

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**INOCULACIÓN DE RIZOBACTERIAS PROMOTORAS
DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE
TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO CONDICIONES
DE INVERNADERO**

Tesis

**Que presenta BERNARDO ESPINOSA PALOMEQUE
como requisito para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS AGRARIAS**

Torreón, Coahuila, México

Diciembre 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**INOCULACIÓN DE RIZOBACTERIAS PROMOTORAS
DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE
TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO
CONDICIONES DE INVERNADERO**

Tesis

**Que presenta BERNARDO ESPINOSA PALOMEQUE
como requisito para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS AGRARIAS**

Dr. Pedro Cano Ríos
Director (UAAAN)

Dr. Jorge Sáenz Mata
Director Externo

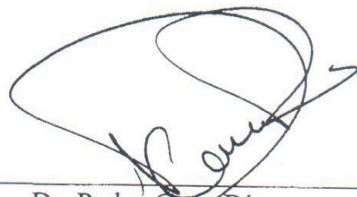
Torreón, Coahuila, México

Diciembre 2016

INOCULACIÓN DE RIZOBACTERIAS PROMOTORAS DEL
CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE TOMATE
(*Solanum lycopersicum* L.) BAJO CONDICIONES DE
INVERNADERO

Tesis

Elaborada por BERNARDO ESPINOSA PALOMEQUE como
requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias Agrarias
con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Pedro Cano Ríos
Asesor Principal



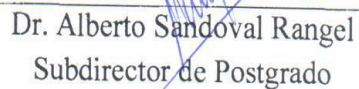
Dr. Vicente de Paul Alvarez Reyna
Asesor



Dr. Alejandro Moreno Reséndez
Asesor



Dr. Jorge Saenz Mata
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Subdirector de Postgrado



Departamento de Postgrado

Torreón, Coahuila, México

Diciembre 2016

AGRADECIMIENTO

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por darme la oportunidad de realizar los estudios de postgrado con el proyecto de investigación “Evaluación de tomate inoculado con bacterias promotoras de crecimiento vegetal “PGPR” en lombricompost + perlita + arena bajo condiciones de invernadero, con clave: 38111-425608002-2814.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada para estudios de maestría número: 001924, con número de CVU: 661904.

A mis asesores, los doctores: **Pedro Cano Ríos, Vicente de Paul Álvarez Reyna y Alejandro Moreno Reséndez, Jorge Sáenz Mata**, por compartir sus conocimientos, observaciones, enseñanzas, aceptados consejos, sugerencias, paciencia, confianza y sobre todo por la amistad recibida.

Al **Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad - Fruticultura** del Colegio de Postgraduados campus Montecillos, en especial al doctor **Crescenciano Saucedo Veloz** y al personal técnico del Laboratorio de Fisiología de Postcosecha, por su amistad, confianza y por compartir sus conocimientos y técnicas de laboratorio.

A **Esther Peña Revuelta**, por la atención brindada durante mi estancia en el postgrado de la Unidad Laguna.

Para todas aquellas personas que en este escrito estoy excluyendo, no es por ingratitud, sino por falta de memoria y espacio, sinceramente les agradezco todo su apoyo.

DEDICATORIA

A **DIOS**, por la oportunidad de vivir, por permitirme llegar a esta etapa de mi vida y darme la dicha de tener una vida llena de aprendizajes y experiencias.

A mis padres, **Jesús Palomeque Rivera** y **Amador Espinosa Soto**, con todo respeto y admiración por el gran amor y cariño que siempre me ha proporcionado, por el incansable esfuerzo que realizan día con día con el fin de darme lo mejor y sobre todo guiarme siempre por el camino correcto.

A mis hermanos, **Osmar**, **Ismael** y **Bertha**, por su confianza, apoyo, comprensión y cariño que siempre me ha demostrado.

A mi esposa **Gabriela González Rodríguez**, por su apoyo y los momentos bonitos que siempre me brinda.

A mi hijo, **Bernardo Espinosa González**, que es un ángel que Dios nos envió, su presencia hace que cada día quiera esforzarme más, por haberme permitido robarle tiempo que le pertenecía para la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE CUADRO	vi
ÍNDICE DE FIGURA	vii
COMPENDIO	viii
ABSTRACT.....	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo.....	4
1.2. Hipótesis.....	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1. Importancia del cultivo de tomate.....	5
2.2. Rizósfera.....	6
2.3. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.....	7
2.4. Bioinoculantes.....	8
2.5. Modo de acción de las RPCV	10
2.5.1. Fijación biología de nitrógeno	10
2.5.2. Biosolubilización de fosfatos.....	12
2.5.3. Producción de fitohormonas	13
2.5.4. Mecanismos de biocontrol (antagonismo).....	15
2.6. Uso de bioinoculantes en el cultivo de tomate	16
2.7. Agricultura protegida	17
2.8. Agricultura orgánica.....	18
2.9. Abonos orgánicos.....	20
2.9.1. Compost.....	22
III. ARTÍCULO ENVIADO A LA REVISTA TERRA LATINOAMERICANA. INOCULACIÓN DE RIZOBACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO	23
IV. CONCLUSIONES GENERALES.....	44
V. LITERATURA CITADA	45

ÍNDICE DE CUADRO

Cuadro 1. Tratamientos establecidos con diferentes composiciones de sustrato y RPCV inoculadas en tomate bajo condiciones de invernadero.	29
Cuadro 2. Características químicas del compost y arena empleados como medio de crecimiento de tomate bajo condiciones de invernadero.	29
Cuadro 3. Cuadrados medios y significancia estadística para las variables de calidad de fruto y rendimiento total en el cultivo de tomate desarrollado en invernadero.	32
Cuadro 4. Resultados del análisis de varianza de la interacción sustratos x RPCV, sobre la calidad de fruto del cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero.	34
Cuadro 5. Resultados del análisis de varianza de la interacción sustratos x RPCV, sobre el contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante de frutos de tomate.....	36
Cuadro 6. Valores promedio y diferencia estadística en peso de fruto y rendimiento total de del cultivo de tomate inoculado con RPCV, bajo condiciones de invernadero.	37

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Atracción, adhesión y colonización bacteriana como determinantes para ejercer los mecanismos de estimulación de crecimiento vegetal.....	8
Figura 2. Esquema de la FBN en plantas no-leguminosas donde interaccionan bacterias de vida libre y plantas leguminosas donde interaccionan bacterias mutualistas.....	11

COMPENDIO

INOCULACIÓN DE RIZOBACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO

POR: BERNARDO ESPINOSA PALOMEQUE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE 2016

Dr. Pedro Cano Ríos - Asesor

Palabras claves: agricultura protegida, calidad nutracéutica, sustratos, RPCV.

La producción de los cultivos agrícolas, entre otros factores, es impactada por el clima, el suelo, el agua y los microorganismos rizosféricos. De estos últimos las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), han desempeñado funciones importantes en las plantas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la inoculación de tres RPCV utilizando sustratos base a de compost o arena de río, sobre el rendimiento y calidad de frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. El diseño experimental utilizado fue bloques completamente al azar con cinco repeticiones, en arreglo factorial 2x4, donde los factores fueron: A) sustratos y B) RPCV. Las variables evaluadas fueron: diámetro polar y ecuatorial, espesor de pericarpio, contenido de sólidos solubles, firmeza, fenoles totales, capacidad antioxidante y rendimiento total. Los datos fueron analizados estadísticamente por análisis de varianza y las comparaciones de medias mediante la prueba de DMS 0.05%. Los frutos provenientes del tratamiento T1 presentaron los

mayores valores respecto al diámetro polar y ecuatorial, contenido de sólidos solubles, firmeza, contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante, con valores de 6.54 cm, 5.50 cm, 5.94 °Brix, 12.54 N, 51.70 mg de AG 100 g⁻¹ fruto fresco (FF) y 66.68 μM Trolox g⁻¹ FF, respectivamente. La aplicación de RPCV y utilización del sustrato a base de compost podrían ser una alternativa de fertilización en la producción de tomate en invernadero, así como incrementar el rendimiento y calidad nutracéutica de los frutos sin la aplicación de fertilizantes inorgánicos.

ABSTRACT

INOCULATION OF PLANT GROWTH-PROMOTING RHIZOBACTERIA IN TOMATO (*Solanum lycopersicum* L.) CROPS UNDER GREENHOUSE CONDITIONS

BY: BERNARDO ESPINOSA PALOMEQUE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA**

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE 2016

Ph. D. Pedro Cano Ríos - Adviser

Keywords: protected agriculture, nutraceutical quality, substrates, PGPR.

Production of agricultural crops is affected, among other factors, by weather, soil, water, and microorganisms in the rhizosphere. Of these last, plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) have performed important functions in plants. The objective of this study was to evaluate the effect of inoculating three PGPR, using compost or river sand based substrates, on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit yield and quality under greenhouse conditions. The experimental design used was completely randomized blocks with five replicates in a 2x4 factorial arrangement, where the factors were: A) substrates, and B) PGPR. The evaluated variables were: polar and equatorial diameter, pericarp thickness, content of soluble solids, firmness, total phenols, antioxidant capability, and total yield. The data were statistically analyzed through analysis of variance and mean comparisons through the DMS test, 0.05%. The fruits from the T1 treatment had the highest values in polar and equatorial diameter, content of total soluble solids, firmness,

total phenol content, and antioxidant capability: 6.54 cm, 5.50 cm, 5.94 °Brix, 12.54 N, 51.70 mg AG 100 g⁻¹ fresh fruit (FF), and 66.68 μM Trolox g⁻¹ FF, respectively. The application of PGPR and the use of the compost based substrate could be a fertilization alternative for greenhouse tomato production, as well as increase yield and nutraceutical quality of the fruits without applying inorganic fertilizers.

I. INTRODUCCIÓN

El tomate (*S. lycopersicum*) ([Peralta, Knapp, & Spooner, 2005](#)) es uno de los cultivos más importantes en el mundo. El fruto de esta hortaliza es parte constituyente de los principales componentes de la alimentación diaria de la población de muchos países, ya que es una fuente importante de minerales, vitaminas y compuestos antioxidante ([Fraser, Enfissi, & Bramley, 2009](#)). Entre los principales países productores de este cultivo se encuentra China, India, EE.UU., Turquía, Egipto, Irán, Italia, España, Brasil y México ([FAOSTAT, 2013](#)), en este último el cultivo de tomate es de gran importancia, debido a que 70%, de las 20 000 ha, que se producen bajo condiciones protegidas corresponde al tomate ([Juárez-Maldonado, de Alba, Zermeño, Ramírez, & Benavides, 2015](#)). En la actualidad los productores están interesados en la búsqueda de nuevos sistemas de producción que logren incrementar los rendimientos y obtener productos de excelente calidad ([Santiago-López et al., 2016](#)). Debido a lo anterior han surgido insumos agrícolas a base microorganismos y otros materiales de origen orgánico, como las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) ([Kloepper & Schroth, 1978](#)) y sustratos a base de compost ([Raviv, 2015](#)), opciones que fortalecen el enfoque de la agricultura sustentable ([Pretty, 2008](#)).

