



Research article

http://revistasdigitales.utelvt.edu.ec/revista/index.php/investigacion_y_saberes/index

Plantas y microorganismos rizosféricos: Una vía sostenible para generar crecimiento vegetal

Plants and rhizospheric microorganisms: A sustainable way to generate plant growth



Enviado (12.08.2020)

Aceptado (22.02.2021)

RESUMEN

En la rizósfera ocurren varias relaciones entre las raíces de las plantas y microorganismos que en su mayoría son beneficiosas. Varias investigaciones exploran las ventajas de una mejoría en la nutrición mineral de las especies vegetales que se deriva de varios aspectos como la fijación biológica de nitrógeno atmosférico, la solubilización de fosfatos y una estructura radicular aumentada por la producción de hormonas de crecimiento vegetal. El presente trabajo tiene como objetivo estudiar las relaciones entre plantas y microorganismos rizosféricos, particularmente los mecanismos que generan una promoción sostenible del crecimiento vegetal. La metodología refiere a una investigación descriptiva-documental, se recopilaron los datos más relevantes publicados en los últimos diez años sobre las actividades en la rizósfera y los organismos directamente involucrados. Los hallazgos de esta investigación muestran que existen microorganismos rizosféricos en una amplia gama de especies vegetales. A lo largo de años de evolución, plantas y microorganismos han desarrollado una vía de reconocimiento. La relación que los involucra genera un nicho y alimento para los microorganismos, y para las plantas un aumento en los nutrientes disponibles, producción exógena de hormonas, una barrera adicional en la defensa contra patógenos y factores abióticos adversos.

Palabras clave: microorganismos, rizósfera, crecimiento vegetal

Lorena E Ona Yanez

Master of Molecular Biology. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Técnica "Luis Vargas Torres" de Esmeraldas – Ecuador.
Correo: lorena.ona@utelvt.edu.ec.
orcid.org/0000-0001-5958-9057

Revista Científica Interdisciplinaria
Investigación y Saberes
Vol. – 11 No. 3
Septiembre - Diciembre 2021
e-ISSN: 1390-8146
102-124



eISSN: 1390-8146

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/La>

ABSTRACT

In the rhizosphere, several relationships occur between the roots of plants and microorganisms that are mostly beneficial. Several investigations explore the advantages of an improvement in the mineral nutrition of plant species derived from various aspects such as the biological fixation of atmospheric nitrogen, the solubilization of phosphates and a root structure increased by the production of plant growth hormones. The present work aims to study the relationships between plants and rhizospheric microorganisms, particularly the mechanisms that generate a sustainable promotion of plant growth. The methodology refers to a descriptive-documentary research, the most relevant data published in the last ten years on the activities in the rhizosphere and the organisms directly involved were collected. These findings show that rhizospheric microorganisms exist in a wide range of plant species. Over the years of evolution, plants and microorganisms have developed a path of recognition. The relationship that involves them generates a niche and food for microorganisms, and it means an increase in available nutrients, exogenous production of hormones, an additional barrier in defense against pathogens and adverse abiotic factors for plants.

Keywords: microorganism, rhizosphere, plant growth

1. Introducción

La zona aledaña a las raíces de las plantas se denomina rizósfera, este es un ambiente particular donde ocurren una serie de interacciones entre las raíces de las plantas y microorganismos. Estas relaciones pueden tener un impacto positivo o negativo en las plantas en función del tipo de microorganismo, se han descrito tanto a patógenos como microorganismos beneficiosos, y son estos los que mayor interés despiertan por su uso potencial como bioestimulantes del desarrollo vegetal (Avilés-García, Flores-Cortez, Hernández-Soberano, Santoyo y Valencia-Cantero, 2016). Las relaciones que se establecen en la rizósfera no son recientes y muestran un largo período de evolución en el cual las partes involucradas han desarrollado habilidades que han mejorado su capacidad adaptativa (Velasco-Jiménez, Castellanos-Hernández, Acevedo-Hernández, Aarland y Rodríguez-Sahagún, 2020). Estas relaciones son de tipo simbiótico donde las plantas pueden experimentar un mejor crecimiento, para este efecto destinan en promedio un 20% de los productos de fotosíntesis que son entregados a estos microorganismos a modo de compensación (Velasco-Jiménez et al., 2020).

Las especies de plantas en las que se han encontrado este tipo de relaciones es muy amplia y no se centra en una sola familia o género. Las investigaciones se iniciaron en especies vegetales de interés agronómico y los hallazgos apuntan a que se pueden emplear estos microorganismos son una alternativa para potenciar la producción vegetal sin el uso de compuestos químicos y sin el impacto ambiental y el daño a la salud de los consumidores que estos productos implican (Arriaga et al., 2009; Marín et al., 2014). Las investigaciones abarcan una amplia gama de especies vegetales en cuyas rizósferas se han encontrado y caracterizado microorganismos promotores del crecimiento vegetal, como por ejemplo especies ornamentales de interés comercial y especies que viven en climas áridos y que tienen importancia ecológica. (Arriaga et al., 2009; Chávez-Ambriz, Hernández-Morales, Cabrera-Luna, Luna-Martinez y Pacheco-Aguilar, 2016).

Por otro lado, en el caso de los microorganismos involucrados en este tipo de relaciones si se han identificado ciertos géneros, que están ampliamente distribuidos en las rizósferas de especies vegetales, como: Azospirillum, Pseudomonas, Citrobacter, Bacillus (Chávez-Ambriz et al., 2016). De igual manera existen otros géneros cuya distribución es reducida debido a que existe cierto grado de especificidad al momento de relacionarse con una y otra especie vegetal. El reconocimiento entre plantas y microorganismos está mediado por señales químicas que son emitidas por las raíces (Velasco-Jiménez et al., 2020).

