



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA



TRABAJO DE TITULACIÓN

Componente práctico del Examen de Grado de carácter complejo,
presentado al H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito
previo para obtener el título de:

INGENIERA AGROPECUARIA

TEMA:

Uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el
desarrollo de la agricultura sostenible en el cultivo de café (*Coffea*
spp) en el Ecuador.

AUTORA:

Kerly Lisbeth Maquilon Ortega

TUTOR:

Ing. Agr. Marlon López Izurieta, MSc.

Babahoyo - Los Ríos - Ecuador

2023

RESUMEN

Las bacterias de vida libre con diversas habilidades relacionadas con el crecimiento y la salud de las plantas han sido denominadas rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR). Los PGPR promueven el crecimiento de las plantas a través de varios modos de acción, ya sea directa o indirectamente. Los beneficios proporcionados por estas bacterias pueden incluir una mayor disponibilidad de nutrientes, producción de fitohormonas, desarrollo de brotes y raíces, protección contra varios fitopatógenos y reducción de enfermedades. Además, PGPR puede ayudar a las plantas a resistir el estrés abiótico como la salinidad, la sequía y producción de enzimas que desintoxican las plantas de metales pesados. Los PGPR se han convertido en una estrategia importante en la agricultura sostenible, debido a la posibilidad de reducir los fertilizantes y pesticidas sintéticos, promover el crecimiento, la salud de las plantas y mejorar la calidad del suelo. Hay muchos estudios relacionados con PGPR en la literatura. Sin embargo, el presente trabajo destaca los estudios que utilizaron PGPR para la producción sostenible del cultivo de café en el Ecuador. Se determinó que las bacterias más estudiadas y extendidas en la rizosfera del cafeto son *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Acetobacter* y *Pseudomonas*. El desempeño de estas cepas depende de las características de competencia con los microorganismos naturales y acorde a las condiciones fisicoquímicas y edáficas del suelo. El uso de PGPR permite reducir el uso de fertilizantes como los fosfatados, nitrogenados y fungicidas, tratando de mejorar la absorción de nutrientes. Un mayor conocimiento de las características bacterianas que impulsan la promoción del crecimiento de las plantas podría motivar y estimular el desarrollo de soluciones creativas que utilicen PGPR en entornos ambientales y climatológicos altamente cambiantes.

Palabras claves: rizosfera, biofertilización, biopesticidas, fitohormonas.

SUMMARY

Free-living bacteria with various abilities related to plant growth and health have been termed plant growth promoting rhizobacteria (PGPR). PGPRs promote plant growth through various modes of action, either directly or indirectly. The benefits provided by these bacteria may include increased nutrient availability, phytohormone production, shoot and root development, protection against various phytopathogens, and disease reduction. In addition, PGPR can help plants resist abiotic stresses such as salinity, drought, and production of enzymes that detoxify plants of heavy metals. PGPRs have become an important strategy in sustainable agriculture, due to the possibility of reducing synthetic fertilizers and pesticides, promoting growth and plant health, and improving soil quality. There are many studies related to PGPR in the literature. However, the present work highlights the studies that used PGPR for the sustainable production of coffee cultivation in Ecuador. It was possible to identify that the most studied and widespread bacteria in the coffee rhizosphere are *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Acetobacter* and *Pseudomonas*. The performance of these strains depends on the characteristics of competition with natural microorganisms and according to the physicochemical and edaphic conditions of the soil. The use of PGPR allows to reduce the use of fertilizers such as phosphate, nitrogen and fungicides, trying to improve the absorption of nutrients. Greater knowledge of the bacterial characteristics that drive plant growth promotion could motivate and stimulate the development of creative solutions using PGPR in highly changing environmental and climatic settings.

Keywords: rhizosphere, biofertilization, biopesticides, phytohormones

INDICE

RESUMEN.....	II
SUMMARY.....	III
I. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	3
1. MARCO METODOLÓGICO.....	3
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. General.....	4
1.4.2. Específicos.....	4
1.5.2. Morfología de la planta de Café.....	5
1.5.2.1. Raíz.....	5
1.5.2.2 Tallo.....	5
1.5.2.3 Hoja.....	6
1.5.2.4 Flor.....	6
1.5.2.5 Fruto.....	6
1.5.2 Características edafoclimáticas del cultivo de café.....	7
1.5.3.1 Suelo.....	7
1.5.3.2 Clima y temperatura.....	7
1.5.4 Comunicación entre la raíz y los microbios.....	7
1.5.5 Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.....	9
1.5.5.1 Clasificación de las PGPR.....	9
1.5.5.2 Características de un PGPR ideal.....	9
1.5.6 Mecanismos de promoción del crecimiento vegetal por rizobacterias.....	10
1.5.6.1 Biofertilizantes.....	11
1.5.7 Mecanismos de promoción del crecimiento vegetal.....	11
1.5.7.1 Mecanismos directos.....	12
1.5.7.2. Mecanismos indirectos.....	16
1.5.8 Efectos de las PGPR en el cultivo de café para la sostenibilidad.....	16
1.6 Hipótesis.....	18
1.7. Metodología de la investigación.....	18
CAPÍTULO II.....	19
RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
2.1. Desarrollo del caso.....	19
2.2. Situaciones detectadas.....	19
2.3. Soluciones planteadas.....	20

2.4. Conclusiones	20
2.5. Recomendaciones	21
III. BIBLIOGRAFÍA	23

I. INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea* spp) es un cultivo que se originó en Etiopia donde fue localizado por un hombre que tenía el mando de pastor de dicha comunidad. Se cree que muchas tribus africanas lo utilizaban para sus cabras al ver que la reacción de la cafeína daba una respuesta muy activa al consumir los granos.

La producción de café anual a nivel mundial se estima entre unos 7,7 millones de toneladas (Tn), con un área de producción de 10,5 millones de hectáreas (Ha) en más de 50 países. El 85 % del café del mundo se produce en América latina, el mayor productor es Brasil con unos 2,2 millones de Tn cultivadas en una superficie de 2,3 millones de Ha. Le siguen Vietnam, Indonesia y Colombia, cada uno produciendo entre 1 millón y 600 000 Tn en una superficie total de 2,6 millones de ha (Rizzuto 2014).

DUBLINSA (2012) expresa que en el Ecuador se encuentran alrededor de 305 000 ha dedicadas al cultivo de café con aproximadamente 200 000 productores involucrados y se distribuye en 23 de las 24 provincias del país. La importancia del café en el país significa una fuente muy útil de generar un dinero para las personas dedicadas a este cultivo (Santistevan 2014).

