, E. Guerrero y G. Gallegos. 2006. Biological efficiency of organic. Biological and chemical products against *Alternaria dauci* Kühn and its effects on carrot crop. International Journal of experimental botany 75, 91-101.
11. Hofte, H. y H.R. Whiteley. 1989. Insecticidal crystal proteins of *Bacillus thuringiensis*. Microbiological Reviews 53, 242-255. Raaijmakers, J.M., M. Vlami y J. De Souza. 2002. Antibiotic production by bacteria biocontrol agents, Wageningen University. 537-544 p.
12. Logan, N.A. y G. Halket. 2011. Developments in the Taxonomy of Aerobic, Endospore-forming Bacteria. p. 1-29. En: Logan N. A. y P. de vos (eds).
13. Endospore forming soil bacteria, Vol. 27. soil biology ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York.
14. Moneada, R. y L. Sierra. 2009. Purificación y caracterización parcial de extractos de *Bacillus subtilis* UA321 activos contra *Mycosphaerella fijiensis*, EAFIT, Medellín, Antioquia, Colombia. p.
15. Nakkeeran, S., F.W. Dilantha y Z.A. Siddiqui. 2006. Plant growth promoting

rhizobacteria formulations ood its scope in cornmercialization far the management of pests and diseases. p. 297. En: Siddiqui Z. A. (ed.). PGPR: Biocontrol and Biofertiliz,ation. Springer. Netherland:s.

16. Ramírez, M.C. 2008. Rizobacterias asociadas a crisantemo (*Dendrathera grandiflora*. Tevelev), Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia. p.50
17. Ramírez, C.A. y J.W. Kloepper. 2011. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.
21. Rojas, T. A. (2011). Manual de Microbiología Conceptos y Práctica de
22. Schaad, N. W., Jones, J. B. y Chun, W. (2001). Laboratory Guide for Identification of Plant Pathogenic Bacte-ria (3a ed.). APS PRESS, St. Paul Minnesota.
23. Sneath, P.H. 1984. Endospore forming gram positive rods and cocci. p. 1114. En: Sneath P. H. (ed.). Bergey's Manual of Systematic bacteriology, Vol. 2. Williams & Wilkins. Baltimore.
18. Ramírez, M.C. 2012. Bacterias asociadas a raíces de *Musa spp.*: densidad poblacional y potencial promotor de crecimiento vegetal Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia. p.
19. Rodriguez, H. y R. Fraga. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. Biotechnology Advances 17, 319-339.
20. Rodríguez, M. M. L. (2006). Manual para la identificación de bacterias fitopatógenas. Departamento de Parasi-tología Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Microbiología General. Universidad Nacional de Colombia.
24. Van Veen, J.A., L.S. Van Overbeek y J.D. Van Elsas. [1997. Fate and activity of microorganisms introdu,ced into soil. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 61(2), 121.
25. Vessey, J.K. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. Plant and Soil 255, 571-586.