Muchos de los sistemas productivos vigentes usan, como primera alternativa, fertilizantes químicos para nutrir sus cultivos y pesticidas químicos para proteger y asegurar una producción rentable (Dhayalan y Karuppasamy, 2021). No existen mecanismos sostenibles, ampliamente difundidos entre los productores, para generar crecimiento vegetal y ayudar a las plantas a hacer frente al ataque de factores bióticos y abióticos. También es importante resaltar la existencia de un problema de conocimiento en este ámbito, ya que la información producida desde lo teórico y empírico es deficiente, esta investigación se orienta a generar una discusión teórica para obtener un lineamiento del abordaje de la realidad.

En los últimos años, se inició con el uso de microorganismos en campo, hoy existen productos biodegradables disponibles comercialmente con el afán de aumentar la producción e incluso como controladores biológicos de plagas y enfermedades (Marín et al., 2014). Muchos microorganismos se comercializan como biofertilizantes con diversos fines, sin embargo, hay que tomar en cuenta que su habilidad para subsistir y generar el resultado esperado depende mucho

de la rizósfera donde sean inoculados y las comunidades propias de dicha zona (Avilés-García et al., 2016).

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar las relaciones entre plantas y microorganismos rizosféricos, particularmente los mecanismos que generan una promoción sostenible del crecimiento vegetal, y constituye un derivado del proyecto de investigación titulado “Evaluación del Comportamiento de Cascol (*Libidia corymbosa*) a la aplicación de microorganismos rizosféricos con fines a mejorar su producción en vivero”, financiado por el Vicerrectorado de Investigación y Postgrado de la Universidad Técnica de Esmeraldas “Luis Vargas Torres”.

2. Materiales y métodos

La metodología de este trabajo empleó una investigación descriptiva documental de datos bibliográficos relevantes de los últimos 10 años al respecto de plantas que mantienen interacciones a nivel rizosférico con microorganismos, el impacto de estos en el crecimiento vegetal, los beneficios que obtienen las plantas de este tipo de relaciones y el modo en el que estas interacciones pueden ser aprovechadas en sistemas de producción sostenible.

3. Resultados

3.1 Plantas y sus necesidades durante el crecimiento vegetal

Las plantas son organismos con la capacidad de transformar la energía solar en energía química que puede ser distribuida hacia otras formas de vida, a través del proceso de fotosíntesis. Por su capacidad de fabricar carbohidratos durante la fotosíntesis no requieren de una fuente de alimento y se encuentran en la base de la cadena trófica como proveedoras de alimento para otros organismos vivos (Velasco-Jiménez et al., 2020).

El proceso de fotosíntesis requiere una serie de materias primas, la más importante es el carbono con el que se producen los fotoasimilados, carbohidratos producto del proceso de fotosíntesis. El carbono se toma desde la atmósfera en forma de dióxido de carbono. Además de este, el hidrógeno que se absorbe en forma de agua y los demás elementos minerales son las piezas que se requieren para generar crecimiento en las plantas (Medrano, Galmés y Flexas,

2013). Los minerales se toman desde el suelo en forma de una solución salina, estos son indispensables para mantener la biomasa de la planta y para crecer (Fernández, García y Maldonado, 2013). De ahí que los procesos de absorción a nivel de raíz son claves para mantener un crecimiento activo y que cualquier detrimento en la toma de agua y nutrientes impacta negativamente en el crecimiento o la producción de especies vegetales.

La ciencia detrás de la nutrición mineral estableció hace más de un siglo el grupo de minerales que se consideran como elementos esenciales para la generalidad de las plantas. Son 17 minerales que se clasifican en dos grupos, macronutrientes y micronutrientes, de acuerdo con las cantidades que son requeridas por las plantas para sustentar su desarrollo. El grupo de los macronutrientes incluye al carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno que pueden llegar a representar hasta el 95% del peso seco de las plantas. Junto con estos también se incluyen al fósforo, el azufre, el potasio, magnesio y el calcio. En el grupo de los micronutrientes se ha incluido al hierro, el manganeso, el zinc, el cobre, el boro, el molibdeno, el cloro y el níquel (Bonilla, 2013).

Los macronutrientes son importantes pues constituyen piezas fundamentales para la construcción de las principales biomoléculas y eso justifica las cantidades en las que estos se hacen necesarios (Bonilla, 2013). La toma de carbono, hidrógeno y oxígeno no representan mayor dificultad. Por otro lado, uno de los minerales que suelen ser limitantes para el crecimiento es el nitrógeno y también se han identificado dificultades derivadas de la falta de fósforo y azufre (Jacoby, Peukert, Succurro, Koprivova y Kopriva, 2017). De hecho, el nitrógeno está considerado como el nutriente de mayor importancia para especies vegetales (Quemada, Mateos, Mateos y Villalobos, 2017). Otro macronutriente importante para el funcionamiento y desarrollo de las plantas es el fósforo. Este elemento forma parte de una de las moléculas más importantes en materia viva, el Adenosin Trifosfato (ATP), una molécula que almacena y transporta energía dentro de la célula (Anfarita, Lestari, Murwani y Higuchi, 2017). Adicionalmente, está involucrado en procesos de división celular, producción de macromoléculas, metabolismo respiratorio y fotosíntesis (Bonilla, 2013).

Cada mineral de los que se consideran como esenciales para el desarrollo vegetal cumple con funciones específicas y que no pueden ser llevadas a cabo por otros

minerales, este hecho resalta la necesidad que tienen las plantas de tener acceso a todos estos nutrientes para garantizar un crecimiento y una producción adecuadas. Los microorganismos rizosféricos solventan muchos de los inconvenientes y facilitan el suministro de minerales hacia la planta, de ahí que estas asociaciones sean claves para sustentar un activo crecimiento vegetal.

3.2 Microorganismos rizosféricos aliados invisibles de las plantas

Los microorganismos rizosféricos engloban un conjunto de hongos y bacterias capaces de colonizar y desarrollarse en la porción de suelo más cercana a la raíz, o también denominada rizósfera. La mayoría de estos microorganismos inciden positivamente en el crecimiento y producción de las plantas de modo directo e indirecto. Entre los mecanismos directos se pueden mencionar a la fijación de nitrógeno, la solubilización de fosfatos y la producción de hormonas del crecimiento vegetal. Los mecanismos indirectos incluyen la competencia con fitopatógenos, cuya vía de ingreso es la raíz, y la asistencia para superar factores de estrés abiótico (Velasco-Jiménez et al., 2020).