La mayoría de los caficultores del país, basan sus ingresos económicos en la producción del café. Sin prescripción, también se implementan otros tipos de cultivos dada la necesidad de contar con ingresos adicionales. Diversificándose de esta forma la producción, esta característica ha permitido que los pequeños agricultores que son los principales actores productivos de café, se inserten en métodos amigables con el ambiente. Con esta heterogeneidad de especies, se vincula el incremento de adaptación relacionada con la resiliencia del cultivo a los factores bióticos y abióticos (Viteri *et al.* 2013).

Dado que, para generar mayores rendimientos en la agricultura factual, se han incrementado significativamente el uso de agroquímicos y las dosis de fertilizantes sintéticos por unidad de superficie, los cuales pueden causar contaminación, riesgos para la salud y reducir la fertilidad del suelo.

Y convertirse en uno de los problemas más importantes en la producción agrícola. Para mejorar el cultivo atraer estos componentes, las investigaciones se han orientado hacia el desarrollo de nuevas biotecnologías, como el interés creciente en las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) (Moreno *et al.* 2018).

Una forma para lograr un desarrollo sostenible en la producción agrícola es el uso de PGPR, los mismos que colonizan activamente los rizomas , ejerciendo un efecto positivo en el desarrollo de las plantas; mecanismos directos como la fijación de nitrógeno, la disolución de minerales y la producción o cambio de concentración de hormonas vegetales; ya través de mecanismos indirectos como de metabolitos antifúngicos, sideróforos, actividad lítica, inducción de resistencia sistémica, competencia y movimiento (Posada *et al.* 2021).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es analizar las aplicaciones potenciales de las PGPR para el desarrollo de la agricultura sostenible en el cultivo de café (*Coffea* spp) en el Ecuador.

CAPITULO I

1. MARCO METODOLÓGICO

1.1. Definición del tema de caso de estudio

El presente estudio trata acerca del uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el desarrollo de la agricultura sostenible en el cultivo de café (*Coffea* spp) en el Ecuador. Los desafíos actuales en la producción cafetera de nuestro país es la reducción del uso indiscriminado de agroquímicos, debido a la alteración que sufre la ecología del cultivo, especialmente las poblaciones microbianas. Por esta razón, se considera que el estudio de estrategias sostenibles para la restauración de la microflora del suelo es importante para promover un crecimiento adecuado de este cultivo.

1.2. Planteamiento del problema

La forma más tradicional de proporcionar nutrientes al suelo en las últimas décadas ha sido mediante los fertilizantes químicos. Su aplicación continua ha ocasionado no sólo problemas económicos para los caficultores (al ser la fertilización uno de los rubros más costosos de los sistemas de producción agrícola), sino también ambientales (enfermedades, sequía, deficiencia de nutrientes, erosión, pérdidas de la biodiversidad y fragmentación de paisajes) y con riesgo potencial para la humanidad.

1.3. Justificación

Las prácticas agrícolas aplicadas al cultivo del café en esta región deben estar orientadas hacia una agricultura sostenible, enfocándose en mantener los rendimientos y preservar los agroecosistemas. En las últimas décadas, la investigación sobre el uso de PGPR, ha aumentado, no solo por su potencial para acelerar el crecimiento de los cultivos o como bioplaguicidas, sino también por sus aplicaciones prometedoras, en la remediación reforestación y reactivación de ecosistemas.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Analizar el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el desarrollo de la agricultura sostenible en el cultivo de café (*Coffea* spp.) en el Ecuador.

1.4.2. Específicos

- Detallar las características de PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria).
- Describir la clasificación de PGPR y los mecanismos de promoción del crecimiento vegetal.

1.5. Fundamentación teórica

1.5.1. Origen y taxonomía del Café

Según Duicela (2015) indica que de acuerdo casi unánime de que el café se originó a partir de una forma silvestre conocida como Arábica en las tierras altas de Abisinio (actualmente Etiopia), y circula una serie de leyendas sobre su descubrimiento. Como bebida aceptada se refiere a Kaldi, un pastor Abisinio que descubrió que sus cabras saltaban muy excitadas y llenas de energía después de comer las hojas y frutos de ciertos arbustos. El mismo investigador llevo los frutos y las ramas de este arbusto a la abadesa del monasterio, quien habría descubierto una bebida de café quemando las cerezas, que al tostarla producían un aroma maravilloso.

Los cultivares de café robusto se caracterizan por una alta variabilidad fenotípica en todos sus rasgos morfológicos, como altura de planta, números de rama, distancia entre nudos; forma, tamaño del grano, calidad sensorial y contenido de cafeína (Enríquez 2014).

Según el autor antes mencionado, la clasificación taxonómica del café es la siguiente:

Tabla 1: Clasificación taxonómica del café

Clasificación Taxonómica del Café	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Orden	Gentianales
Familia	Rubiaceae
Subfamilia	Ixoroidae
Tribu	Coffeae
Género	<i>Coffea</i>

1.5.2. Morfología de la planta de Café

1.5.2.1. Raíz

Angulo (2022). enuncia que el sistema radicular:

Es un órgano que funciona como soporte ya través del cual el cafeto. Recibe el fluido y los nutrimentos necesarios para su aumento y producción. El cafeto tiene una raíz principal que entra perpendicular en el suelo a una profundidad de al menos 50 centímetros y produce raíces laterales y raíces terciarias que se extiende horizontalmente para ayudar a anclar la planta y de las cuales las raíces. afuera las raíces antes mencionadas son bastante superficiales y son responsable de la absorción de agua e importantes nutrientes.

1.5.2.2 Tallo

Monroig (2017). expresa que:

El tallo del cafeto tiene un solo tallo o eje central, Los tallos tienen dos muestras de crecimiento. uno que hace crecer el árbol rígido y el otro plano o al costado. El crecimiento erecto u ortotrópico es causado por una zona o lugar de crecimiento activo en la parte superior de la planta, que la extiende a lo largo de su vida desarrollando el centro del tallo, los nudos y los entrenudos. Una planta joven deja hojas solo en 9 a 11 nudos, de ahí comienza a segregar. Las ramas laterales,

estas ramas se originan de unos brotes que aparecen en el eje superior de las hojas.

1.5.2.3 Hoja

Es el órgano principal de la planta porque en ella se lleva todo el proceso de fotosíntesis, transpiración, respiración. Las hojas de manera de nudos de las ramas y al final del tallo o yema apical (Castro 2014).