Para lograr incrementar los rendimientos del cultivo de tomate, tanto en condiciones de campo abierto como en agricultura protegida es de vital importancia la obtención de plántulas sanas y vigorosas ([Carballo, 1992](#); [Costales, Lisbel, & Miriam, 2007](#)), en este sentido se ha propuesto el uso de RPCV del suelo que florecen en la rizósfera de las plantas o alrededor de los tejidos vegetales, las cuales estimulan el crecimiento de las plantas ([Almaghrabi, Massoud, & Abdelmoneim, 2013](#); [Ashrafuzzaman et al., 2009](#); [Vessey, 2003](#)), entre ellas se encuentran las cepas de los géneros *Aeromonas*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Azoarcus*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Gluconacetobacter*, *Flavobacterim*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia* y entre otros ([Rodríguez & Fraga, 1999](#); [Spaepen, Vanderleyden, & Okon, 2009](#)), las cuales son capaces de estimular el crecimiento y desarrollo de las plantas mediante diversos mecanismos, directos o indirectos, y poseen varios modos de acción complejos que interactúan entre sí para establecer relaciones benéficas, especialmente con

las raíces de las plantas objetivo ([Ahmad, Ahmad, & Khan, 2008](#); [Camelo, Vera, & Bonilla, 2011](#); [Chirinos, Leal, & Montilla, 2006](#)).

Algunos de los procesos fisiológicos favorecidos en los cultivos inoculados con RPCV son: fijación biológica de nitrógeno, solubilización de fosfatos, síntesis de fitohormonas como las auxinas, particularmente el ácido-indo-3-acético (AIA), promueven el crecimiento de las raíces y la proliferación de pelos radicales, mejorando la absorción de agua y minerales del suelo y con ello el mejor y mayor desarrollo de las plantas. Otra ventaja importante del uso de las RPCV es inhibir el desarrollo de microorganismos fitopatógenos ([Caballero-Mellado, 2006](#); [Camelo *et al.*, 2011](#); [Escobar, Horna, Careño, & Mendoza, 2011](#); [Lucy, Reed, & Glick, 2004](#)). De acuerdo a [Bashan y de-Bashan \(2010\)](#) las RPCV actúan como elicitores naturales mejorando el crecimiento y rendimiento de los cultivos vegetales.

Por lo tanto, el empleo de biofertilizantes base de RPCV, aplicados al suelo y/o plantas, podrían ser una alternativa biotecnológica para la producción de cultivos agrícola reduciendo la aplicación de fertilizantes sintéticos y de agroquímicos que deterioran el ambiente ([Armenta-Bojórquez *et al.*, 2010](#); [Çakmakçi, Dönmez, Aydın, & Şahin, 2006](#); [Martínez, Martínez, Hernández, Arvizu, & Pacheco, 2013](#); [Sánchez, Gómez, Garrido, & Bonilla, 2012](#); [Yang, Kloepper, & Ryu, 2009](#)). Según [Nuncio-Orta, Mendoza-Villarreal, Robledo-Torres, Vázquez-Badillo, y Almaraz-Suárez \(2015\)](#) la concentración de inóculo bacterianos que oscila entre 10^4 a 10^8 UFC mL⁻¹ aplicado en semillas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv Grande), no presentaron diferencia en germinación y vigor de las plántulas, lo cual indica que las concentraciones tienen un mismo efecto sobre lo antes mencionado. El género *Pseudomonas* fue caracterizada como RPCV debido a su actividad productora de sideróforos, ácido indolacético y solubilización de fosfatos ([Díaz, Ferrera-Cerrato, Almaraz, & Alcántar, 2001](#)). Por otra parte [Kang *et al.* \(2012\)](#) indicaron que, la inoculación de los géneros de *P. putida* y *P. fluorescens* cultivo de tomate se mejoró significativamente la longitud del tallo, biomasa de la planta y contenido de clorofila en comparación de plantas tratadas con solución nutritiva inorgánica ([Almaghrabi *et al.*, 2013](#)).

El género *Bacillus* se ha aislado de numerosos cultivos de interés económico, y ha demostrado diferentes capacidades en asociación a plantas, como la producción de fitohormonas, como las auxinas, el control biológico, mediante la producción de antibióticos, sideróforos y enzimas líticas, la solubilización de fosfatos y la fijación del nitrógeno ([Tejera, Rojas, & Heydrich, 2011](#)). Por otro lado [Inbar y Chet \(1991b\)](#) destacan que, la aplicación de *Aeromonas caviae* fue eficaz para controlar el ataque de hongos patógenos, *Rhizoctonia solani* y *Fusarium oxysporum* f. *sp. vasinfectum* en el cultivo de algodón (*Gossypium barbardense* L. cv. “Pima”) y *Sclerotium rolfsii* en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. cv. “Mangold”).

Se ha demostrado en varios estudios que las plantas de tomate inoculadas con RPCV presentaron un incremento en longitud del tallo, peso fresco y seco de la parte aérea, biomasa radicular, número de flores, número de frutos y rendimiento en comparación a plantas sin inoculación ([Martínez et al., 2013](#); [Mayak, Tirosh, & Glick, 2001](#); [Mena-Violante, Cruz-Hernández, Paredes-López, Gómez-Lim, & Olalde-Portugal, 2009](#); [Sánchez et al., 2012](#)). Por otra parte, el compost como abono orgánico contiene considerables cantidades de elementos nutritivos que puede complementar la nutrición de las plantas ([Raviv et al., 2005](#)), su aplicación mejora el crecimiento, desarrollo y por consecuencia una mayor productividad de los cultivos, lo cual se debe a las propiedades físicas y químicas del abono ([de la Cruz-Lázaro et al., 2009](#)); aporta N, P, K, Ca, Mg y hormonas promotoras del crecimiento (auxinas, citoquininas, giberelinas) ([Olivares-Campos, Hernández-Rodríguez, Vences-Contretas, Jáquez-Balderrama, & Ojeda-Barrios, 2012](#)). Según [Viti et al. \(2010\)](#) una de las características del compost es estimular el desarrollo de las RPCV. Debido a lo anterior, el compost puede usarse como sustrato para la producción de cultivos hortícolas en invernadero ([Rodríguez et al., 2008](#)). Bajo este contexto las RPCV y el compost podría ser una alternativa para la producción de tomate, por lo tanto la presente investigación se plantea lo siguiente.

1.1. Objetivo

Evaluar el efecto de la inoculación de tres rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (*Bacillus spp.*, *Aeromonas spp.* y *Pseudomonas lini*) utilizado sustratos a base compost o arena de río sobre el rendimiento y calidad de frutos tomate *cv.* Afrodita bajo condiciones de invernadero.

1.2. Hipótesis

La inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, además del sustrato, incidirá sobre el rendimiento y calidad de frutos de tomate producido bajo condiciones de invernadero.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia del cultivo de tomate

El tomate es la segunda hortaliza más consumida en el mundo ([Foolad, 2007](#)). Su fruto de parte constituyente de los principales componentes de la alimentación diaria de la población de muchos países, ya que es una fuente importante de minerales, vitaminas y compuestos antioxidantes ([Dorai, Papadopoulos, & Gosselin, 2001](#)). En lo que respecta a los países productores de tomate, sobresalen China (50 664 255 t), India (18 227 000 t), EE.UU. (12 574 550 t), Turquía (11 820 000 t), Egipto (8 533 803 t), Irán (6 174 182 t), Italia (4 932 463 t), Brasil (4 187 646 t), España (3 683 600 t) y México (3 282 583 t) ([FAOSTAT, 2013](#)), en este último, el tomate es una de las hortalizas de mayor importancia por su superficie cultivada, por divisas y número de empleos que genera, y por su valor alimenticio y cultural. Prácticamente el cultivo de tomate se produce en todo el territorio de la República Mexicana, sin embargo solo en siete estados de ésta se concentra el 60.33% de la producción nacional, destacando los estados de Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán de Ocampo, Jalisco, Zacatecas, Baja California Sur y Baja California Norte ([SAGARPA, 2014](#)). De acuerdo [Juárez-Maldonado et al. \(2015\)](#) el cultivo de tomate es sumamente importante en México, ya que ocupa el 70% de las 20 000 ha producidas bajo condiciones protegidas.

Además de su importancia económica, los frutos de tomate ha atraído la atención por sus contenidos de antioxidantes lo cuales son compuestos capaces de inhibir o retardar la oxidación, mediante la “captación” de radicales libres; también estabilizan hidroperóxidos o inactivan el oxígeno en un estado excitado. Los frutos de tomate han sido considerados una fuente importante de antioxidantes “nutricionales” (vitaminas A, C y E) y “fitoquímicos no nutritivos” (licopeno, flavonoides, flavonas y compuestos fenólicos totales), cuyo consumo está relacionado con su potencial antimutagénico y propiedades anticancerígenas ([Luna-Guevara & Delgado-Alvarado, 2014](#)). El licopeno y los carotenoides, los cuales son responsable del color rojo de los frutos, previenen enfermedades crónicas como cáncer, enfermedades cardiovasculares y

neurodegenerativas, e hipertensión, entre otras, en las cuales el estrés oxidativo es un importante factor etiológico. Los antioxidantes, incluyendo al licopeno, interactúan con las especies reactivas del oxígeno, mitigando el efecto dañino y juegan un papel significativo en la prevención de dichas enfermedades ([Toor & Savage, 2006](#); [Waliszewski & Blasco, 2010](#)). Derivado de lo anterior, los criterios de calidad más importantes para el consumo de tomate en fresco se determinan por la apariencia (color, tamaño, forma y ausencia de trastornos fisiológicos), la firmeza, la textura, materia seca y las propiedades organolépticas (sabor) y nutracéuticas (beneficios para la salud). La calidad organoléptica del tomate se atribuye principalmente a su volátil de aroma, los azúcares y el contenido de ácidos, mientras que su contenido de minerales, vitaminas, carotenoides y flavonoides definen la calidad nutracéutica ([Beckles, Hong, Stamova, & Luengwilai, 2011](#); [Dorais, Papadopoulos, & Gosselin, 2001](#); [Waliszewski & Blasco, 2010](#)).