En la rizósfera de las plantas no solo habitan un tipo de microorganismos, más bien lo que ocurre es que se forman verdaderas comunidades, llamadas microbiomas, que se encargan de asociarse a las raíces de las plantas y desencadenar una serie de eventos. La composición de estos microbiomas dependerá de la especie vegetal, así como de factores asociados al suelo como: el pH, la textura, la estructura, el contenido de materia orgánica y nutrientes minerales. Se ha documentado que estas características del suelo pueden afectar la acción de los exudados radiculares, que contienen señales químicas que reclutan microorganismos hacia las raíces de modo específico. De hecho, los exudados constituyen la manera que han encontrado las plantas para llamar a los microorganismos con los que han evolucionado y generado un vínculo particular (Lareen, Burton y Schafer, 2016). El suelo no solo puede afectar la composición de los microbiomas sino también la cantidad de microorganismos presentes, suelos mineralizados contienen cantidades menores de microorganismos. En términos generales se conoce que suelo ricos en materia orgánica y de naturaleza franca albergarían microbiomas más diversos y abundantes. Junto con esto, se debe recordar que a través de los exudados las plantas reclutan comunidades microbianas hacia sus rizósferas pero solo tendrán a su disponibilidad las especies microbianas, que el suelo en el que crecen, alojen en ese momento (Gaiero et al., 2013).

La rizósfera es una zona de mucha actividad biológica donde habitan diferentes especies de microorganismos que son atraídos hasta las raíces de las plantas. El tipo y la cantidad de microorganismos disponibles está en función del suelo y de sus características, la función que desempeñen estos microorganismos siempre deberá orientarse hacia contribuir a un crecimiento vegetal adecuado para ser catalogados como potenciales biofertilizantes.

3.3 Plantas y microorganismos rizosféricos, una conexión bajo tierra

Existen varios factores que inciden en las relaciones planta – microorganismo en la rizósfera. Se ha descrito que las plantas liberan exudados a través de sus raíces que afectan el microbioma de su rizósfera (Gaiero et al., 2013). Previamente se mencionó que otro factor para tomar en cuenta es la composición del suelo que también incide en la clase de microorganismos con capacidad de proliferación. Hasta ahora se han identificado ciertos géneros de microorganismos que están ampliamente distribuidos como *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Citrobacter*, *Bacillus* (Chávez-Ambriz et al., 2016) y otros que se han encontrado en las rizósferas de un número más restringido de plantas y también promueven el desarrollo vegetal como *Acidithiobacillus*, *Aminobacter*, *Arthrobacter*, *Azoarcus*, *Azotobacter*, *Burkholderia*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Gluconoacetobacter*, *Serratia* y *Sphingomonas* (Velasco-Jiménez et al., 2020).

Para las plantas, el relacionarse con microorganismos a nivel de raíz hace la diferencia entre poder acceder a nutrientes minerales y no poder hacerlo. En el suelo, los átomos de nitrógeno, fósforo y azufre se encuentran unidos fuertemente a las partículas sólidas. Además, la mayor fuente de nitrógeno es la atmósfera y no existe especie vegetal que pueda tomar nitrógeno gaseoso para convertirlo a formas orgánicas o inorgánicas. Contradictoriamente, los microorganismos si pueden hacer uso de formas minerales no disponibles para las plantas, ellos liberan los átomos retenidos y los dejan disponibles para su absorción por parte de las plantas una vez que mueren, se lisan y liberan todo el contenido de su citoplasma en la rizósfera (Jacoby et al., 2017).

Para los microorganismos, la mayor limitante para su crecimiento en el suelo es el acceso a compuestos orgánicos que constituyen su alimento como, por

ejemplo: azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos. Adicional a conseguir un hábitat en la rizósfera, el principal beneficio que obtienen los microorganismos de asociarse a las plantas es el libre acceso a estos compuestos. Las raíces de las plantas liberan estas moléculas en su rizósfera, en un proceso denominado rizodeposición, dejándolas libre para que los microorganismos se alimenten sin problemas. Estimaciones indican que una planta puede liberar hasta el 30% del carbono que ha fijado a través de la fotosíntesis para alimentar a los microbiomas de sus rizósferas. La desventaja es que una zona de suelo rica en nutrientes no solo llama la atención de microorganismos benéficos, también puede atraer patógenos. Investigaciones han demostrado que, para evitar ser susceptibles a nivel de raíz, las plantas incluyen en sus exudados otros compuestos como: los flavonoides, estrigolactonas o terpenoides. Estas moléculas son parte de una estrategia de comunicación que llama la atención, específicamente, de aquellos microorganismos que la planta necesita en su rizósfera, esto indica que es la planta la que modela el microbioma de su rizósfera (Jacoby et al., 2017).

Se ha reportado que existen vías de comunicación entre los diferentes miembros de los microbiomas y las raíces de las plantas. Tanto bacterias como las raíces emiten ciertos compuestos orgánicos a manera de señales químicas que orquestan cambios en su contraparte, tan radicales como la expresión génica; el objetivo es trabajar juntos para beneficio mutuo y para impedir que organismos patógenos ingresen en la rizósfera, alteren el equilibrio y provoquen enfermedades (Lareen et al., 2016).