1.5.2.4 Flor

La flor es hermafrodita por lo que contiene órganos masculinos y femeninos. Las partes de una flor son: cáliz, pétalos, estambres pistilo. conocerlos. se compone de brácteas o pequeñas hojas que cubren los pétalos. El sépalo es un pequeño tubo cilíndrico insertado en los sépalos y terminado en cinco pétalos blancos (Castro 2014).

1.5.2.5 Fruto

Cafemalíst (2021). menciona que para el cafeto:

Los frutos son garantía de supervivencia y reproducción. Dentro de esos frutos hay dos semillas unidas por pergamino: una película transparente de composición natural, que le da un sabor dulce. cada semilla, a su vez, tiene un núcleo, que es el portador del embrión y responsable del desarrollo de la planta. Este fruto tiene una capa protectora llamada pulpa, que es la parte carnosa de todo fruto. La pulpa es la encargada de proteger las semillas de factores externos. Por otra parte, en la parte visible de la semilla, se encuentra la llamada piel o epicarpio. La cascara o epicario es la encargada de proteger al fruto contra bacterias y otros factores biológicos.

1.5.2 Características edafoclimáticas del cultivo de café

1.5.3.1 Suelo

Las características del suelo para que se dé el mejor café son en los suelos de textura francos bien drenados con una mejor ventilación y valor nutricional y alto contenido orgánico. Se debe evitar la arcilla pesada y la arena gravemente soluble por preferible el café se adapta mejor a un pH de 5,2 a 6,3 pero en la práctica se lleva a cabo con pH inferiores a, 0 y superiores a 8,0 el encalado es necesario a niveles de bajos de pH para asegurar una buena disponibilidad de nutrientes (Esther 2017).

1.5.3.2 Clima y temperatura

Simón (2022). señala que las regiones cafetaleras tienen un clima tropical y ecuatorial con una humedad durante todo el año de 60-80 %, que enriquece el suelo cafetalero. La temperatura para las dos variedades más cultivadas aquí en el Ecuador Arábica exige de 18-22 °C, y el café robusto de 22 y 26 °C y en climas fríos con temperaturas inferiores a 18 °C, las variedades de café se desarrollan menos, por lo tanto, se obtiene una menor producción.

1.5.3.3 Precipitación, exposición solar y sombra

La cantidad de precipitación adecuada para una plantación de café es de 1500-2000 mm por año, alrededor de 125 mm por mes. La lluvia excesiva puede fácilmente impedir la floración de una plantación de café. La luz solar es muy influyente para la producción del cafeto, por lo que es necesario de 1800 horas-luz por año. No es adecuado excederse de estas temperaturas porque impide el desarrollo de la planta de café, como también la aceleración de la maduración del fruto, por lo que ocasionaría una mala calidad del grano del café. Este cultivo en muchos casos necesita de la sombra de árboles (Simón 2022).

1.5.4 Comunicación entre la raíz y los microbios.

La estrecha zona de suelo que rodea el sistema de raíces se denomina rizosfera (Walker *et al.* 2003), mientras que el término rizobacteria se refiere a un grupo de bacterias de la rizosfera capaces de colonizar el entorno de las raíces (Kloepper *et al.* 1991 citado por Ahemad y Kibret 2014). Además de brindar soporte mecánico y facilitar la absorción de agua y nutrientes, las raíces de las plantas también sintetizan, acumulan y excretan una amplia variedad de compuestos (Walker *et al.* 2003).

(Dakora y Phillips 2002). enuncian que:

Estos compuestos secretados por las raíces de las plantas actúan como atrayentes químicos para varias de comunidades microbianas del suelo heterogéneas, diversas y que se metabolizan activamente. Los productos químicos que son secretados por las raíces en los suelos generalmente se denominan exudados de raíces. La excreción de muchos compuestos químicos (aminoácidos, ácidos orgánicos, azúcares, vitaminas, purinas, enzimas, iones inorgánicos y moléculas gas) cambian las propiedades químicas y físicas del suelo y, por lo tanto, regula la estructura de la comunidad microbiana cerca de la superficie de la raíz.

(Barea *et al.* 2005), refiere que:

En gran medida, se reconocen tres componentes separados pero que interactúan en la rizosfera: la rizosfera (suelo), el rizoplano y la raíz misma. De estos, la rizosfera es la zona del suelo afectada por las raíces a través de la liberación de sustratos que influyen en la actividad microbiana. El rizoplano, por otro lado, es la superficie de la raíz que incluye las partículas del suelo fuertemente adheridas, mientras que la raíz misma es un componente del sistema, porque muchos microorganismos (como los endófitos) también colonizan los tejidos de la raíz.

La colonización microbiana de la rizosfera y/o los tejidos de la raíz se conoce como colonización de la raíz, mientras que la colonización del suelo adyacente a la raíz, se conoce como colonización de la rizosfera (Barea *et al.* 2005).

1.5.5 Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés) son un grupo heterogéneo de bacterias que se encuentran en la rizosfera, en las superficies de la raíz y están asociadas con las raíces, que pueden mejorar directa o indirectamente la extensión o la calidad del crecimiento de las plantas (Ahmad *et al.* 2008).

1.5.5.1 Clasificación de las PGPR

Somers *et al.* (2008) clasificaron a los PGPR en base a sus actividades funcionales como (i) biofertilizante (aumentando la disponibilidad de nutrientes para las plantas), (ii) Fito estimuladores (promueven el crecimiento de las plantas, generalmente a través de fitohormonas), (iii) rizo-remediadores (degradando contaminantes orgánicos) y (iv) biopesticidas controlan enfermedades, principalmente por la producción de antibióticos y metabolitos antifúngicos.

Además (Gray y Smith 2005), demostraron recientemente que las asociaciones de PGPR varían con la proximidad bacteriana a las raíces y la proximidad de la asociación. En general, se pueden dividir en extracelulares (PGPR), que ocurren en la rizosfera, en el rizoplano o en los espacios intercelulares de la corteza de la raíz, e intracelulares (PGPR), que ocurren en las células de la corteza raíz, generalmente en estructuras nodales especializadas (Figueiredo *et al.* 2010).

Algunos ejemplos de PGPR son *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Caulobacter*, algunos ejemplos de PGPR son *Allorhizobium*, *Azordhizohium*, *Mesdhizobium*, tribu e (Bhattacharyya y Jha 2011).

1.5.5.2 Características de un PGPR ideal

Se considera que una cepa de rizobacterias es un PGPR putativo si posee rasgos específicos que promueven el crecimiento de las plantas y puede mejorar

el crecimiento de las plantas tras la inoculación. Una cepa PGPR ideal debe cumplir los siguientes criterios (Vejan *et al.* 2016).