2.2. Rizósfera

El desarrollo y crecimiento de los cultivos agrícolas está influenciado por diversos factores bióticos y abióticos. La rizósfera es la capa de suelo que rodea las raíces de las plantas, es un hábitat muy favorable para la proliferación de microorganismos y ejerce un impacto potencial sobre la salud de las plantas y la fertilidad del suelo. La rizósfera fue descrita por Lorenzo Hiltner en el año 1904, como la estrecha zona del suelo que rodea las raíces, donde las poblaciones de microorganismos son estimuladas por los exudados de las raíces de las plantas ([Hartmann, Rothballer, & Schmid, 2008](#)). El concepto original de rizósfera se ha ampliado para incluir el suelo que rodea a la raíz en la que las propiedades físicas, químicas y biológicas se han cambiado por el crecimiento y actividad de las raíces. Gran número de microorganismos como bacterias, protozoarios, nematodos y hongos coexisten en la rizósfera, siendo las bacterias los microorganismos más abundante ([Weston, Ryan, & Watt, 2012](#)). Los microorganismos que colonizan la rizósfera pueden clasificarse en función de sus efectos sobre las plantas y forma de interactuar con las raíces, siendo algunos patógenos y otros benéficos ([Saharan & Nehra, 2011](#)).

Los microorganismos de la rizósfera son esenciales porque juegan un papel muy importante en la metabolización o transformación de los nutrimentos de las plantas y

pueden producir fitohormonas las cuales son importantes para el desarrollo de la planta. Dentro de éstos microorganismos se encuentran las bacterias promotoras del crecimiento vegetal, y de éstas las más estudiadas son las rizobacterias ([López, Cruz, Fernández, & Mendoza, 2015](#)).

2.3. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal

En años recientes, se ha retomado el uso bacterias del suelo que florecen en la rizósfera de plantas o alrededor de los tejidos vegetales que estimulan el crecimiento y rendimiento de las plantas ([Almaghrabi et al., 2013](#); [Ashrafuzzaman et al., 2009](#); [Khalid, Arshad, & Zahir, 2006](#); [Wu, Cao, Li, Cheung, & Wong, 2005](#)). Estas bacterias se conocen como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal ([Kloepper & Schroth, 1978](#)), y entre ellas se encuentran los géneros tales como *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterim*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia* y entre otros ([Rodríguez & Fraga, 1999](#); [Spaepen et al., 2009](#)). Las RPCV son capaces de colonizar raíces de las plantas y mejorar su crecimiento, de manera directa e indirecta, y poseen varios modos de acción complejos que interactúan entre sí para establecer relaciones benéficas ([Camelo et al., 2011](#); [Minorsky, 2007](#)).

La promoción del crecimiento vegetal directa por las RPCV se puede derivar de la solubilización del fósforo, producción de reguladores de crecimiento, tales como auxinas, giberelinas (GAs), citoquininas e inhibidores de etileno, mediante la obtención de las actividades metabólicas de las raíces y/o mediante el suministro de nitrógeno fijado biológicamente ([Khan, Zaidi, & Wani, 2007](#); [Spaepen et al., 2009](#)). La promoción indirecta del crecimiento de las plantas se efectúa cuando las RPCV producen sideróforos los cuales pueden solubilizar y quelar el hierro de la rizósfera y así de este modo inhiben el crecimiento de uno o más microorganismo fitopatógenos (Figura 1) ([Ahmad et al., 2008](#); [Caballero-Mellado, 2006](#)), de igual manera son capaces de producir y secretar quitinasas, las cuales se ha demostrado ser eficaces como agente de control biológico ([Inbar & Chet, 1991a](#)). Las actividades positivas que ejercen las RPCV en las plantas

pueden incluir aquellas que son de interés agrícola, logrando incrementos en la producción y reducción de costos y no causan daños al ambiente o la salud humana ([Rojas-Solís, Hernández-Pacheco, & Santoyo, 2016](#)). Además algunas RPCV tienen, también una función en la degradación de contaminantes orgánicos ([Saharan & Nehra, 2011](#)).

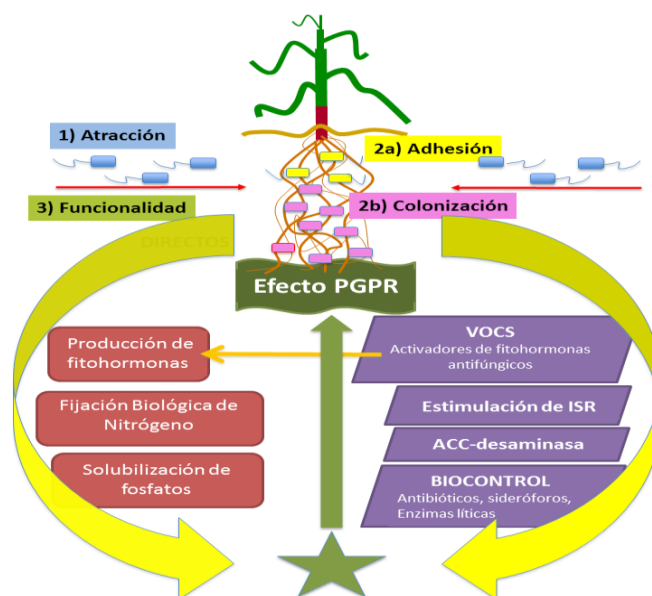


Figura 1. Atracción, adhesión y colonización bacteriana como determinantes para ejercer los mecanismos de estimulación de crecimiento vegetal ([Molina et al., 2015](#)).

2.4. Bioinoculantes

El uso de bioinoculantes en la agricultura ha aumentado considerablemente durante las últimas dos décadas ([Hayat, Ali, Amara, Khalid, & Ahmed, 2010](#)), éstos son a base de microorganismos aplicados al suelo y/o planta con el fin de sustituir parcial o totalmente la fertilización sintética así como disminuir la contaminación generada por los agroquímicos ([Armenta-Bojórquez et al., 2010](#)). Varios bioinoculantes en base a las RPCV son utilizados comercialmente. Se les llama con nombres diferentes y tienen distintos mecanismos de acción: (i) bioprotectores, reducen los daños causados por patógenos; (ii) biofertilizantes, mejoran la adquisición de elementos nutritivos; (iii) bioestimulantes, a través de la producción de fitohormonas. Los mayores avances se han reportado con los bioprotectores y con los géneros bacteriano: *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Streptomyces*, *Pseudomonas*, *Burkholderia* y *Agrobacterium*, que se utilizan actualmente

como agentes de control biológico por disminuir la incidencia de enfermedades en las plantas mediante la inducción de resistencia sistemática y la producción de sideróforos o antibióticos ([Tjamos, Tjamos, & Antoniun, 2010](#)).

La aplicación de las RPCV ofrece una alternativa para disminuir el suministro de fertilizantes sintéticos, pesticidas y suplementos ya que la mayoría de los aislamientos han realizado incrementos significativos en el crecimiento de las plantas, tanto en raíces y/o parte aérea ([Khalid et al., 2006](#)). Algunas RPCV cuando son inoculan en las semillas antes de la siembra, son capaces de establecerse en las raíces de los cultivos ([Saharan & Nehra, 2011](#)). En los sistemas de producción sostenible, donde se minimizan las aplicaciones de agroquímicos, las RPCV podrían ser un componente fundamental para lograr obtener plántulas más vigorosas que serían tolerantes a nematodos y otras enfermedades en al menos un par de semanas después del trasplante ([Kloepper et al., 2004](#)). Algunas RPCV mejoran la salud de las plantas mediante el proceso denominado resistencia sistémica inducida (RSI), mecanismo de defensa a un amplio rango de agentes fitopatógenos e insectos herbívoros ([Pieterse et al., 2014](#)). Las RPCV logran RSI a través de la fortificación de la fuerza física y mecánica de la pared celular, así como el cambio de la reacción fisiológica y bioquímica de la planta que conduce a la síntesis de productos químicos de defensa contra patógenos. La inducción de la RSI es a través de las vías de señalización del ácido jasmónico y del etileno ([Reddy, 2014](#)).

Aunado a lo anterior, las cepas de las RPCV comercializadas incluyen *A. radiobacter*, *A. brasilense*, *A. lipoferum*, *Azotobacter chroococcum*, *B. fimus*, *B. licheniformis*, *B. megaterium*, *B. mucilaginous*, *B. pumilus*, *Bacillus spp.*, *B. subtilis*, *B. subtilis* var. *amyloliquedaciens*, *B. cepacia*, *Delftia acidovorans*, *Paenobacillus macerans*, *Pantoea agglomerans*, *P. aureofaciens*, *P. chlororaphis*, *P. fluorescens*, *P. solanacearum*, *Pseudomonas spp.*, *P. syringae*, *S. entomophilia*, *S. griseoviridis*, *Streptomyces spp.*, *S. lydicus* y varias *Rhizobia spp.* Sin embargo los cultivos inoculados con RPCV representan sólo una pequeña fracción de la práctica agrícola mundial ([Glick, 2012](#)).

2.5. Modo de acción de las RPCV

La promoción del crecimiento de las plantas por las RPCV es un fenómeno bien conocido, y esta mejora del crecimiento se debe a ciertos rasgos de las rizobacterias. Algunos de estos rasgos son muy comunes entre ciertas especies bacterianas; sin embargo, otros rasgos podrían ser específicos con algunas especies en particular. Existen varios mecanismos utilizados por las RPCV para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas en diversas condiciones ambientales. En general, las RPCV funcionan como biofertilizantes, bioestimuladores y bioprotectores ([Nadeem, Naveed, Zahir, & Asghar, 2013](#); [Tjamos *et al.*, 2010](#); [Vessey, 2003](#)).

2.5.1. Fijación biológica de nitrógeno

El nitrógeno (N) es un elemento esencial para todas las formas de vida; es indispensable para la síntesis de ácidos nucleicos, proteínas y otros compuestos orgánicos nitrogenados. Lamentablemente no hay especies de plantas que sean capaz de convertir el nitrógeno atmosférico (N_2) a amonio (NH_4^+) ([Das, Kumar, & Kumar, 2013](#)). Por lo tanto las plantas dependen de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) que se define como la conversión de N_2 a NH_4^+ , compuesto químico del N que puede ser utilizado por la planta, la transformación de N_2 a N biodisponible se consigue mediante la enzima denominada nitrogenasa ([Kim & Rees, 1994](#)). De hecho, la FBN representa aproximadamente dos tercios del N fijado a nivel mundial, mientras que el resto del N es aportado principalmente por el proceso industrial Haber-Bosch ([Rubio & Ludden, 2008](#)), el cual consiste en hacer reaccionar las sustancias elementales N_2 , e hidrógeno (H_2), a alta temperatura, alta presión y en presencia de un catalizador ([Sosa, 2015](#)). Dada la volatilidad (y la tendencia general a la alza) de los precios del petróleo y los intentos mundiales de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso agrícola de N que contienen los fertilizantes sintéticos producidos por el proceso Haber-Bosch, la FBN podría ser una alternativa en la sustitución de los fertilizantes inorgánicos en los sistemas de producción de cultivos no leguminosos ([James & Baldani, 2012](#)).