Las investigaciones sobre estas relaciones se iniciaron en especies vegetales de interés agronómico y los hallazgos apuntan a que se pueden emplear estos microorganismos para potenciar la producción vegetal sin el uso de compuestos químicos, sin el impacto ambiental y el daño a la salud de los consumidores que estos productos implican (Arriaga et al., 2009; Marín et al., 2014). Las investigaciones abarcan una amplia gama de especies vegetales en cuyas rizósferas se han encontrado y caracterizado microorganismos con habilidades interesantes para promover el crecimiento vegetal, en la siguiente tabla se resumen algunos resultados de investigaciones en este campo:

Tabla 1
Relaciones planta-microorganismo y sus beneficios

Especie de microorganismo	Especie vegetal	Beneficios	Referencia
<i>Arthrobacter agilis</i> (cepa UMCV2)	Maíz (<i>Zea mays</i>)	Colonizan la raíz del maíz y facilitan la absorción del hierro (Fe), reducen el hierro, lo que aumenta su solubilidad y facilita su movilización hacia el interior de la planta.	(Avilés-García et al., 2016)
<i>Arthrobacter agilis</i> (cepa UMCV2)	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	Bacteria genera dimetilhexadecilamina (DMHDA) a nivel de raíz, un compuesto volátil que estimula la elongación de tejidos y aumenta la producción de biomasa. In vitro, la bacteria promovió la formación de raíces laterales e inhibió el desarrollo de la raíz primaria. En otros ensayos in vitro, la bacteria es capaz de inhibir el crecimiento de patógenos como <i>Botrytis cinerea</i> y <i>Phytophthora cinnamomi</i> en bajas concentraciones. También promueve el crecimiento de hongos benéficos como <i>Trichoderma virens</i> y <i>Trichoderma atroviride</i> al ser usada en concentraciones altas.	(Velázquez-Becerra et al., 2011; 2013)
<i>Streptomyces laurentii</i> (cepa EU-LTW ₃ -69))	Sorgo (<i>Sorghum bicolour</i> L.)	Incrementan en la acumulación de osmolitos como: glicina, betaína y azúcares; aumentaron también el contenido de clorofila y redujeron la peroxidación de lípidos, efectos que ayudan a superar estrés hídrico	(Kour et al., 2020)
<i>Sinorhizobium, Azospirillum y Rhizobium</i>	Pimentón (<i>Capsicum annuum</i> L. var. Cacique Gigante) (pimentón)	Solubilizan fosfatos, generar Ácido Indolacético (AIA) a nivel de raíz y con ello incrementar el tamaño de la parte subterránea de la planta y además lograron incrementar los índices de germinación in vitro en pimentón	(Marquina, Ramírez y Castro, 2018)
<i>Glomus fasciculatum</i> y <i>Bacillus subtilis</i>	Lirio (<i>Lilium</i> sp)	Mejoran crecimiento de raíces, tallo, acumulación de biomasa, aceleran el período de floración, aumentan el tamaño de la flor, su peso seco, el tiempo de vida útil e incrementan en el contenido de otros minerales como zinc (Zn), cobre (Cu) y hierro (Fe) en las plantas tratadas.	(Arriaga et al., 2009)
<i>Bacillus</i>	Cactus (<i>Mammillaria magnimamma</i> y <i>Coryphantha radians</i>)	Disminuyen los tiempos de germinación y mejoran el proceso de floración pues aumentan el porcentaje de plantas que pueden entrar en etapa reproductiva y con ello facilitan la reproducción de estas especies	(Chávez-Ambriz et al., 2016)
<i>Lysobacter, Kaistobacter y Pontibacter</i> (acumuladores de metales pesados) <i>Flavisolibacter, Adhaeribacter y Bacillus</i> (promotores del crecimiento vegetal)	Trébol (<i>Trifolium repens</i> L.)	Contribuyen a la acumulación de metales pesados en la planta como cromo, cadmio y plomo. Si bien la acumulación afecta el crecimiento vegetal permite el uso potencial de la planta para fitorremediación. Las bacterias promotoras contribuyeron a aumentar la materia orgánica, el nitrógeno y el fósforo disponible en el suelo para las plantas y así compensar los efectos de la acumulación de metales pesados.	(Lin, Liu, Li y Dong, 2021)

La tabla 1 resume los hallazgos más sobresalientes encontrados en diferentes investigaciones. Autoría propia

Estos resultados confirman que las relaciones planta microorganismos existen en una vasta gama de especies vegetales y que los beneficios que se obtienen aportan desde diferentes aristas a favorecer el crecimiento vegetal. Las capacidades metabólicas de plantas y microorganismos son diferentes y por ello trabajan de manera complementaria y sincronizada con el objetivo de obtener el máximo provecho tanto para las plantas como para los microorganismos.

3.4 Microorganismos rizosféricos, una alternativa sustentable

En la mayoría de los sistemas agrícolas contemporáneos, los macronutrientes son proporcionados a través de la aplicación de fertilizantes minerales. Sin embargo, estas prácticas no sustentables de fertilización están contribuyendo a alteraciones a grandes escalas de los ciclos biogeoquímicos en la Tierra, a través de mecanismos como la degradación del suelo, la eutrofización del agua y emisiones de gases de efecto invernadero. (Jacoby et al., 2017, p.2).

Además, existen reportes que aseguran que la roca fosfatada disponible en el planeta, es decir la fuente de fósforo, está próxima a agotarse. Es necesario, también, tomar en cuenta que la producción de fertilizantes nitrogenados depende de los combustibles fósiles, otro recurso limitado y cuya escasez se espera en un futuro cercano (Jacoby et al., 2017). Esto explicaría que varios procesos estén en búsqueda de alternativas que les permitan eliminar su dependencia del petróleo y derivados.

En los últimos años, se ha observado un fenómeno poco esperado con respecto al uso indiscriminado de fertilizantes químicos en cultivos. En el largo plazo, generan un resultado opuesto al buscado, pues afectan negativamente el suelo y a su capacidad productiva. Se han observado efectos como: la compactación del suelo, disminución en el contenido de materia orgánica, aumento de acidez y facilidad de absorción de metales pesados a nivel de raíz (Dhayalan y Karuppasamy, 2021). Por lo que existen predicciones que afirman que la capacidad productiva de los suelos está llegando a su límite y pronto estarán infértiles. Por otro lado, también se predice un aumento en la población mundial, esto implica que aproximadamente para el 2050, el mundo deberá producir un 50% más de alimentos para satisfacer las necesidades de la dicha población. El

reto ahora es generar sistemas de producción eficientes y sin impacto ambiental asociado (Velasco-Jiménez et al., 2020).