- (1) Debe ser altamente competente en rizosfera y ecológico.
- (2) Debe colonizar las raíces de las plantas en cantidades significativas tras la inoculación.
- (3) Debe ser capaz de promover el crecimiento de las plantas.
- (4) Debe exhibir un amplio espectro de acción.
- (5) Debe ser compatible con otras bacterias en la rizosfera.
- (6) Debe ser tolerante a factores fisicoquímicos como el calor, la desecación, las radiaciones y los oxidantes.
- (7) Debería demostrar mejores habilidades competitivas sobre las comunidades de rizobacterias existentes.

1.5.6 Mecanismos de promoción del crecimiento vegetal por rizobacterias

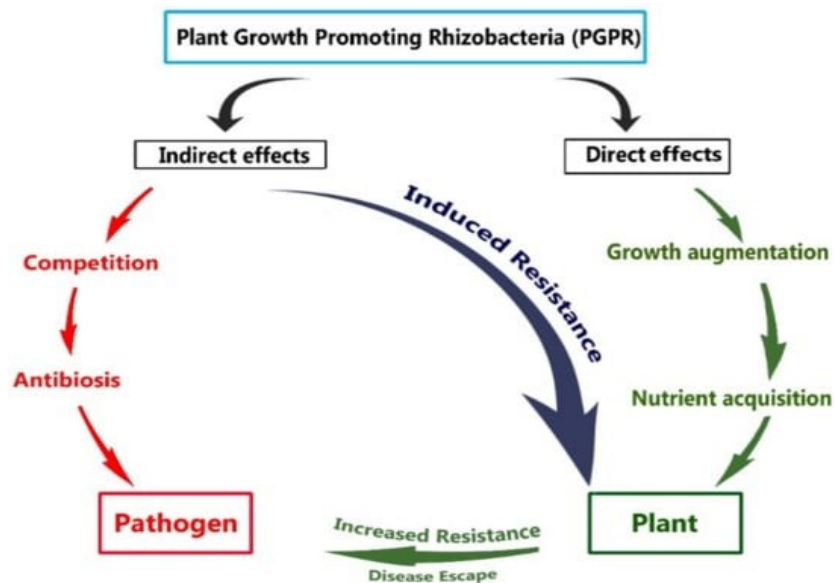


Figura 1: Interacciones entre las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), las plantas y los patógenos

Fuente: Basu *et al.* (2021)

Los mecanismos de trabajo de PGPR también se pueden separar en directos e indirectos. Los mecanismos directos son la biofertilización, la estimulación del crecimiento de las raíces, la rizorremediación y el control del estrés de las plantas. Por otro lado, el mecanismo de control biológico por el cual las rizobacterias están involucradas indirectamente como promotoras del crecimiento de las plantas es mediante la reducción del impacto de las enfermedades, que incluyen la antibiosis, la inducción de resistencia sistémica y la competencia por nutrientes y nichos (Egamberdieva y Lugtenberg 2014).

1.5.6.1 Biofertilizantes

Los microorganismos presentes en los biofertilizantes emplean varios mecanismos para brindar beneficios a las plantas de cultivo. Pueden ser eficientes en la fijación de nitrógeno, la solubilización de fosfato y la promoción del crecimiento de las plantas o pueden poseer una combinación de todas esas características (Mahanty *et al.* 2016).

Los biofertilizantes pueden fijar nitrógeno (N₂) atmosférico a través del proceso de fijación biológica de nitrógeno (BNF), solubilizar los nutrientes requeridos por las plantas, como fósforo, zinc y potasio, y también, secretan sustancias que promueven el crecimiento de las plantas, incluidas varias hormonas (Santhosh *et al.* 2018). Además, cuando se aplican como inoculantes de semillas o suelos, los biofertilizantes pueden multiplicarse, participar en el ciclo de nutrientes y ayudar en la producción de cultivos para una agricultura sostenible (Sun *et al.* 2020).

1.5.7 Mecanismos de promoción del crecimiento vegetal

Dentro de los mecanismos de promoción del crecimiento vegetal tenemos: Los mecanismos directos e indirectos, los mismos que se los detalla a continuación:

1.5.7.1 Mecanismos directos

i. Fijación de nitrógeno

Fijación biológica de nitrógeno (BNF) generalmente ocurre a bajas temperaturas, por parte de microorganismos fijadores de nitrógeno, que se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza (Raymond *et al.* 2004). Además, BNF es una alternativa ecológica y económicamente beneficiosa a los fertilizantes químicos (Ladha *et al.* 1997 citado por Ahemad y Kibret 2014).

Los organismos fijadores de nitrógeno generalmente se clasifican como (a) bacterias fijadoras de N₂ simbióticas que incluyen miembros de la familia rhizobiaceae que forman simbiosis con plantas leguminosas (p. ej., rizobios) (Ahemad y Khan 2012) y árboles no leguminosos (p. ej., Frankia) y (b) formas fijadoras de nitrógeno no simbióticas (de vida libre, asociativas y endófitas) como las cianobacterias (Anabaena, Nostoc), *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Gluconoacetobacter diazotrophicus* y *Azocarus*, etc. (Bhattacharyya y Jha 2011).

ii. Solubinizacion de fosfatos

A pesar de la gran reserva de fósforo (P), la cantidad de formas disponibles para las plantas es generalmente baja (Bhattacharyya y Jha 2011). El P insoluble está presente como un mineral inorgánico como la apatita o como una de varias formas orgánicas que incluyen fosfato de inositol (Fitato del suelo), fosfomonésteres y fosfotriésteres (Glick 2012).

Khan *et al.* (2009). señala que:

La aplicación regular de fertilizantes fosfatados no solo es costosa, sino que también es ambientalmente indeseable. Esto ha llevado a buscar una opción ecológicamente segura y económicamente razonable para mejorar la producción de cultivos en suelos bajos en P. En este contexto, los organismos junto con la actividad solubilizadora de fosfato, a menudo denominados microorganismos solubilizadores de fosfato (PSM), pueden proporcionar las

formas disponibles de P para las plantas y, por lo tanto, un sustituto viable de los fertilizantes fosfatados químicos.

De los diversos PSM que habitan en la rizosfera, las bacterias solubilizadoras de fosfato (PSB) se consideran biofertilizantes prometedores, ya que pueden suministrar a las plantas fósforo de fuentes que, de otro modo, estarían escasamente disponibles mediante diversos mecanismos (Zaidi *et al.* 2009).