La fijación biológica de nitrógeno se lleva a cabo en bacterias asociadas a plantas y en bacterias de vida libre, que están ampliamente distribuidas en la naturaleza (Figura 2) ([Molina et al., 2015](#)). Los microorganismos fijadores de nitrógeno se clasifican en general como: (a) bacterias fijadoras de N₂, incluyendo miembros de la familia rhizobiaceae que forman simbiosis con plantas leguminosas (por ejemplo, rizobios) y actualmente incluyen más de 50 especies distribuidas en los géneros *Rhizobium*, *Ensifer*, *Mesorhizobium*, *Azorhizobium* y *Bradyrhizobium* ([Ahemad & Khan, 2010](#); [Velázquez, García-Fraile, Ramírez-Bahena, Rivas, & Martínez-Molina, 2010](#)) y árboles no leguminosos (por ejemplo, *Frankia*) y (b) formas fijadoras de N no simbióticas (vida libre, asociativa y endófitas) tales como cianobacterias (*Anabaena*, *Nostoc*), *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Gluconoacetobacter diazotrophicus* y *Azocarus*, etcétera ([Bhattacharyya & Jha, 2012](#); [Das et al., 2013](#)). La fijación biológica de N es catalizado por la enzima nitrogenasa sensible al oxígeno, presente dentro de las bacterias, mediante la siguiente reacción ([Bhattacharjee, Singh, & Mukhopadhyay, 2008](#)):

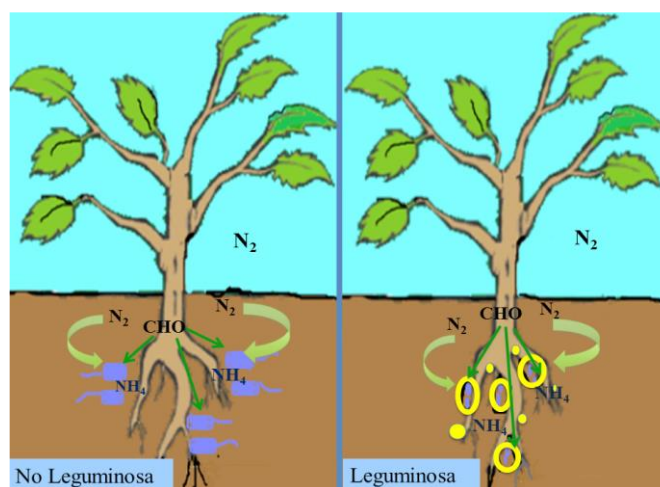
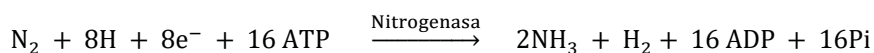


Figura 2. Esquema de la FBN en plantas no-leguminosas donde interaccionan bacterias de vida libre y plantas leguminosas donde interaccionan bacterias mutualistas. En el primer caso las bacterias solo se asocian a las raíces de las plantas y en el segundo caso las bacterias realizan una asociación íntima dentro de estructuras denominadas nódulos; donde las bacterias son protegidas del oxígeno y la nitrogenasa puede realizar su actividad con mayor eficiencia. En ambos casos las bacterias reciben fuente de carbono de las plantas (CHO) y a cambio ellas les proveen de nitrógeno combinado (NH₄⁺) obtenido del proceso de la FBN ([Molina et al., 2015](#)).

2.5.2. Biosolubilización de fosfatos

El papel de los microorganismos rizosféricos en la solubilización mineral de fosfato se remonta al año 1903 ([Khan *et al.*, 2007](#)). El fósforo (P) es el segundo elemento después del N, esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La mayoría de los suelos agrícolas contienen grandes reservas de P, que se han acumulado principalmente como consecuencia de las aplicaciones regulares de fertilizantes. Incluso en suelos ricos en P, la mayor parte del P no está disponible para las plantas, se encuentra en su forma insoluble ([Castagno, Estrella, Sannazzaro, Grassano, & Ruiz, 2011](#)). Además el 75% de los fertilizantes fosfatados solubles añadidos a los cultivos pueden convertirse en forma poco soluble por reacción con los iones Ca^{2+} libres en suelos de alto pH o con Fe^{3+} o Al^{3+} en suelos de pH bajo ([Hariprasad & Niranjana, 2008](#)).

El P solo es asimilable en la forma monobásica: $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ y dibásica: HPO_4^{-2} , compuestos disponibles para las plantas, aunque en condiciones de campo comúnmente se mantienen en bajas concentraciones ([Vessey, 2003](#)). Las RPCV pueden utilizarse para convertir el P insoluble, presente en el suelo, en una forma asimilable, para lograr incrementar los rendimientos de las plantas ([Jha, Gandhi Pragash, Cletus, Raman, & Sakthivel, 2008](#); [Rodríguez, Fraga, Gonzalez, & Bashan, 2006](#)).

Las bacterias solubilizan fosfato al producir ácidos orgánicos como ácido cítrico, láctico, succínico y glucónico (la acidificación libera los fosfatos y cationes de Ca^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+} al suelo) ([Hariprasad & Niranjana, 2008](#)). También se puede solubilizar el fosfato por medio de las enzimas fitasa o C-P linasa que presentan algunos microorganismos ([Richardson, 2001](#)). Otra forma de realizar la solubilización del fosfato orgánico a inorgánico, es por medio de la enzima fosfatasa, la cual hidroliza los enlaces orgánicos fosfatados liberando aniones fosfato a la solución del suelo de donde los microorganismos y las raíces de las plantas se nutren ([Pérez, Sulbarán, Ball, & Yarzabal, 2007](#)). La liberación de las formas solubles a partir de fósforo mineral, se realiza con la producción de ácidos orgánicos como el ácido glucónico o 2-ceto-glucónico, la bioproducción de estos ácidos depende de la fuente de carbono (C) disponible en la rizósfera ([Ahemad & Khan,](#)

[2012](#)). Los géneros bacterianos capaces de solubilizar fosfato son: *Aereobacter*, *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Agrobacterium*, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Microbacterium*, *Serratia*, *Beijerinckia*, así como las especies: *A. chroococcum*, *B. circulans*, *Cladosporium harbarum*, *Bradyrhizobium japonicum*, *E. agglomerans*, *P. putida*, *P. chlororaphis*, *R. leguminosarum* ([Díaz et al., 2001](#); [Molina et al., 2015](#); [Rodríguez & Fraga, 1999](#)).

2.5.3. Producción de fitohormonas

Las fitohormonas vegetales son mensajeros químicos que afectan la capacidad de respuesta de las plantas a su ambiente, son compuestos orgánicos eficaces a muy baja concentración, por lo general son sintetizados en una parte de la planta y son transportados a otra parte. Interactúan con tejidos específicos para causar respuestas fisiológicas, tales como crecimiento o maduración de los frutos. Cada respuesta es a menudo el resultado de dos o más fitohormonas que actúan juntas. Las fitohormonas estimulan o inhiben el crecimiento de plantas, debido a esto también son nombradas reguladores del crecimiento, se reconocen principalmente cinco grupos: auxinas, citoquininas, giberelinas, etileno y el ácido abscísico ([Saharan & Nehra, 2011](#)). Estas fitohormonas están involucradas en el crecimiento y desarrollo de las plantas en virtud de su efecto, por ejemplo las auxinas se involucran principalmente en el aumento de células, las citoquininas en la división celular y las giberelinas en el alargamiento del tallo estimulando la división celular y el alargamiento celular, mientras que el etileno y el ácido abscísico en la maduración de frutos y senescencia de las plantas ([Khalid et al., 2006](#)).

La bioestimulación es considerada el mecanismo más estudiado de las RPCV ([Lugtenberg & Kamilova, 2009](#)), las fitohormonas tal como las auxinas (principalmente AIA), ácido giberélico y citoquininas producidas por las RPCV pueden alterar la arquitectura de las raíces y promover el desarrollo de las plantas ([Kloepper, Gutierrez-Estrada, & McInroy, 2007](#); [Nadeem et al., 2013](#); [Tjamos et al., 2010](#)). El AIA es la auxina más estudiada, producida por las rizobacterias, afecta la división, extensión y diferenciación celular de las plantas; estimula la germinación de semillas y tubérculos; incrementa la tasa de

desarrollo del xilema y raíces; controla los procesos de crecimiento vegetativo; inicia la formación de raíces laterales y adventicias, mediante las respuestas a la luz, la gravedad y fluorescencia; afecta a la fotosíntesis, la formación de pigmento, la biosíntesis de diversos metabolitos y la resistencia a condiciones estresantes ([Tsavkelova, Klimova, Cherdyntseva, & Netrusov, 2006](#)). Es sintetizado por diversa vías metabólicas en función de la bacteria a partir del triptófano también presente en los exudados de las raíces ([Camelo et al., 2011](#)). En general, el AIA bacteriano aumenta el área superficial y la longitud de la raíz, y por lo tanto proporciona a la planta un mayor acceso a los elementos nutritivos del suelo. Además, el AIA bacteriano ablanda las paredes celulares de las plantas y, como resultado, facilita una cantidad creciente de exudación de la raíz que proporciona elementos nutritivos adicionales para soportar el crecimiento de las bacterias de la rizósfera ([Glick, 2012](#)). Los organismos capaces de sintetizar el AIA son *Acetobacter*, *Azospirillum*, *Alcaligenes*, *Enterobacter*, *Mycobacterium*, *Microbacterium*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Shingomonas* y *Xanthomonas* ([Jha et al., 2008](#); [Patten & Glick, 1995](#); [Tsavkelova et al., 2007](#)). Estos géneros sintetizan el AIA, principalmente por la vía de indol-3-ácido pirúvico, la indol 3-acetonitrilo, la triptamina y la del indol-3-acetamida ([Castagno et al., 2011](#); [Loper & Schroth, 1986](#); [Molina et al., 2015](#)).