Una de las alternativas que han surgido para solventar esta problemática es el uso de microorganismos, mediante diferentes métodos, para promover el establecimiento de una relación con los cultivos y que esto desencadene los beneficios propios de esta clase de relaciones. Comercialmente, es posible encontrar productos cuyo principal componente es un tipo de microorganismo, previamente caracterizado como rizobacteria promotora del crecimiento vegetal, ese es el caso de *Azospirillum*, que forma parte de cientos de productos disponibles para ser usado como biofertilizante. En la última década, estos productos han sido usados en más de 7000 hectáreas de diversos cultivos en América Latina, principalmente en Brasil y Argentina, generando una larga cadena de efectos positivos. En primer lugar, el impacto económico es muy atractivo por dos factores, el aumento en la productividad de los cultivos que genera mayores ganancias, y una disminución en el uso de fertilizantes químicos que reduce la inversión. En segundo lugar, está el factor ambiental pues el producto es biodegradable en su totalidad y no tiene efectos colaterales en el medio ambiente (Coniglio, Mora, Puente y Cassán, 2019).

El uso de microorganismos rizosféricos ilustra muy bien la compatibilidad de nuevas prácticas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el objetivo 12 habla de producción y consumo responsables, los productos a base de microorganismos rizosféricos constituyen una vía de producción responsable con el ambiente y con los consumidores pues no afectan de ninguna manera al recurso suelo y garantizan una producción libre de productos químicos. Se enmarca, además, dentro del objetivo 13 que trata de la acción por el clima pues representan una manera de reducir el cambio climático, no involucran productos derivados de combustibles fósiles y reduce el uso de fertilizantes químicos que si se derivan de la industria petrolera. Finalmente, es compatible con el objetivo 15 que vela por la vida de los ecosistemas terrestres. El uso de microorganismos en sistemas productivos es una ruta para frenar la degradación de los suelos, procurar reestablecer el equilibrio en ellos e impedir la pérdida de la diversidad biológica que se aloja bajo tierra (UNESCO, 2017).

Las características de los microorganismos rizosféricos y los efectos que tienen sobre las plantas y sobre el suelo los hacen una herramienta sostenible en sistemas de producción agrícola. Contribuyen a mejorar la calidad de suelo y sus características al mismo tiempo que sostienen un activo crecimiento de la especie que se esté cultivando en ese momento. De este modo, permiten satisfacer las necesidades productivas actuales sin perjudicar la capacidad productiva del suelo en el futuro.

3.5 Múltiples vías para generar crecimiento vegetal

Existe una serie de mecanismos reportados mediante los cuales los microorganismos rizosféricos contribuyen al crecimiento vegetal, entre los más comúnmente conocidos se pueden citar a una mejora en la nutrición de las plantas que se deriva de la fijación biológica de nitrógeno y la solubilización de fosfatos por parte de hongos y bacterias de la rizósfera; además los microorganismos producen hormonas del crecimiento vegetal que promueven crecimiento de modo directo (Chávez-Ambriz et al., 2016). Adicionalmente, también existen vías indirectas para mejorar el crecimiento vegetal como, por ejemplo: el control biológico de patógenos en la rizósfera para impedir su proliferación y el facilitar una respuesta ante fuentes de estrés abiótico (Velasco-Jiménez et al., 2020).

a. Fijación de Nitrógeno

Los microorganismos rizosféricos son fundamentales para que este mineral quede disponible para su absorción a nivel radicular. En nuestro planeta, la principal fuente de nitrógeno es la atmósfera, donde se encuentra como N_2 , pero esta forma es no asimilable para las plantas. El nitrógeno atmosférico es retenido por estas bacterias que lo metabolizan y lo convierten en nitrógeno orgánico (NH_4^+) gracias a la acción de enzimas denominadas nitrogenasas que catalizan esta transformación. Parte del nitrógeno orgánico es absorbido por las plantas y otra parte debe ser mineralizada a su forma inorgánica, los nitratos, y en este formato también es absorbido por las plantas. (Quemada et al., 2017)

b. Solubilización de fosfatos

En el mercado actual de los fertilizantes químicos es posible encontrar opciones de productos fosfatados e hiperfosfatados que, si bien aumentan la cantidad de

fósforo presente en el suelo, no alteran la cantidad de fósforo disponible para su absorción a través de las raíces. Esto responde al hecho de que los átomos de fósforo son retenidos por otros minerales como el aluminio y el hierro. Además, la disponibilidad del fósforo depende del pH, el contenido de materia orgánica y la actividad microbiana del suelo, parámetros que muchas veces se ven alterados en suelos que se usan para cultivos. Dentro de los microorganismos rizosféricos, existe un grupo conocido como las PSB, siglas en inglés de Bacterias Solubilizadoras de Fósforo, básicamente este grupo de bacterias rompe la unión entre átomos de fósforo y otros minerales inmovilizadores como el aluminio, el hierro, el calcio y el magnesio; esto libera al fósforo y lo deja disponible para las plantas (Anfarita, Lestari, Murwani e Higuchi, 2017).

c. Producción de hormonas vegetales

Las hormonas vegetales son moléculas orgánicas que en pequeñas cantidades modulan una serie de procesos en el desarrollo de la planta. Se conoce que existen microorganismos rizosféricos que producen hormonas vegetales y con ellas favorecen el crecimiento de la planta huésped. Entre las hormonas vegetales que estos microorganismos producen se encuentran: las auxinas, las citoquininas, las giberelinas, el ácido abscísico, el ácido jasmónico y el etileno; de estas la mejor caracterizada en rizobacterias son las auxinas, ya que se ha encontrado que pueden producir Ácido Indol Acético (AIA), una auxina natural que afecta principalmente la raíz de la planta huésped. Entre los efectos que se han podido encontrar están: aumento de tamaño y peso de las raíces, número de ramificaciones y el área superficial en contacto con el suelo (Velasco-Jiménez et al., 2020). Esto a su vez incrementa la cantidad de nutrientes que se absorben desde el suelo con una estructura radicular ampliada que se extiende a zonas que no podrían ser alcanzadas en ausencia de estos microorganismos. Varios han sido los reportes que exhiben la habilidad de microorganismos rizosféricos para producir AIA, por ejemplo, levaduras encontradas en la Patagonia asociadas a leñosas del género *Nothofagus* spp. que en condiciones *in vitro* produjeron hasta 9.15ug/mL de AIA (Mestre, Fontenla, Bruzone, Fernández y Dames, 2016). Otro ejemplo son los microorganismos de la rizósfera de caña de azúcar, en Goyas-Brasil, donde se encontró que en ensayos *in vitro* estas bacterias podían producir hasta 139.21ug/ml en 72 horas de cultivo (Alves Rodrigues, Forzani, de Souza Soares, Sibov y Goncalves, 2016).