Géneros bacterianos como *Azotobacter*, *Bacillus*, *Beijerinckia*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Microbacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Serratia* se reportan como las bacterias solubilizadoras de fosfato más importantes (Bhattacharyya y Jha 2011).

iii. Producción de sideróforos

Comúnmente, las bacterias adquieren hierro mediante la secreción de quelatos de hierro de baja masa molecular, denominados sideróforos que tienen altas constantes de asociación para completar el hierro. La mayoría de los sideróforos son solubles en agua y se pueden dividir en sideróforos extracelulares y sideróforos intracelulares (Khan *et al.* 2009).

Tanto en rizobacterias gramnegativas como grampositivas, el hierro (Fe^{3+}) en Fe^{3+} complejo sideróforo en la membrana bacteriana se reduce a Fe^{2+} que luego se libera en la célula desde el sideróforo a través de un mecanismo de activación que une las membranas interna y externa. Durante este proceso de reducción, el sideróforo puede ser destruido/reciclado (Rajkumar *et al.* 2010).

Las plantas asimilan el hierro de los sideróforos bacterianos por medio de diferentes mecanismos, por ejemplo, quelato y liberación de hierro, la captación directa de complejos sideróforo-Fe, o por una reacción de intercambio de ligandos (Schmidt, 1999 citado por Ahemad y Kibret 2014).

iv. Producción de fitohormonas

Tsavkelova *et al.* (2006). manifiesta que:

Los estimulantes del crecimiento vegetal, son de naturaleza orgánica que activan diversas reacciones en las células vegetales, a nivel bioquímico, fisiológico y morfológico. Según diversas clasificaciones se dividen en cinco grandes grupos: auxinas, giberelinas, etileno, ácido abscísico. y citoquinas, que son capaces de contribuir a la formación y regulación de muchos parámetros fisiológicos, y también aumentan la resistencia de las plantas a diversos factores ambientales, ya que pueden inducir o suprimir la expresión de varios genes.

Su síntesis en microorganismos, especialmente en bacterias ubicadas en la rizosfera, está ligada en algunos casos a la patogenicidad, ya que muchos fitopatógenos tienen la capacidad, de inducir las reacciones de hipersensibilidad en sus hospederos, y así llevar a cabo una infección exitosa (Tsavkelova *et al.* 2006).

a. Auxinas

Aunque se han descrito varias auxinas naturales en la literatura, el ácido indol-3-acético (ácido indolacético, IAA) es, con mucho, la auxina más común y la más estudiada, y gran parte de la literatura científica considera que la auxina y el IAA son términos intercambiables (Wong *et al.* 2015).

En general, la IAA bacteriana aumenta el área de superficie y la longitud de las raíces, lo que, proporciona a la planta un mejor acceso a los nutrientes del suelo. Además, el IAA bacteriano relaja las paredes celulares de las plantas y, en consecuencia, aumenta la exudación de las raíces, proporcionando nutrientes adicionales que favorecen el crecimiento de las bacterias de la rizosfera (Glick 2012).

Se ha encontrado que la mayoría de las cepas de *Rhizobium* que se han examinado producen IAA y varios estudios han sugerido que los aumentos en los

niveles de auxina en la planta huésped son necesarios para la formación de nódulos (Mathesius *et al.* 1998 citado por Glick 2012).

b. Giberelinas

Las giberelinas (GA) son un grupo de hormonas (alrededor de 120 moléculas diferentes), de las cuales 4 tipos son sintetizados por bacterias, ácido glutárico tipo -1 (GA1); ácido glutárico tipo-2 (GA2), Acido giberélico (GA3) y GA20. Estas hormonas se desplazan desde las raíces hacia las partes aéreas de la planta, donde sus efectos son significativos, más aún cuando las bacterias también producen auxinas que estimulan el sistema radicular mejorando la disponibilidad de nutrientes para promover el crecimiento aéreo (Wong *et al.* 2015).

Aunque estos también son de gran interés, la producción de giberelinas de PGPR es raro, y solo se han documentado dos especies, estas son *Bacillus pumilus* y *Bacillus licheniformis* (Gutiérrez *et al.* 2008).

c. Citoquinas

También llamadas citoquinas, son derivados de purinas que promueven y mantienen la división de células vegetales y participan en varios procesos de diferenciación, incluida la formación de los brotes o el crecimiento de las raíces primarias. Las plantas usan continuamente citoquinas para mantener las poblaciones células madres totipotentes en los nódulos de las raíces y meristemas radiculares (Leibfried *et al.* 2005).

Los principales microorganismos estudiados que producen estas fitohormonas son de los géneros: *Pseudomonas*, *Azospirillum* y *Bacillus*, que fueron aislados de plantas como el guisante, la cebada o la colza (Persello-Cartieaux *et al.* 2001). Aunque también se ha demostrado recientemente que géneros como *Proteus*, *Klebsiella*, *Escherichia*, *Pseudomonas* y *Xanthomonas* son capaces de producir citoquinas (Maheshwari *et al.* 2015).

d. Etileno

La producción de etileno inhibe el crecimiento vegetativo y el crecimiento de raíces; provoca la maduración, y el envejecimiento de los órganos, provoca el colapso de los órganos de las plantas, estimula la formación de órganos florales de ciertas especies (piña, mango, entre otros). Además, parece estar relacionado con el retraso; alta concentración de auxinas, giberelinas o citocinas en los tejidos (debido a uso hormonas) causado la determinación del etileno y con ello sus efectos (Knoester *et al.*, 1999 citado por Camelo *et al.* 2011).

El etileno por parte de bacterias trata de incluir a la siguiente *Escherichia coli*, *Rhizobium trifoli*, *Pseudomonas syringae* (bacterias fitopatógenas), entre otros. Baca y Elmerich (2003) afirman que existen dos vías para la biosíntesis del etileno, en la primera interviene una metionina aminotransferasa que convierte a la metionina en ácido 2-oxo-4 metiltiobutíric, la segunda involucra a una enzima dioxigenasa.

1.5.7.2. Mecanismos indirectos

La aplicación de microorganismos para controlar enfermedades es una forma de control biológico, es un enfoque amigable con el medio ambiente (Lugtenberg y Kamilova 2009). El principal mecanismo indirecto de promoción del crecimiento de las plantas en las rizobacterias es actuando como agentes de Biocontrol (Glick 2012).

En general, la competencia por nutrientes, la exclusión de nichos, la resistencia sistémica inducida y la producción de metabolitos antifúngicos son los principales modos de actividad de Bio control en PGPR (Lugtenberg y Kamilova 2009).