Las citoquininas son derivados purínicos que actúan como promotores del crecimiento vegetal e influyen en diversos procesos fisiológicos y desarrollos de las plantas tales como la división celular, germinación de semillas, desarrollo de raíces primarias, formación de raíces adventicias, acumulación de clorofila, expansión foliar, formación de brotes y el retraso de la senescencia. Las plantas usan continuamente citoquininas para mantener las reservas de células madre totipotentes en sus meristemas de brotes y raíces ([García, Hynes, & Nelson, 2001](#); [Ortíz-Castro, Contreras-Cornejo, Macías-Rodríguez, & López-Bucio, 2014](#)). Las citoquininas se forman en cualquier tejido vegetal (tallos, raíces, hojas, flores, frutos o semillas), aunque se acepta en general, que en las raíces se producen las mayores cantidades de estas fitohormonas ([Dobbelaere, Vanderleyden, & Okon, 2003](#)). Ejemplos de algunos géneros de RPCV incluidas en la producción de citoquininas *Agrobacterium*, *Aminobacter*, *Arthrobacter*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Blastobacter*, *Escherichia*, *Erwinia*, *Hyphomicrobium*, *Methilobacterium*, *Methylobacterium*,

Methylobacter, *Methylobacterium*, *Methylomonas*, *Methylophylus*, *Methylosinus*, *Methylovorus*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Rhodococcus*, *Streptomyces*, *Xanthobacter* ([Tsavkelova et al., 2006](#)). Además se ha reportado la producción de citoquininas (especialmente zeatina) en varias especies de RPCV como son *A. giacomelloi*, *A. brasilense*, *B. japonicum*, *B. licheniformis*, *P. fluorescens* y *P. polymyxa* ([Vacheron et al., 2013](#)).

Las GAs son moléculas complejas con grupos di-terpenos tetracarboxílicos. Se han caracterizado 136 giberelinas en plantas superiores (128 especies), 28 GAs en hongos (siete especies) y solo cuatro GAs (GA₁, GA₃, GA₄ y GA₂₀) en bacterias (siete especies) ([MacMillan, 2002](#)). Estas fitohormonas están involucradas en diversas funciones metabólicas requeridas por las plantas tal como la germinación de semillas, la elongación del tallo, la altura de la planta, la expresión sexual, la floración, la formación de frutos, la senescencia y también promueven el alargamiento de la raíz principal y la expansión de las raíces laterales ([Babalola, 2010](#); [Camelo et al., 2011](#); [Kang et al., 2014](#); [Yaxley, Ross, Sherriff, & Reid, 2001](#)). La producción de GAs ha sido documentada en varias RPCV por ejemplo, *Acinetobacter spp.*, *Agrobacterium spp.*, *Arthrobacter spp.*, *A. xylosoxidans*, *A. calcoaceticus*, *Azospirillum spp.*, *Azotobacter spp.*, *Bacillus spp.*, *Clostridium spp.*, *Herbaspirillum seropedicae*, *Flavobacterium spp.*, *Gluconobacter diazotrophicus*, *Micrococcus spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Rhizobium* y *Xanthomonas* ([Glick, 2012](#); [Tsavkelova et al., 2006](#)).

2.5.4. Mecanismos de biocontrol (antagonismo)

Las plantas han desarrollado un potente sistema inmunológico para resistir su posible colonización por patógenos microbianos y parásitos. Adicionalmente la RSI por las rizobacterias es un tipo de resistencia sistémicamente mejorada contra un amplio espectro de patógenos que se desencadena tras la colonización de las raíces por cepas seleccionadas de bacterias no patógenas ([De Vleeschauwer & Höfte, 2009](#)). Además, el uso de microorganismos para controlar las enfermedades en las plantas, es una forma de control biológico, es un enfoque respetuoso con el medio ambiente. Los microorganismos son un

enemigo natural del patógeno, debido a que producen metabolitos secundarios, lo hace sólo localmente, cerca de la superficie de la planta, es decir, el sitio donde deben actuar ([Lugtenberg & Kamilova, 2009](#)), estos metabolitos son biodegradables y no se necesitan en cantidades elevadas, a diferencia de los agroquímicos que son resistentes a la degradación por microorganismos y se aplican en grandes cantidades a los cultivos agrícolas para mantener la salud de las plantas ([Molina et al., 2015](#)). Algunas cepas de *Pseudomonas spp.* seleccionadas como antagonistas de *Fusarium* y *Colletotrichum orbiculare*, son capaces de inducir resistencia sistémica cuando se inocula en las plantas ([Lugtenberg & Kamilova, 2009](#)).

Por otra parte, el hierro (Fe) es un elemento esencial para el crecimiento de los organismos, las plantas lo obtienen del suelo y cuando la disposición de los elementos nutritivos es limitada los microorganismos de la rizósfera entran en competencia por adquirirlo, las RPCV producen sideróforos que son compuestos de bajo peso molecular para obtener competentemente este mineral del suelo. Además, los sideróforos son compuestos que desempeñan la función de solubilizar específicamente el hierro e incorporarlo al metabolismo celular, químicamente, se consideran compuestos ligantes a hierro que funcionan de forma general uniéndose covalentemente a hierro sin generar cambios en el estado de oxidación. Las sustancias inhibitoras producidas por las RPCV que más se han reportado son los sideróforos, la síntesis de estos y sus receptores es inducida por las limitaciones de Fe en el medio y regulada por proteínas dependientes de Fe, pH y trazas de C, N y P ([Camelo et al., 2011](#)). En este sentido, uno de los métodos de estimular indirectamente el crecimiento de la plantas es por la producción y secreción de sideróforos, compuestos que secuestran el Fe disponible en la rizósfera y como resultado previene que cualquier microorganismo patógeno proliferen ([Ortiz, Delgadillo, Rodríguez, & Calderón, 2016](#)).

2.6. Uso de bioinoculantes en el cultivo de tomate

Los géneros *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus* y *Streptomyces*, forman parte de la comunidad microbiana de la rizósfera del tomate, y *Azospirillum* es el género

dominantes ([Alfonso, Leyva, & Hernández, 2006](#)). En un estudio con bacterias rizosféricas, como alternativa a la fertilización sintética en el cultivo de tomate, se encontró que la inoculación de plantas de tomate con las cepas *Enterobacter* sp TVL-2 y *P. putida* PSO14 exhiben un gran potencial para estimular el crecimiento y producción de este cultivo ([Sánchez et al., 2012](#)). Además se han reportado incrementos en el contenido de licopeno y actividad antioxidante en frutos de tomate provenientes de plantas inoculadas con las cepas *P. putida*, *A. chroococcum* y *A. lipoferum* ([Ordookhain, Khavazi, Moezzi, & Rejali, 2010](#)). De acuerdo con algunos investigadores plantas de tomate inoculadas con RPCV han presentado incrementos significativo en longitud del tallo, peso fresco y seco de la parte aérea, biomasa radicular, número de flores, número de frutos y rendimientos en comparación a plantas sin inoculación ([Martínez et al., 2013](#); [Mayak et al., 2001](#); [Mena-Violante et al., 2009](#); [Sánchez et al., 2012](#)). De acuerdo con [Latha, Anand, Ragupathi, Prakasam, y Samiyappan \(2009\)](#) la inoculación de RPCV tienen una probable influencia de la promoción del crecimiento de las plantas y la resistencia sistémica inducida en la mejora de la resistencia a la enfermedad en plantas de tomate contra la enfermedad del tizón temprano (*Alternaria solani*).

2.7. Agricultura protegida

Se define como un sistema de producción realizado bajo diversas estructuras para proteger cultivos, al minimizar las restricciones y efectos que imponen los fenómenos climáticos ([Moreno, Aguilar, & Luévano, 2011](#)). En este sentido, con este sistema de producción se podría ofrecer: a) productos de alta calidad, b) mejores precios de venta, c) mayores niveles de inocuidad, d) proteger a los cultivos del viento, granizo y heladas, e) reducir la incidencia de plagas, enfermedades y malezas, f) controlar la temperatura y la cantidad de luz, g) hacer un control químico y biológico más eficiente, h) promover la precocidad de las especies vegetales, i) mayor eficiencia en el suministro de agua y fertilizantes, y j) incrementar los rendimientos en los cultivos ([Castañeda-Miranda, Ventura-Ramos, Peniche-Vera, & Herrera-Ruiz, 2007](#); [Juárez-López et al., 2012](#); [Juárez-Maldonado et al., 2015](#)). Además, la producción de cultivos hortícolas en condiciones protegidas y el uso de sistemas hidropónicos han permitido incrementos en rendimientos y calidad de frutos,

al propiciar un ambiente poco restrictivo facilitando el crecimiento y desarrollo de especies hortícolas ([Preciado *et al.*, 2010](#)).

En el año 2012 la Secretaría de Agricultura Ganadería, Pesca y Alimentación menciona que en México existían alrededor de 20 000 ha bajo agricultura protegida de las cuales aproximadamente 12 000 ha son de invernadero y las otras 8 000 ha corresponden a malla sombra y macro túnel. El 50% de la superficie con agricultura protegida se concentra en cuatro estados: Sinaloa (22%), Baja California (14%), Baja California Sur (12%) y Jalisco (10%). Del total de la superficie bajo condiciones protegidas el cultivo de tomate es sumamente importante ya que es el principal cultivo producido ocupando 70%, seguido por el pimiento (16%), y pepino (10%) ([SAGARPA, 2012](#)). Por otra parte, esta actividad también impacta en la economía local, por la generación de mano de obra requerida para su funcionamiento, siendo ocho empleos directos en promedio por cada unidad de área establecida ([Castellano & Borbón, 2009](#)).

2.8. Agricultura orgánica

En la actualidad, diversos factores de carácter ambiental, social, económico, cultural y político, han motivado el interés por el desarrollo de la agricultura orgánica, reconociéndose como una alternativa económicamente eficiente, socialmente justa y ecológicamente sostenible, con potencial para atenuar los impactos negativos atribuidos a la agricultura convencional ([Gómez, Schwentesius, Ortigoza, & Gómez, 2010](#)). En este sentido, la agricultura orgánica es el sistema de producción que proscribe el empleo total de plaguicidas y se base en la aplicación de abonos orgánicos y prácticas agrícolas que están diseñadas para restablecer y mantener un balance ecológico de la biodiversidad ([Pérez & Landeros, 2009](#)). Más que una tecnología de producción, la agricultura orgánica es una estrategia de desarrollo que se fundamenta no solamente en un mejor manejo del suelo y un fomento al uso de insumos locales, sino también en un mayor valor agregado y una cadena de comercialización más justa ([Espinoza-Villavicencio *et al.*, 2007](#)). La producción orgánica de alimentos es una alternativa para los consumidores que prefieren alimentos libres de agroquímicos y fertilizantes sintéticos y con alto valor nutricional ([de](#)

[la Cruz-Lázaro et al., 2009](#); [Márquez, Cano, Chew, Moreno, & Rodríguez, 2006](#); [Willer & Lernoud, 2016](#)).