Además de las auxinas, se han encontrado ciertas especies microbianas con la capacidad de producir citoquininas, otra familia de reguladores de crecimiento vegetal. En el caso de las citoquininas, estas se encuentran relacionadas a procesos de división y diferenciación celular; en cuanto a los efectos positivos directos sobre la arquitectura radicular están la formación de pelos radicales, la diferenciación de meristemos apicales de raíz y la diferenciación de xilema y floema (Grover et al., 2021). En conjunto, estos efectos incidirán sobre la capacidad de la raíz para absorción de agua y nutrientes.

Otro mecanismo de generar crecimiento relacionada a las hormonas vegetales es a través del bloqueo de la producción de etileno a nivel radicular. Muchos microorganismos rizosféricos poseen una enzima denominada ACC desaminasa, su función es la de metabolizar el 1-amino-ciclopropano-1-carboxilato, un precursor del etileno, con ello queda bloqueada la ruta de síntesis, anulando el efecto inhibitorio natural del etileno y esto facilita el crecimiento del sistema radicular (Belimov et al., 2015).

d. Control biológico de patógenos

La interacción entre plantas y microorganismos mantiene libres de plagas y enfermedades a los cultivos, algunas de estas enfermedades son causadas también por microorganismos que pueden alcanzar la rizósfera y luego las raíces de las plantas. Actualmente, el método más eficiente para manejar este tipo de patógenos son los agroquímicos sin embargo estos tienen una serie de efectos colaterales poco deseables ya discutidos. En este aspecto, se puede emplear control biológico de estos patógenos con microorganismos antagonistas que actúan de modo específico y que no representan ningún peligro para el medioambiente o para el ser humano. Por ejemplo, se ha probado que los actinomicetos del género *Actinobacteria* aislados de la rizósfera de árboles de aguacate pueden inhibir el crecimiento de patógenos como el hongo *Colletotricum gloeosporioides*, responsable de la antracnosis del aguacate, y de bacterias del género *Xanthomonas* que causan la enfermedad de la mancha de la hoja (Trinidad-Cruz et al., 2021). Se han descrito los mecanismos a través de los cuales los microorganismos rizosféricos podrían ejercer estos efectos antagonistas en contra de patógenos. Las investigaciones sugieren que la clave sería la producción de sideróforos como, por ejemplo: el ácido salicílico o la pioquelina, estos compuestos inmovilizan el hierro, lo reducen a su forma más insoluble y no permiten que sea absorbido por los fitopatógenos, con esta

restricción su crecimiento su inhibe ya que este mineral es esencial para el desarrollo de cualquier forma de vida (Gaiero et al., 2013).

Los nemátodos, son un claro ejemplo de patógenos responsables de grandes pérdidas en la producción de frutas, vegetales y productos maderables. Se estima que cada año se puede perder hasta un 25% de la producción mundial por el ataque de estos organismos. La solución, más ampliamente difundida, es el uso de pesticidas químicos con el impacto ambiental que estos conllevan. Sin embargo, en los últimos años, las rizobacterias se presentan como una excelente alternativa en este caso ya que despliegan una variedad de mecanismos, como controladores biológicos de nemátodos, entre estos se incluyen: competencia por ocupar el nicho ecológico que constituye la rizósfera, mejor colonización de las raíces, producción de sustancias nematocidas como los antibióticos, sideróforos, enzimas hidrolíticas y toxinas. Los resultados son consistentes tanto en laboratorio, en invernadero y en el campo (Migunova y Sasanelli, 2021). Así lo reportan Deghanian, Abdollahi, Charehgani y Niazi (2020), al inducir resistencia a plantas de tomate contra el nemátodo *Meloidogyne javanica*, empleando como controlador biológico a la bacteria *Pseudomonas fluorescens* CHA0, los resultados mostraron que el uso de la bacteria redujo los índices de infección notablemente y aumentó la tasa de crecimiento de plantas tratadas mediante cambios en la expresión génica de *PR1*. Otro ejemplo en el ámbito del control biológico es la acción de la bacteria, *Tsukamurella paurometabola* cepa C-924, aislada de la rizósfera de plantas de plátano que controla el crecimiento de nemátodos fitoparásitos y además puede mejorar el crecimiento radicular, la acumulación de peso seco y mayor follaje no solo en plátano, además esta misma bacteria ha sido probada en especies como: fréjol, maíz y lechuga con resultados muy similares. Estos resultados obedecen a la producción de AIA por parte de *T. paurometabola*, a su habilidad de solubilizar fosfatos y producir amoníaco a partir de materia orgánica (Marín et al., 2014).

e. Resistencia a estrés abiótico

El mecanismo de bloqueo de producción de etileno en la raíz también está relacionado a la resistencia ante factores abióticos adversos. El etileno es conocido como la hormona del estrés, se libera ante situaciones como la salinidad, sequía, inundaciones, toxicidad por metales pesados y heridas (Ghosh, De y Maiti, 2018). Las respuestas que se generan ante estos escenarios incluyen defoliación, inhibición del crecimiento celular, senescencia, entre otros procesos que buscan

defender a la planta pero que afectan negativamente al crecimiento (Velasco-Jiménez et al., 2020). Sin embargo, el mismo mecanismo de anulación de etileno por acción de la ACC desaminasa, ayuda a disminuir los niveles de etileno, que este quede sin efecto ante situaciones de estrés, no dispare los mecanismos propios de defensa de la planta y con ello no afecte el desarrollo vegetal.