1.5.8 Efectos de las PGPR en el cultivo de café para la sostenibilidad

El uso de PGPR como biofertilizante, apunta a una agricultura sostenible, estrategia reconocida mundialmente para controlar plagas y la promover el crecimiento de las plantas (Alcarraz *et al.* 2019).

Una de las bacterias más estudiadas, extendidas y encontradas en la rizosfera de *Coffea* spp son las especies de los géneros *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Acetobacter* y *Pseudomonas* (Caldwell *et al.* 2015). Se han descrito algunos mecanismos por los cuales estos microorganismos pueden estimular el crecimiento de las plantas, incluyendo la síntesis de hormonas como auxinas (ácido indol acético), citosinas y ácido ascítico. La unión de células de fosfatos, fijación de nitrógeno atmosférico y la síntesis de compuestos impiden el crecimiento de microorganismos Fito patógenos, como sideróforos, quitinasas (Lugtenberg y Kamilova 2009).

Alcarraz *et al.* (2019). aislaron bacterias a partir de la rizosfera de cultivos cafetaleros, de las cuales identificaron la presencia de tres géneros: *Azospirillum*, *Pseudomonas* y *Burkholderia*. Varias de las cepas tienen más de un efecto de crecimiento de la planta, en especial *Azospirillum* amazonense (fijación neta de nitrógeno 2,05 mg. L⁻¹, y en la producción de AIA de 66,03 µg ml⁻¹ y la solubilización de fosfatos). Esto las convierte en potenciales biofertilizante para el cultivo del café.

Por otra parte, Calderón y Loján (2022). utilizaron cinco cepas de bacterias PGPR (*Pseudomonas plecoglossicida* R-47065, *B. subtilis* LMG2441, *B. subtilis* LMG24423, *Bacillus* sp C23) que se aislaron de diferentes proyectos desarrollados en el laboratorio de cultivo y conservación de microorganismos de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). Estas bacterias se sometieron a ensayos previos in vitro y demostraron tener características para promover el crecimiento de las plantas. Estos autores observaron una baja respuesta de los inoculantes agregados y puede deberse a la falta de competencia con los microorganismos nativos y a las condiciones fisicoquímicas y edáficas del suelo.

Asimismo, Fernández (2015). evaluó a nivel de campo el efecto la inoculación de PGPR de los géneros *Azotobacter* y *Pseudomonas*, en el cultivo de café (estado “fósforo” y “mariposa”). Las dos cepas incrementaron significativamente la longitud de la parte aérea, longitud radicular y peso seco de la

parte aérea. finalmente, los resultados mostraron que la inoculación con cepas de los géneros antes mencionados con rasgos PGPR, es una opción biotecnológica para promover el crecimiento del cultivo de café, con un efecto benéfico en el incremento de la biomasa vegetal.

Mientras que Urgiles *et al.* (2021). indica que obtuvieron resultados que les permitieron concluir que los aislados bacterianos *Azotobacter* spp. (AZCHM1 y AZCHM3) de suelos rizosféricos del café están dentro de los PGPR, y son un potencial en la solubilización de fósforo.

1.6 Hipótesis

Ho: El uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal no promueven el desarrollo de la agricultura sostenible en el cultivo de café (*Coffea* spp) en el Ecuador.

Ha: El uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal promueven el desarrollo de la agricultura sostenible en el cultivo de café (*Coffea* spp) en el Ecuador.

1.7. Metodología de la investigación

La presente investigación se la realizó como parte del componente práctico para el trabajo de titulación de acuerdo a investigaciones recopiladas de artículos, revista, tesis y editoriales. Esta información es la síntesis de acuerdo a todo lo técnico de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la agricultura sostenible en el cultivo de café.

CAPÍTULO II

RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Desarrollo del caso

Este documento proporciona información relacionada al uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el desarrollo de la agricultura sostenible en el cultivo de café en el Ecuador. Desde un enfoque de alta demanda de alimentos, se ha incrementado la práctica de sistemas de producción intensivos, afectando la fertilidad de los suelos cafetaleros, la productividad y la calidad de sus derivados, debido al uso indebido de fertilizantes químicos y pesticidas. El estudio avanzado de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la actualidad es una pieza clave para promover la sostenibilidad de este cultivo de importancia económica para nuestro país.

2.2. Situaciones detectadas

Se reconocen tres componentes separados pero que interactúan en la rizosfera: la rizosfera (suelo), el rizoplano (superficie de la raíz y microorganismos) y la raíz misma. De estos, la rizosfera es la zona del suelo influenciada por las raíces a través de la liberación de sustratos y/o exudados que afectan la actividad microbiana.

Dentro de los microbios benéficos más estudiados están las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), que permiten que los sistemas agroforestales asociados al cultivo de café, se desarrollen en forma sostenible con su entorno (como biofertilizantes y métodos seguros para el control de plagas).

Las bacterias más estudiadas y extendidas en la rizosfera del cafeto son de los, *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Acetobacter* y *Pseudomonas*. Sin embargo, la baja respuesta de las PGPR puede deberse a la falta de competencia con los microorganismos naturales y a las condiciones fisicoquímicas y edáficas del suelo.

Los microorganismos que se encuentran en los biofertilizantes utilizan varios mecanismos para brindar beneficios a las plantas de cultivo. Pueden ser eficientes en la fijación de nitrógeno, la solubilización de fosfato. Además, pueden actuar directamente sobre el crecimiento de las plantas mediante la producción de fitohormonas y sideróforos. Éstos últimos, de forma indirecta actúan sobre las poblaciones de bacterias y hongos Fito patógenos, considerándose un método de Bio control de plagas.

2.3. Soluciones planteadas

Es vital asociar información acerca de las características de las distintas PGPR y los parámetros fisicoquímicos de los suelos cafetaleros, para poder seleccionar la cepa ideal y así poder consolidar la promoción de mecanismos directos e indirectos en el cafeto tras la inoculación.

En sistemas agrícolas establecidos con el cultivo de café, el fósforo es importante en las primeras etapas de su desarrollo, ya que mejora y hace crecer significativa el sistema radicular. Debido a la limitada disponibilidad del P en el suelo, *Azotobacter* spp. y *Azospirillum* amazonense se presentan como una solución potencial en los sistemas de producción sostenible para la solubilización de este elemento, mientras que esta última también se especializa en la fijación de uno de los elementos más utilizados en la agricultura como es el N y a la vez la producción de AIA.