De acuerdo al Instituto de Investigación de Agricultura Orgánica (“FiBL”, siglas en inglés) en el año 2014 habían 43.7 millones de hectáreas de tierra cultivadas orgánicamente y alrededor de 2.3 millones productores dedicados a la producción orgánica. Las regiones con mayores extensión de superficie bajo agricultura orgánica son Oceanía (17 342 416 ha, el 40% de la superficie agrícola orgánica en el mundo), Europa (11 625 001 ha, el 27%), América Latina (6 785 796 ha, 15%) seguido de Asia (3 567 474 ha, 3%). Entre los países con mayor superficie dedicada a la producción orgánica son Australia (17 150 000 ha), Argentina (3 061 965 ha), EE. UU. (2 178 471 ha), China (1 925 000 ha), España (1 710 475 ha), Italia (1 387 913 ha), Uruguay (1 307 421 ha), Francia (1 118 845 ha), Alemania (1 047 633 ha), Canadá (903 948 ha) ([Lernoud & Willer, 2016](#)).

En el ámbito mundial, México ocupa la posición 17 respecto a la superficie producida orgánicamente con 501 364 ha, el tercero con respecto al número de productores (169 703) ([Lernoud & Willer, 2016](#)) y es el país con mayor diversidad de cultivos producidos en sistemas orgánicos, con alrededor de 81 cultivos. Los principales estados productores orgánicos son: Chiapas (119 240 ha, el 32%), Oaxaca (64 495, 17%), Michoacán (48 717, 13%), Guerrero (18 307, 5%), Tabasco (17 305, 5%), Veracruz (14 841, 4%), y otros (59 732, 16%), de la superficie agrícola orgánica en México. De los 81 cultivos producidos orgánicamente, el café (*Coffea arabica* L.) es el más importantes con 50% de total de la superficie cultivada orgánicamente (185 93 ha), en segundo lugar se ubica las hortalizas, con el 10% de la superficie (35 414 ha) y en tercer lugar está el aguacate (*Persea americana* Mill.) con 8% de la superficie (31 572 ha), a estos cultivos le siguen las hierbas con 30 199 ha; el cacao (*Theobroma cacao* L.) con 14 796 ha; el mango (*Mangifera indica* L.) con 12 465 ha; la uva silvestre (*Vitis vinifera* L.) con 12 032 ha; el agave (*Agave americana* L.) con 11 566 ha; el coco (*Cocos nucifera* L.) con 9 031 ha y otros con 30 376 ha ([Gómez et al., 2010](#)).

2.9. Abonos orgánicos

El desarrollo de la agricultura se ha regido por una producción cada vez más intensa, contribuyendo al uso indiscriminado de fertilizantes y otros productos sintéticos y de prácticas culturales que han propiciado la erosión, la pérdida de fertilidad y la contaminación del suelo, el deterioro de la calidad de los alimentos y de la calidad del ambiente ([Hernández-Rodríguez, Ojeda-Barrios, López, & Arras, 2010](#)). Lo mencionado anteriormente ha inducido a la manipulación de los fertilizantes biológicos (abonos orgánicos y bioinoculantes a base de bacterias y hongos) ha crecido claramente en las últimas dos décadas. Tal utilización masiva surge por la amplia demanda de materia prima para los procesos productivos y abastecimiento de alimentos en el mundo. Los fertilizantes biológicos actúan con el fin de disminuir el suministro de fertilizantes sintéticos, brindan buenos rendimientos en las cosechas, favorecen el crecimiento de frutos inocuos, resistentes al ataque de plagas y ofrecen facilidades para su aplicación. Además los elementos nutritivos esenciales, que aportan los fertilizantes biológicos, poseen características fisicoquímicas y biológicas apropiadas para el suelo, lo cual implica incrementos de productividad en el sector agrícola ([Carvajal & Mera](#)). Por otro lado, un abono en general se considera aquel material que se aplica al suelo y estimula el crecimiento de las plantas de manera indirecta, a través de mejorar las propiedades físicas del suelo. Un material se considera como fertilizante cuando estimula el crecimiento de manera directa a través de aportar elementos nutritivos indispensables para las plantas. Los abonos provenientes de residuos orgánicos, como los estiércoles de diferentes especies de animales, los biosólidos, los residuos de cosecha y el compost pueden considerarse como abonos orgánicos (fertilizantes orgánicos) ([Figueroa & Cueto, 2003](#)).

El uso de abonos orgánicos ha cobrado mayor importancia por diversas razones; desde punto de vista económico ya que son de bajo costo y como fomento hacia una agricultura orgánica ([Fortis et al., 2013](#); [Raviv, 2015](#)). Adicionalmente, de acuerdo a [García et al. \(2014\)](#) los abonos orgánicos representan una alternativa como fuente de elementos nutritivos imprescindibles para la agricultura sustentable, ya que provee de fertilizantes naturales y reduce la contaminación ambiental, bajando con ello el costo de producción,

además los abonos orgánicos mantienen la dinámica, el desarrollo vegetal y la vida macro y microbiana del suelo, representan una alternativa para mejorar el nivel económico de los productores, mejorar el sistema alimentario y contrarrestar el problema de desnutrición en las comunidades rurales ([López, Poot, & Mijangos, 2012](#)).

En las últimas décadas, la aplicación de los abonos orgánicos ha cobrado importancia por diversas razones: a) desde el punto de vista ecológico, se ha incrementado la preocupación por fomentar las prácticas agrícolas que armonicen con el cuidado del ambiente, b) mejoran las condiciones de suelos que han sido deteriorados por el uso excesivo de agroquímicos y su sobre explotación ([Nieto-Garibay, Murillo-Amador, Troyo-Diéquez, Larrinaga-Mayoral, & García-Hernández, 2002](#)), c) mejoran la estructura del suelo; con ello, se aumentan la capacidad de retención de agua y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas ([López-Mtz., Díaz, Martínez, & Valdez, 2001](#)), d) facilitan la formación de agregados estables con lo que mejora la permeabilidad de éstos, aumenta la fuerza de cohesión a suelos arenosos y disminuye ésta en suelos arcillosos, e) estimula el desarrollo de plantas, f) mejora y regula la velocidad de infiltración del agua, disminuyendo la erosión producida por el escurrimiento superficial, g) eleva la capacidad tampón de los suelos, h) su acción quelante contribuye a disminuir los riesgos carenciales y favorece la disponibilidad de algunos microelementos (Fe, Cu y Zn) para la planta, i) el humus aporta elementos minerales en bajas cantidades, y es una importante fuente de C para los microorganismos del suelo ([Félix, Sañudo, Rojo, Martínez, & Odalde, 2008](#)), f) incrementa la presencia de nitratos lo que permitiría no aplicar nitrógeno al menos al inicio de un nuevo ciclo agrícola ([Fortis-Hernández et al., 2009](#)).

El abono orgánico que ha sido más estudiado en los últimos años es el compost, ya que se ha comprobado que mejora una gran cantidad de características del suelo como la fertilidad, la capacidad de almacenamiento de agua, la mineralización del N, el P y K, mantiene valores de pH óptimos para la agricultura, evita cambios extremos en la temperatura, fomenta la actividad microbiana y controla la erosión ([Nieto-Garibay et al., 2002](#); [Rodríguez et al., 2008](#)).

2.9.1. Compost

El compostaje es un proceso biotecnológico que transforma restos orgánicos de distintos materiales (paja, lodos cloacales, residuos domiciliarios, cortezas y estiércol, entre otros) en un producto relativamente estable, cuyo uso se ha incrementado en los últimos años como una alternativa efectiva para mejorar la productividad y la calidad de los suelos ([Defrieri, Jimenez, Effron, & Palma, 2005](#)). Este proceso consta de dos fases: en la primera fase, llamada fase de alta velocidad, las sustancias orgánicas fácilmente degradables son degradadas por microorganismos y los residuos alcanzan la estabilidad biológica, en la segunda fase, conocida como curado, el material orgánico restante se transforma en un producto final humificado. El material obtenido del compostaje es llamado compost el cual se ha definido como un producto estabilizado, maduro y humificado que puede utilizarse para la aplicación en suelos o como sustrato en la producción de cultivos vegetales ([Genevini, Adani, Veeken, & Scaglia, 2002](#)).

Los principales beneficios potenciales del uso del compost son: a) aumenta la biodiversidad del suelo, lo cual es esencial para mantener la salud del suelo; b) suministro de elementos nutritivos [N mineralizado (porcentaje de N aplicado), P mineralizado (porcentaje de P aplicado), K mineralizado (porcentaje de K aplicado)]; c) secuestro de carbono [C secuestrado del suelo (porcentaje de C aplicado)]; d) supresión de malezas, plagas y enfermedades; e) mayores rendimiento de los cultivos; f) disminución de la erosión del suelo; g) mayor contenido de humedad del suelo; h) mayor contenido de materia orgánica en el suelo; i) mayor calidad nutricional de los frutos ([Martínez-Blanco et al., 2013](#)); j) mantiene valores de pH óptimos para la agricultura; k) evita cambios extremos en la temperatura del suelo ([Nieto-Garibay et al., 2002](#)). De acuerdo a [Rodríguez et al. \(2008\)](#), el compost puede utilizarse como sustrato debido a su bajo costo, sustituyen al musgo y suprimen varias enfermedades presentes en el suelo.

**III. ARTÍCULO ENVIADO A LA REVISTA TERRA LATINOAMERICANA.
INOCULACIÓN DE RIZOBACTERIAS PROMOTORAS DEL
CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE TOMATE EN
INVERNADERO**

INOCULACIÓN DE RIZOBACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN EL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO

Inoculation of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Greenhouse Tomato Crops

Bernardo Espinosa-Palomeque¹, Pedro Cano-Ríos^{2*}, Alejandro Moreno-Reséndez^{3},**

Vicente de Paul Álvarez-Reyna⁴, Jorge Sáenz-Mata⁵, Homero Sánchez-Galván⁵,

Gabriela González-Rodríguez¹

¹Estudiante del Programa de Postgrado en Ciencias Agrarias, Departamentos de ²Horticultura, ³Suelos, ⁴Riego y Drenaje, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro - Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez km 1.5 y Carretera a Santa Fe S/N, Torreón, Coahuila, México.

*Integrante del Cuerpo Académico Sistemas Sustentables para la Producción Agropecuaria UAAAN-CA-14.

⁵Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez del Estado de Durango, Av. Universidad S/N, Fracc. Filadelfia, Gómez Palacio, Durango, México.