Existen situaciones como las de estrés hídrico que elicitán respuestas más específicas, se ha observado que microorganismos rizosféricos tiene la habilidad de producir unas proteínas denominas dehidrinas, estas son una protección para las raíces en situación de bajo suministro de agua. También, en un ambiente escaso en agua, se dispara de modo natural la producción de Ácido Abscísico (ABA) radicular, el ABA sube por el xilema hasta las hojas donde promueve el cierre estomático para evitar pérdidas excesivas de agua, este mecanismo de defensa se ve potenciado en presencia de microorganismos rizosféricos que aumentan la producción de ABA en la raíz. El cierre estomático tiene una relación directa con la cantidad de ABA recibido desde la raíz por lo que una producción acelerada, genera una respuesta más eficiente (Riboldi Monteiro, Bonilha da Silva, Menezes de Abreau y da Silva, 2021).

Estos mecanismos no actúan de modo aislado siempre existen conexiones que permiten una respuesta más apropiada ante diferentes escenarios, el común denominador es promover el crecimiento vegetal, este es el motivo por el cual las plantas buscarán asociarse a microorganismos en su rizósfera garantizando facilidades a la hora de nutrirse, una fuente exógena de hormonas vegetales, aliados estratégicos contra patógenos y factores de estrés abiótico.

4. Conclusiones

El crecimiento vegetal es el resultado de la combinación de una serie de factores, uno de los indispensables son los nutrientes minerales pues son los bloques con los que se construye un edificio. Garantizar un acceso permanente a ellos es una vía para mantener un cultivo activo y productivo. Una herramienta sostenible para contribuir a una producción agrícola más limpia son los microorganismos rizosféricos, ellos viven en las cercanías a la raíz donde encuentran hábitat y alimento, desde ahí estimulan el crecimiento vegetal y mantienen a la rizósfera como una zona libre de patógenos, reduciendo así a cero el impacto ambiental en la producción de alimentos.

Las relaciones entre plantas y microorganismos a nivel de la rizósfera tienen años en proceso de evolución, su nivel de eficiencia es tan alto que existe un mecanismo de comunicación entre las dos partes y pueden reconocerse unas a otras a través de señalamiento químico. La característica más sobresaliente de estas interacciones es el beneficio que obtienen las dos partes actoras; por un lado, los microorganismos obtienen un nicho y una fuente generosa de alimento, mientras que las plantas experimentan una mejoría en varios aspectos orientados a estimular el crecimiento vegetal haciendo innecesaria la utilización de productos químicos que alteran el equilibrio del suelo.

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal generan sus efectos al producir hormonas que ampliarán la arquitectura radicular y al facilitar la toma de nutrientes importantes como el nitrógeno y el fósforo. Un sistema radicular más diversificado junto a cantidades importantes de minerales disponibles, derivan en la promoción del desarrollo vegetal. Adicionalmente, los microorganismos son capaces de aumentar la tolerancia a situaciones adversas como la sequía, las altas temperaturas, las inundaciones, el ataque de plagas y enfermedades mediante el bloqueo de la producción de etileno a nivel de raíz, junto con la producción de sideróforos, toxinas, enzimas y antibióticos que imposibilitan la colonización de la planta o respuestas autodestructivas que se ponen en marcha para manejar fuentes de estrés abiótico. Estas es las razones por las cuales estos microorganismos están bajo intensas investigaciones, mientras que otros ya se encuentran en proceso de comercialización, pues representan una excelente alternativa para sustituir fertilizantes y pesticidas químicos que actualmente se usan en sistemas de producción agrícola y que son altamente contaminantes para el suelo, el agua y la atmósfera. Los microorganismos que se usan como biofertilizantes actúan directamente sobre la planta sin representar un peligro para el medio ambiente o los consumidores, permiten mantener o mejorar las condiciones propias de un suelo lo que resalta su aporte hacia una producción sostenible y responsable.

Referencias

Alves Rodrigues, A., Forzani, M., de Souza Soares, R., Sibov, S. y Goncalves, J. (2016). Isolation and selection of plant growth-promoting bacteria

associated with sugarcane. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 46(2), 149-158.

- Anfarita, N., Lestari, M., Murwani, I. y Higuchi, T. (2017). Isolation of indigenous phosphate solubilizing bacteria from green. *J. Degrad. Min. Land Manage.*, 4(3), 845-851.
- Arriaga, R., González, H., Castillo, A., Olalde, V., Reyes, B. y Aguilera, L. (2009). Respuesta de *Lilium* sp. al fósforo y su relación con *Glomus fasciculatum* y *Bacillus subtilis*. *Phyton*, 78, 91-100.
- Avilés-García, M. E., Flores-Cortez, I., Hernández-Soberano, C., Santoyo, G. y Valencia-Cantero, E. (2016). La rizobacteria promotora del crecimiento vegetal *Arthrobacter agilis* UMCV2 coloniza endofíticamente a *Medicago truncatula*. *Revista Argentina de Microbiología*, 48(4), 342-346.
- Belimov, A., Dodd, I., Safranova, V., Shaposhnikov, A., Azarova, T., Makarova, N.,.... Tikhonovich, I. (2015). Rhizobacteria that produce auxins and contain 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid deaminase decrease amino acid concentrations in the rhizosphere and improve growth and yield of well-watered and water. *Annals of Applied Biology*, 167, 11-25.
- Bonilla, I. (2013). Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. En J. Azcón-Bieto y M. Talón (Eds.), *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (págs. 103-121). Madrid, España: McGraw Hill Interamericana.
- Chávez-Ambríz, L., Hernández-Morales, A., Cabrera-Luna, J., Luna-Martínez, L. y Pacheco-Aguilar, J. (2016). Aislados de *Bacillus* provenientes de la rizósfera de cactus incrementan la germinación y la floración en *Mammillaria* spp. (Cactaceae). *Revista Argentina de Microbiología*, 48(4), 333-341.
- Coniglio, A., Mora, V., Puente, M. y Cassán, F. (2019). *Azospirillum* as Biofertilizer for Sustainable Agriculture: *Azospirillum brasilense* AZ39 as a Model of PGPR and Field Traceability. En D. Zúñiga-Dávila, F. González-Andrés y E. Ormeño-Orillo, *Microbial Probiotics for Agricultural Systems. Sustainability in Plant and Crop Protection* (págs. 45-70). Cham: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-17597-9_4
- Deghanian, S., Abdollahi, M., Charehgani, H. y Niazi, A. (2020). Combined of salicylic acid and *Pseudomonas fluorescens* CHA0 on the expression of PR1 gene and control of *Meloidogyne javanica* in tomato. *Biological Control*, 141. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104134>.
- Dhayalan, V. y Karuppasamy, S. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria in promoting sustainable agriculture. *Global J. Environ. Sci. Manage*, 7(3), 1-18.