2.4. Conclusiones

En conclusión, las rizobacterias como *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Acetobacter* y *Pseudomonas* han mostrado resultados que benefician al cultivo de café. Sin embargo, los PGPR pueden mejorarse aún más con la optimización y aclimatación acorde con las condiciones predominantes del suelo cafetalero. Para una agricultura sostenible, es aconsejable que se dinamice el uso de los fertilizantes químicos, pesticidas y sustancias reguladoras de crecimiento artificial que tienen distintos efectos secundarios. De esta manera, la comprensión de los

mecanismos directos e indirectos por PGPR abren fronteras para encontrar cepas más competentes que puedan accionar en diversas condiciones agroecológicas del cultivo de café.

Dentro de las características de las PGPR podemos decir que son altamente competente en rizosfera y ecológico, colonizan las raíces de las plantas en cantidades significativas tras la inoculación, son capaces de promover el crecimiento de las plantas, exhiben un amplio espectro de acción, son compatibles con otras bacterias en la rizosfera, son tolerantes a factores fisicoquímicos como el calor, la desecación, las radiaciones y los oxidantes para aportar mejores habilidades competitivas sobre las comunidades de rizobacterias existentes.

Las PGPR se clasifican de acuerdo a la funcionabilidad que se le dé, entre ellas tenemos los biofertilizantes, Fito estimuladores, rizo-remediadores (degradando contaminantes orgánicos) y biopesticidas controlan enfermedades, principalmente por la producción de antibióticos y metabolitos antifúngicos. Y los mecanismos de promoción del crecimiento vegetal se clasifican en directos e indirectos los cuales son de gran importancia para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

2.5. Recomendaciones

Para mantener la productividad de los cultivos sin dañar el medio ambiente, es esencial implementar métodos de cultivo que aseguren el uso eficiente de fertilizantes. El uso de biofertilizantes con beneficios probados para la nutrición de las plantas y la salud del suelo es una forma de lograrlo. En este contexto, el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) ha ganado una atención considerable para mejorar la absorción y utilización de nutrientes de las plantas.

Las PGPR son prometedoras y es recomendable continuar con el desarrollo actual en nuestra comprensión de sus distintas funciones, la capacidad y competitividad de colonización de la rizosfera, el modo de acción y su adecuada aplicación en el cultivo de café, lo que permita a los cafetaleros su utilización como componentes fiables en el manejo del sistema agrícola sostenible.

Es posible que sea necesario ajustar muchas prácticas agronómicas para maximizar el rendimiento y la calidad de la producción del café. Por lo tanto, los paquetes agronómicos deben modificarse continuamente. En los últimos años, ha resaltado la aplicación de biofertilizantes en la agricultura, con el fin de minimizar la contaminación ambiental que resultan de los fertilizantes minerales y también para reducir sus costos.

III. BIBLIOGRAFÍA

Ahemad, M; Khan, MS. 2012. Effects of pesticides on plant growth promoting traits of Mesorhizobium strain MRC4 (en línea). Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 11(1):63-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2011.10.001>.

Ahemad, M; Kibret, M. 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective (en línea). Journal of King Saud University - Science 26(1):1-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2013.05.001>.

Ahmad, F; Ahmad, I; Khan, MS. 2008. Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities (en línea). Microbiological Research 163(2):173-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2006.04.001>.

Alcarraz Curi, M; Heredia Jiménez, V; Julian Ibarra, JP. 2019. Cepas bacterianas nativas con actividades promotoras del crecimiento vegetal aisladas de la rizósfera de Coffea spp. en Pichanaqui, Perú (en línea). Biotenología Vegetal 19(4). Consultado 7 abr. 2023. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2074-86472019000400285#B8.

Baca, BE; Elmerich, C. 2003. Microbial production of plant hormones (en línea). s.l., Kluwer Academic Publishers. p. 0-00. Consultado 1 abr. 2023. Disponible en <http://www.bashanfoundation.org/contributions/Baca-B/bacamicrobila.pdf>.

Basu, A; Prasad, P; Das, SN; Kalam, S; Sayyed, RZ; Reddy, MS; Enshasy, H El. 2021. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Green Bioinoculants: Recent Developments, Constraints, and Prospects (en línea). Sustainability 13(3):1140. DOI: <https://doi.org/10.3390/SU13031140>.

Bhattacharyya, PN; Jha, DK. 2011. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture (en línea). *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 28(4):1327-1350. DOI: <https://doi.org/10.1007/S11274-011-0979-9>.

_____. 2011. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture (en línea). *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 28(4):1327-1350. DOI: <https://doi.org/10.1007/S11274-011-0979-9>.

Calderón, T; Loján Paúl. (2022). Evaluación del efecto de la aplicación de vermicompost enriquecido con bacterias promotoras del crecimiento vegetal y hongos micorrízicos en el desarrollo del café (*Coffea arabica*) (en línea). Loja, s.e. Consultado 7 abr. 2023. Disponible en [https://eventos.utpl.edu.ec/sites/default/files/files/RESUMENES CONGRESO CAFICULTURA \(1\).pdf#page=52](https://eventos.utpl.edu.ec/sites/default/files/files/RESUMENES%20CONGRESO%20CAFICULTURA%20(1).pdf#page=52).

Caldwell, AC; Silva, LCF; Da Silva, CC; Ouverney, CC. 2015. Prokaryotic Diversity in the Rhizosphere of Organic, Intensive, and Transitional Coffee Farms in Brazil (en línea). *Plos One* 10(6). DOI: <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0106355>.

Camelo, M; Vera, SP; Bonilla, RR. 2011. Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. (en línea). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 12(2):159-166. DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num2_art:227.

Egamberdieva, D; Lugtenberg, B. 2014. Use of plant growth-promoting rhizobacteria to alleviate salinity stress in plants (en línea). *Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses* 1:73-96. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9466-9_4/COVER.

Fernández Cerna, JC. 2015. Efecto de bacterias promotoras de crecimiento vegetal en el cultivo de café (*Coffea arabica* L. var. 'típica') en sus primeros estadios de su desarrollo (en línea). s.l., Universidad Nacional Agraria La Molina. .

Consultado 8 abr. 2023. Disponible en <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1888>.

Figueiredo, M do VB; Seldin, L; de Araujo, FF; Mariano, R de LR. 2010. Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Fundamentals and Applications (en línea). *Plant Growth and Health Promoting Bacteria* 18:21-43. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-13612-2_2.

Glick, BR. 2012. Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications (en línea). *Scientifica* 2012:1-15. DOI: <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.

Gray, EJ; Smith, DL. 2005. Intracellular and extracellular PGPR: commonalities and distinctions in the plant–bacterium signaling processes (en línea). *Soil Biology and Biochemistry* 37(3):395-412. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2004.08.030>.