**Autor para correspondencia: alejamorsa@yahoo.com.mx y alejamorsa@hotmail.com

RESUMEN

La producción de los cultivos agrícolas, entre otros factores, es impactada por el clima, el suelo, el agua y los microorganismos rizosféricos. De estos últimos las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), han desempeñado funciones importantes en las plantas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la inoculación de tres RPCV utilizando sustratos a base de compost o arena de río, sobre el rendimiento y calidad de frutos de tomate (*Solanum lycopersicum*

L.) en invernadero. El diseño experimental utilizado fue bloques completamente al azar con cinco repeticiones, en arreglo factorial 2x4, donde los factores fueron: A) sustratos y B) RPCV. Las variables evaluadas fueron: diámetro polar y ecuatorial, espesor de pericarpio, contenido de sólidos solubles, firmeza, fenoles totales, capacidad antioxidante y rendimiento total. Los datos fueron analizados estadísticamente por análisis de varianza y las comparaciones de medias mediante la prueba de DMS 0.05%. Los frutos provenientes del tratamiento T1 presentaron los mayores valores respecto al diámetro polar y ecuatorial, contenido de sólidos solubles, firmeza, contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante, con valores de 6.54 cm, 5.50 cm, 5.94 °Brix, 12.54 N, 51.70 mg de AG 100 g⁻¹ FF y 66.68 µM Trolox g⁻¹ FF, respectivamente. La aplicación de RPCV y utilización del sustrato a base de compost podrían ser una alternativa de fertilización en la producción de tomate en invernadero, así como incrementar el rendimiento y calidad nutracéutica de los frutos sin la aplicación de fertilizantes inorgánicos.

Palabras claves: agricultura protegida, calidad nutracéutica, sustratos, RPCV.

SUMMARY

Production of agricultural crops is affected, among other factors, by weather, soil, water, and microorganisms in the rhizosphere. Of these last, plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) have performed important functions in plants. The objective of this study was to evaluate the effect of inoculating three PGPR, using compost or river sand based substrates, on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit yield and quality under greenhouse conditions. The experimental design used was completely randomized blocks with five replicates in a 2x4 factorial arrangement, where the factors were: A) substrates, and B) PGPR. The evaluated variables were: polar and equatorial diameter, pericarp thickness, content of soluble solids, firmness, total phenols, antioxidant capability, and total yield. The data were statistically analyzed through analysis of variance and

mean comparisons through the DMS test, 0.05%. The fruits from the T1 treatment had the highest values in polar and equatorial diameter, content of total soluble solids, firmness, total phenol content, and antioxidant capability: 6.54 cm, 5.50 cm, 5.94 °Brix, 12.54 N, 51.70 mg AG 100 g⁻¹ FF, and 66.68 µM Trolox g⁻¹ FF, respectively. The application of PGPR and the use of the compost based substrate could be a fertilization alternative for greenhouse tomato production, as well as increase yield and nutraceutical quality of the fruits without applying inorganic fertilizers.

Index words: nutraceutical quality, protected agriculture, PGPR, substrates.

INTRODUCCIÓN

El tomate es uno de los cultivos más importantes en el mundo. El fruto de esta hortaliza es parte constituyente de los principales componentes de la alimentación diaria de la población de muchos países, ya que es una fuente importante de minerales, vitaminas y compuestos antioxidante (Fraser *et al.*, 2009). En México 70% de la superficie total cultivada en agricultura protegida es dedicada al cultivo de tomate (Juárez-Maldonado *et al.*, 2015).

En la actualidad los productores están interesados en la búsqueda de nuevos sistemas de producción que incrementen los rendimientos y generen productos de excelente calidad (Santiago-López *et al.*, 2016). Debido a lo anterior han surgido insumos agrícolas a base microorganismos y otros materiales de origen orgánico, como las RPCV (Kloepper y Schroth, 1978) y sustratos a base de compost (Raviv, 2015), opciones que fortalecen el enfoque de la agricultura sustentable (Pretty, 2008).

Para incrementar los rendimientos del cultivo de tomate, tanto en condiciones de campo abierto como condiciones de agricultura protegida, es de vital importancia la obtención de plántulas sanas y vigorosas (Costales *et al.*, 2007), en este sentido se ha propuesto el uso de RPCV (Vessey, 2003), entre ellas se encuentran los géneros *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*,

Azospirillum, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterim*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia* y muchos otros (Rodríguez y Fraga, 1999; Spaepen *et al.*, 2009), las cuales son capaces de estimular el crecimiento de las plantas a través de diferentes mecanismos, por ejemplo, (i) fijación biológica de nitrógeno, (ii) solubilización de fosfatos, (iii) síntesis de fitohormonas, como las auxinas, principalmente el ácido indolacético (AIA) e (iv) inhibición del desarrollo de microorganismos fitopatógenos por la síntesis de antibióticos o sideróforos (Khan *et al.*, 2007; Lucy *et al.*, 2004; Saharan y Nehra, 2011; Vessey, 2003). Como complemento a lo anterior, Bashan y de-Bashan (2010), destacan que las RPCV actúan como elicitores naturales mejorando el crecimiento y rendimiento de los cultivos vegetales. Por lo tanto, el empleo de biofertilizantes a base RPCV, aplicados al suelo y/o a las plantas, podría ser una alternativa biotecnológica para la producción de cultivos agrícola, reduciendo la aplicación de fertilizantes sintéticos y agroquímicos que deterioran el ambiente (Yang *et al.*, 2009). Se ha demostrado en varios estudios que la inoculación con RPCV ha logrado mejorar el crecimiento y desarrollo del cultivo de tomate (Noh *et al.*, 2014; Rojas-Solís *et al.*, 2016; Santillana *et al.*, 2005).

Por otra parte, el compost como abono orgánico contiene considerables cantidades de elementos nutritivos que puede complementar la nutrición de las plantas (Raviv *et al.*, 2005), su aplicación mejora el crecimiento, desarrollo y por consecuencia una mayor productividad de los cultivos, lo cual se debe a las propiedades físicas y químicas del abono (de la Cruz-Lázaro *et al.*, 2009); además aporta N, P, K, Ca, Mg y hormonas promotoras del crecimiento (Olivares-Campos *et al.*, 2012). Según Viti *et al.* (2010) una de las características del compost es estimular el desarrollo de las RPCV. Debido a lo anterior, el compost puede usarse como sustrato para la producción de cultivos hortícolas en invernadero (Rodríguez *et al.*, 2008). El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la inoculación de tres RPCV utilizando sustratos a base de compost o arena de río sobre el rendimiento y calidad de frutos de tomate *cv.* Afrodita, bajo condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó durante el ciclo agrícola primavera-verano 2015, en la Comarca Lagunera (101° 40' y 104° 45' O y 25° 05' y 26° 54' N), en un invernadero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, Torreón, Coahuila, México. El invernadero cuenta con un área de 200 m², es de forma semicircular, con cubierta de acrílico reforzado, piso de grava y sistema de enfriamiento automático mediante pared húmeda y extractores.

Las RPCV utilizadas fueron: *Bacillus spp.*, *Aeromonas spp.*, y *Pseudomonas lini*, pertenecientes a la colección microbiana del Laboratorio de Ecología Microbiana de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez del Estado de Durango, Gómez Palacio, Durango, México. Para la preparación de los inóculos bacterianos, las tres cepas fueron inoculadas individualmente en medio líquido Luria Bertani y colocadas en una incubadora durante 24 h a 30 °C, con agitación de 200 rpm (Precisión Scientific 815[®]) las concentraciones bacterianas se ajustaron a 1 x 10⁸ UFC mL⁻¹ con buffer fosfato salino al 0.5X.

Se utilizó el tomate *cv.* Afrodita, el cual se sembró en charolas de poliestireno de 200 cavidades, utilizando Peat moss (Premier, México[®]) como sustrato. Las bandejas fueron colocadas en el interior del invernadero, éstas se cubrieron con plástico negro durante 72 h, aplicando cada 24 h riego con agua de la llave (pH 7.38, RAS 3.2 y CE 1.18 dS m⁻¹, clasificada como agua de baja salinidad y bajo contenido de sodio (Ayers y Westcot, 1994). La inoculación de las RPCV se realizó a los 12 días después de la emergencia de las plántulas, a través del método de inmersión, durante un periodo de 5 minutos, en una suspensión bacteriana de 4 L, a una concentración de 1 x 10⁸ UFC mL⁻¹, los tratamientos testigos solo se trataron con agua destilada (Cuadro 1).

El trasplante se efectuó a los 46 días después de la siembra, cuando las plántulas presentaron, en promedio, 15 cm de altura, colocando una planta en el centro de bolsas de polietileno negro de 18 L de capacidad, las cuales fueron utilizadas como macetas. Las macetas se llenaron con sustratos a base de compost, arena de río y perlita (Cuadro 1). Las bolsas fueron colocadas en doble hilera,

con una separación de 1.60 m entre hileras, con arreglo “tresbolillo”, y una separación de 0.30 m de centro a centro de las macetas, para obtener una densidad de 4.2 plantas m⁻². Las características nutrimentales de los sustratos se presentan en el Cuadro 2. La arena de río utilizada se desinfectó con una solución al 5% de hipoclorito de sodio y se dejó secar al ambiente por tres días. El sustrato a base de compost, arena de río y perlita, se le aplicó lavado para lixiviar el exceso de sales de acuerdo a la metodología de Cano *et al.* (2011).

Cuadro 1. Tratamientos establecidos con diferentes composiciones de sustrato y RPCV inoculadas en tomate bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento	RPCV inoculadas	Composición del sustrato v/v/v [†]
T1	<i>Bacillus spp.</i>	50 compost + 40 arena + 10 perlita
T2	<i>Aeromonas spp.</i>	50 compost + 40 arena + 10 perlita
T3	<i>Pseudomonas lini</i>	50 compost + 40 arena + 10 perlita
T4	Testigo 1	50 compost + 40 arena + 10 perlita
T5	<i>Bacillus spp.</i>	100 arena
T6	<i>Aeromonas spp.</i>	100 arena
T7	<i>Pseudomonas lini</i>	100 arena
T8	Testigo 2	100 arena

[†] Volumen: volumen: volumen

Cuadro 2. Características químicas del compost y arena empleados como medio de crecimiento de tomate bajo condiciones de invernadero.