- Fernández, J., García, M. y Maldonado, J. (2013). Absorción y transporte de nutrientes minerales. En J. Azcón-Bieto y M. Talón (Eds.), *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (págs. 123-141). Barcelona, España: McGraw Hill Interamericana.
- Gaiero, J., McCall, C., Thompson, K., Day, N., Best, A. y Dunfield, K. (2013). Inside the root microbiome: Bacterial root endophytes and plant growth promotion. *American Journal of Botany*, *100*(9), 1738-1750.
- Ghosh, P., De, T. y Maiti, T. (2018). Role of ACC Deaminase as a Stress Ameliorating Enzyme of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Useful in Stress Agriculture: A Review. En V. Meena (Ed.), *Role of Rhizospheric Microbes in Soil* (págs. 57-106). Singapore: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-10-8402-7_3
- Grover, M., Bodhankar, S., Sharma, A., Sharma, P., Singh, J. y Nain, L. (2021). PGPR Mediated Alterations in Root Traits: Way Toward Sustainable Crop Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*. doi:10.3389/fsufs.2020.618230
- Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A. y Kopriva, S. (2017). The Role of Soil Microorganisms in Plant Nutrition - Current Knowledge and Future Directions. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 1-19.
- Kour, D., Lata, K., Kaur, T., Sheikh, I., Yadav, A., Kumar, V., . . . Saxena, A. (2020). Microbe-mediated alleviation of drought stress and acquisition of phosphorus in great millet (*Sorghum bicolor* L.) by drought-adaptive and phosphorus-solubilizing microbes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *23*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101501>.
- Lareen, A., Burton, F. y Schafer, P. (2016). Plant root-microbiome communication in shaping root microbiomes. *Plant Mol Biol*, *90*, 575-587.
- Lin, H., Liu, C., Li, B. y Dong, Y. (2021). *Trifolium repens* L. regulated phytoremediation of heavy metal contaminated soil by promoting soil enzyme activities and beneficial rhizosphere associated microorganisms. *Journal of Hazardous Materials*, *402*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123829>
- Marín, M., Mena, J., Wong, I., Morán, R., Franco, R., Rojas, M., . . . González, S. (2014). Characterization of the vegetal growth promoting capacity of *Tsukamurella paurometabola* C-924 and the main mechanism involved. *Bioteecnología Aplicada*, *31*, 168-171.

- Marquina, M., Ramírez, Y. y Castro, Y. (2018). Efecto de bacterias rizosféricas en la germinación y crecimiento del pimentón *Capsicum annum* L. var. Cacique Gigante. *Bioagro*, 30(1), 3-16.
- Medrano, H., Galmés, J. y Flexas, J. (2013). Fijación del dióxido de carbono y biosíntesis de fotoasimilados. En J. Azcón-Bieto y M. Talón (Eds.), *Fundamentos de Fisiología Vegetal* (págs. 211-225). Barcelona, España: McGraw Hill Interamericana.
- Mestre, M., Fontenla, S., Bruzone, M., Fernández, N. y Dames, J. (2016). Detection of plant growth enhancing features in psychrotolerant yeast from Patagonia (Argentina). *Journal of Basic Microbiology*, 56, 1098-1106.
- Migunova, V. y Sasanelli, N. (2021). Bacteria as Biocontrol Tool against Phytoparasitic Nematodes. *Plant*, 10(2), 389. doi:10.3390/plants10020389
- Quemada, M., Mateos, L., Mateos, L. y Villalobos, F. (2017). Nitrogen Fertilization I: The Nitrogen Balance. En F. Villalobos y E. Fereres (Eds.), *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture* (págs. 341-368). Cham: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_24
- Riboldi Monteiro, H., Bonilha da Silva, F., Menezes de Abreau, C. y da Silva, G. (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Amelioration of Abiotic Stresses: A Functional Interplay and Prospective. En H. Ibrahim, H. El-Beltagi y K. Abd-Elsalam (Eds.), *Plant Growth-Promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management* (págs. 25-43). Suiza: Springer Nature. doi:10.1007/978-3-030-66587-6_2
- Trinidad-Cruz, J., Rincón-Enriquez, G., Evangelista-Martínez, Z., Guízar-González, C., Enríquez-Vara, J., López-Pérez, L. y Quiñones-Aguilar, E. (2021). Actinobacteria from avocado rhizosphere: antagonistic activity against *Colletotrichum gloeosporioides* and *Xanthomonas* sp. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-9.
- UNESCO. (2017). *La UNESCO avanza La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Recuperado de: http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Hanoi/2030_Brochure_SP.pdf
- Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. y Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38, 333-345.
- Velázquez-Becerra, C., Macías-Rodríguez, L., López-Bucio, J., Altamirano-Hernández, J., Flores-Cortez, I. y Valencia-Cantero, E. (2011). A volatile organic compound analysis from *Arthrobacter agilis* identifies

dimethylhexadecylamine, an amino containing lipid modulating bacterial growth and *Medicago sativa* morphogenesis in vitro. *Plant soil*, 339, 329-340.

Velázquez-Becerra, C., Macías-Rodríguez, L., López-Bucio, J., Flores-Cortéz, I., Santoyo, G., Hernández-Soberano, C. y Valencia-Cantero, E. (2013). The rhizobacterium *Arthrobacter agilis* produces dimethylhexadecylamine, a compound that inhibits growth of phytopathogenic fungi in vitro. *Protoplasma*, 250, 1251-1262.