Gutiérrez-Mañero, FJ; Ramos-Solano, B; Probanza, A; Mehouchi, J; Tadeo, FR; Talon, M. 2008. The plant-growth-promoting rhizobacteria *Bacillus pumilus* and *Bacillus licheniformis* produce high amounts of physiologically active gibberellins (en línea). *Physiologia Plantarum* 111(2):206-211. DOI: <https://doi.org/10.1034/J.1399-3054.2001.1110211.X>.

Khan, MS; Zaidi, A; Wani, PA. 2009. Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A review (en línea). *Sustainable Agriculture* :551-570. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_34/COVER.

Leibfried, A; To, JPC; Busch, W; Stehling, S; Kehle, A; Demar, M; Kieber, JJ; Lohmann, JU. 2005. WUSCHEL controls meristem function by direct regulation of cytokinin-inducible response regulators (en línea). *Nature* 438(7071):1172-1175. DOI: <https://doi.org/10.1038/NATURE04270>.

Lugtenberg, B; Kamilova, F. 2009. Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (en línea). *Annual Review of Microbiology* 63:541-556. DOI: <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.MICRO.62.081307.162918>.

Mahanty, T; Bhattacharjee, S; Goswami, M; Bhattacharyya, P; Das, B; Ghosh, A; Tribedi, P. 2016. Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development (en línea). *Environmental Science and Pollution Research* 24(4):3315-3335. DOI: <https://doi.org/10.1007/S11356-016-8104-0>.

Maheshwari, DK; Dheeman, S; Agarwal, M. 2015. *Phytohormone-Producing PGPR for Sustainable Agriculture* (en línea). s.l., Springer, Cham, vol.12. p. 159-182 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24654-3_7.

Mathesius, U; Schlaman, HRM; Spaink, HP; Sautter, C; Rolfe, BG; Djordjevic, MA. 1998. Auxin transport inhibition precedes root nodule formation in white clover roots and is regulated by flavonoids and derivatives of chitin oligosaccharides (en línea). *The Plant Journal* 14(1):23-34. DOI: <https://doi.org/10.1046/J.1365-313X.1998.00090.X>.

Moreno Reséndez, A; García Mendoza, V; Reyes Carrillo, JL; Vásquez Arroyo, J; Cano Ríos, P. 2018. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable (en línea). *Revista Colombiana de Biotecnología* XX(1):68-83. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>.

Persello-Cartieaux, F; David, P; Sarrobert, C; Thibaud, MC; Achouak, W; Robaglia, C; Nussaume, L. 2001. Utilization of mutants to analyze the interaction between *Arabidopsis thaliana* and its naturally root-associated *Pseudomonas* (en línea). *Planta* 212(2):190-198. DOI: <https://doi.org/10.1007/S004250000384>.

Posada Castaño, AM; Mejía Durango, DP; Polanco-Echeverry, D; Cardona Arias, JA. 2021. Rizobacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990-2019 (en línea). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 12(2):161-176. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.4040>.

Rajkumar, M; Ae, N; Prasad, MNV; Freitas, H. 2010. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction (en

línea). Trends in Biotechnology 28(3):142-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2009.12.002>.

Raymond, J; Siefert, JL; Staples, CR; Blankenship, RE. 2004. The Natural History of Nitrogen Fixation (en línea). Molecular Biology and Evolution 21(3):541-554. DOI: <https://doi.org/10.1093/MOLBEV/MSH047>.

Santhosh Kumar, M; Chandramohan Reddy, G; Phogat, M; Korav, S; Santhosh Kumar, CM. 2018. Role of bio-fertilizers towards sustainable agricultural development: A review (en línea). Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry 7(6):1915-1921. Consultado 30 mar. 2023. Disponible en <https://www.phytojournal.com/archives/2018.v7.i6.6494/role-of-bio-fertilizers-towards-sustainable-agricultural-development-a-review>.

Somers, E; Vanderleyden, J; Srinivasan, M. 2008. Rhizosphere Bacterial Signalling: A Love Parade Beneath Our Feet (en línea). Critical Reviews in Microbiology 30(4):205-240. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408410490468786>.

Sun, B; Bai, Z; Bao, L; Xue, L; Zhang, S; Wei, Y; Zhang, Z; Zhuang, G; Zhuang, X. 2020. Bacillus subtilis biofertilizer mitigating agricultural ammonia emission and shifting soil nitrogen cycling microbiomes (en línea). Environment International 144:105989. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.105989>.

Tsavkelova, EA; Klimova, SI; Cherdyntseva, TA; Netrusov, AI. 2006. Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: A review (en línea). Prikladnaia biokhimiia i mikrobiologiya. 42(2):133-143. Consultado 1 abr. 2023. Disponible en <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16878539/>.

Urgiles Gómez, N; Encalada, M; Granda, K; Robles, Á; Collahuazo, Y. 2021. Aislamiento y caracterización molecular de microorganismos benéficos de los sistemas agroforestales de cafetales en la región sur del Ecuador (en línea, sitio web). Consultado 8 abr. 2023. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/362080815_Aislamiento_y_caracterizaci

on_molecular_de_microorganismos_beneficos_de_los_sistemas_agroforestales_de_cafetales_en_la_region_sur_del_Ecuador.

Vejan, P; Abdullah, R; Khadiran, T; Ismail, S; Nasrulhaq Boyce, A. 2016. Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Sustainability: A Review (en línea). *Molecules* 21(5):573. DOI: <https://doi.org/10.3390/MOLECULES21050573>.

Viteri, O; Jesús, R-M; Gomiero, T. 2013. Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de café y cacao en las provincias de Orellana y sucumbíos – Ecuador (en línea). Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona. 1-303 p. Consultado 23 mar. 2023. Disponible en <https://www.tdx.cat/handle/10803/131452>.

Walker, TS; Bais, HP; Grotewold, E; Vivanco, JM. 2003. Root Exudation and Rhizosphere Biology (en línea). *Plant Physiology* 132(1):44-51. DOI: <https://doi.org/10.1104/PP.102.019661>.

Wong, WS; Tan, SN; Ge, L; Chen, X; Yong, JWH. 2015. The Importance of Phytohormones and Microbes in Biofertilizers (en línea). s.l., s.e., vol.12. p. 105-158 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24654-3_6.

Zaidi, A; Khan, MS; Ahemad, M; Oves, M. 2009. Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria (en línea). *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica* 56(3):263-284. DOI: <https://doi.org/10.1556/AMICR.56.2009.3.6>.