Sustrato	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	pH	CE [†]
	----- mg kg ⁻¹ -----										dS m ⁻¹
Compost	120.1	42.0	610.6	90.0	85.0	3.0	7.5	5.1	4.1	8.56	6.7
Arena de río	1.15	11.2	100.2	45.0	4.3	0.17	5.75	0.7	4.43	7.5	0.65

[†] Conductividad eléctrica

Después del trasplante los riegos se realizaron según las etapas de desarrollo del cultivo. A los cuatro días después de trasplante (ddt) se aplicaron en promedio 0.5 L de agua por maceta día⁻¹, el volumen se incrementó a 1 y 2 L día⁻¹, a los 30 y 71 ddt, respectivamente. La solución nutritiva empleada en los tratamientos testigos (T4 y T8) durante todo el ciclo del cultivo fue la recomendada por Castellano y Ojodeagua (2009). La demanda nutricional del cultivo para los tratamientos inoculados con las RPCV fue cubierta utilizando Maxifrut y Maxiquel, ambos productos de la compañía BioCampo[®], para aplicar macro y micro elementos. Estos productos han sido aprobados por las normas de producción orgánica certificada INFOAM (2003). De ambos productos se prepararon soluciones madre a razón de 10 y 50 g 20 L⁻¹ de agua de riego, y para la fertilización de las macetas se realizaron diluciones de 1.0 y 0.5 L en 1000 L de agua, respectivamente. La dilución del Maxifrut se aplicó a diario y la del Maxiquel cada semana, a través de los volúmenes de riego ya mencionados. El manejo y cuidado del cultivo se realizó de acuerdo con lo establecido por Muñoz (2009).

La cosecha de frutos se efectuó del primer al octavo racimo, cuando éstos presentaron un color rosa de 30 y 60% de acuerdo a la clasificación de color de la USDA (1991). El ciclo de cultivo duró 120 ddt, la temperatura mínima y máxima al interior del invernadero fluctuó entre 17.4 y 32.6 °C respectivamente, mientras que la humedad relativa mínima y máxima osciló entre 30 y 70%.

La calidad del tomate se determinó en 18 frutos por planta, correspondientes a cada repetición de los tratamientos, registrándose los diámetros polar y ecuatorial, y el espesor de pericarpio con un vernier (Truper, México[®]), el contenido de sólidos solubles con un refractómetro (Master-T ATAGO, Tokio, Japón[®]), la firmeza con un penetrómetro (FHT200, Extech Instruments, USA[®]), con émbolo de 3 mm, y el peso de fruto con una balanza (Ohaus 3729, México[®]). El contenido de fenoles totales se determinó de acuerdo al método descrito por Waterman y Mole (1994), realizando la extracción con metanol y la cuantificación mediante la reacción con el reactivo Folin Ciocalteu (Sigma-Aldrich, St. Louis MO, USA[®]); los datos se reportaron como miligramos de

ácido gálico por 100 g en fruto fresco (FF) (mg de AG 100 g⁻¹ FF). La capacidad antioxidante se evaluó de acuerdo al método desarrollado por Williams *et al.* (1995) y los resultados se expresaron en actividad equivalente a Trolox (μM Trolox g⁻¹ de FF). El rendimiento total se estimó con el peso del fruto, considerando el número total de frutos obtenidos en la cosecha.

El diseño experimental utilizado fue bloques completamente al azar con arreglo factorial (2x4), con ocho tratamientos y cinco repeticiones, donde el factor A correspondió a los sustratos, mientras que el factor B fueron las RPCV. Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza, en los casos en los que se encontró diferencia estadística significativa, se realizaron comparación de medias aplicando la prueba Diferencia Mínima Significativa (DMS) al 0.05% (SAS, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Derivado del análisis de varianza para los diámetros ecuatorial y polar, así como para el contenido de sólidos solubles, se determinaron diferencias altamente significativa ($P \leq 0.01$), del mismo modo, se encontraron significancias estadísticas en espesor de pericarpio y firmeza de fruto ($P \leq 0.05$) por efecto de la interacción sustratos x RPCV. En el contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante se registraron diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en la interacción sustratos x RPCV. En el peso de fruto se encontró diferencia significativa ($P \leq 0.05$) por efecto de las RPCV, sin embargo no hubo diferencias significativas en sustratos, ni en la interacción sustratos x RPCV (Cuadro 3).

Para los diámetros polar y ecuatorial los mayores valores se registraron en el tratamiento T1, con medias de 6.54 y 5.50 cm respectivamente (Cuadro 4), los cuales corresponden a frutos de calidad comercial aceptable (Mena-Violante y Olalde-Portugal, 2007). Los valores de los diámetros polar y ecuatorial obtenidos en el tratamiento T1 superaron en 15.14 y 4.76%, respectivamente, a los valores registrados en el tratamiento T8. Por lo anterior, la inoculación con RPCV y el compost

generaron efectos positivos en la calidad y tamaño de los frutos, efectos que coinciden con lo establecido por Bhattacharjee *et al.* (2015). El diámetro polar registrado resultó ser similar al valor promedio reportando por Mena-Violante *et al.* (2009) en frutos de tomate *cv.* Rio Fuego, provenientes de plantas inoculadas con *B. subtilis* BEB-13bs. Por su parte, el diámetro ecuatorial fue superior en 11 y 17% a los valores promedios reportados por Mena-Violante *et al.* (2009) en condiciones de manejo ya descrita y Mena-Violante y Olalde-Portugal (2007) al evaluar la calidad y el rendimiento de tomate *cv.* Rio Fuego inoculado con *B. subtilis* BEB-13bs en condiciones de invernadero, respectivamente.

Cuadro 3. Cuadrados medios y significancia estadística para las variables de calidad de fruto y rendimiento total en el cultivo de tomate desarrollado en invernadero.

Variable	Sustratos	RPCV	Sustratos x RPCV	Error	CV. (%) [†]
Peso de fruto	0.441 NS	303.023 **	43.146 NS	28.046	7.5
Diámetro polar	0.001 NS	0.963 **	0.362 **	0.264	2.7
Diámetro ecuatorial	0.020 NS	0.096 **	0.203 **	0.009	1.8
Espesor de pericarpio	0.011 NS	0.019 **	0.012 *	0.004	9.2
Solidos solubles	0.600 **	0.3929 **	0.154 **	0.027	3.0
Firmeza	3.008 NS	2.312 NS	4.065 *	1.137	9.5
Fenoles totales	1017.042 **	208.538 **	30.308 *	9.837	7.9
Capacidad antioxidante	2591.134 **	100.962 *	74.393 *	24.898	9.4
Rendimiento	737.970 *	656.866 **	273.420 NS	118.30	14.3

[†] Coeficiente de variación; NS = no significativo; * = significativo ($P \leq 0.05$); ** = altamente significativo ($P \leq 0.01$).

En el caso de espesor de pericarpio el mayor valor se presentó en el tratamiento T2, con una media de 0.74 cm, superando al menos en 2.78% a los valores registrados en el resto de los tratamientos (Cuadro 4). Este valor fue superior al promedio de espesor de pericarpio, 0.39 cm, reportado por

Pal *et al.* (2015), en tomate *cv.* Azad T-6, al evaluar la fertilización sintética más la aplicación de la cepa *Azotobacter*.

En relación al contenido de sólidos solubles el mayor valor se registró en el tratamiento T1, con un media de 5.94 °Brix, y fue superior en 4.38, 9.76, 11.45, 8.75, 10.77, 9.43 y 13.13% a los contenidos de sólidos solubles registrados en los tratamientos T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8, respectivamente (Cuadro 4). El mayor contenido de sólidos solubles del tratamiento T1, 5.94 °Brix, coincide con lo establecido por Kumar *et al.* (2015), quienes indican que los sustratos orgánicos más la aplicación de RPCV generan frutos de mayor contenido de sólidos solubles. Al respecto Cuartero y Fernández (1999), destacan que el contenido de sólidos solubles se incrementa debido a la mayor concentración de sales presente en los sustratos orgánicos. Por otra parte, el contenido de sólidos solubles registrado en el tratamiento T1 superó en 32% al contenido de sólidos solubles reportado por de la Cruz-Lázaro *et al.* (2009) en frutos de tomate *cv.* SUN 7705, cuyas plantas fueron fertilizadas con solución nutritiva inorgánica, bajo condiciones de invernadero. Con lo cual se fortalece la hipótesis de que el desarrollo de los cultivos será favorable si se aplican tanto los fertilizantes a base de RPCV mezclados con abonos orgánicos, como el compost.

La firmeza del fruto se incrementó 8.5 y 3.7% en los tratamientos T1 y T2, respectivamente, en comparación a las plantas desarrolladas en el tratamiento T8 (testigo 2) (Cuadro 4). Este comportamiento coincide con Mena-Violante *et al.* (2009) quienes destacaron, que la firmeza es significativamente mayor en frutos de tomate proveniente de plantas inoculadas con RPCV. Por otro lado, el valor de firmeza, 12.54 N, obtenido en los frutos del tratamiento T1, fue superior en 19.08% a la firmeza reportada por Mena-Violante y Olalde-Portugal (2007), en frutos de tomate *cv.* Rio Fuego, fertilizadas con solución Long Ashton e inoculadas con la cepa *B. subtilis* BEB-13bs, en condiciones de invernadero. De acuerdo con Cooper *et al.* (1998), los frutos más firmes podrían ser más resistentes al ataque de microorganismos causantes del decaimiento, por lo tanto,

las plantas inoculadas con RPCV no solo incrementaron la firmeza, sino que además podrían disminuir la incidencia del deterioro del fruto.

Cuadro 4. Resultados del análisis de varianza de la interacción sustratos x RPCV, sobre la calidad de fruto del cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero.

Tratamiento	PF	DP	DE	EP	SS	F
	g	----- cm -----			°Brix	Newton
T1	77.90	6.54 a [†]	5.50 a	0.70 ab	5.94 a	12.54 a
T2	71.80	5.93 c	5.12 d	0.74 a	5.68 b	11.92 a
T3	65.28	6.06 c	5.15 cd	0.72 ab	5.36 cd	11.47 ab
T4	63.30	5.46 e	4.95 e	0.58 d	5.26 cd	10.23 b
T5	77.66	6.06 c	5.16 cd	0.62 cd	5.42 c	11.21 ab
T6	69.84	6.31 b	5.32 b	0.69 abc	5.30 cd	10.14 b
T7	71.46	5.94 c	5.16 cd	0.64 bcd	5.38 c	11.30 ab
T8	66.16	5.68 d	5.25 bc	0.65 bcd	5.16 d	11.30 ab
Media	70.43	6.00	5.20	0.67	5.44	11.26
DMS	6.86	0.21	0.12	0.07	0.21	1.38

[†] Promedios con letras distintas en cada columna son estadísticamente diferentes (DMS, $P \leq 0.05$). NS = no significativo; * = significativo; ** = altamente significativo. PF= peso de frutos; DP = diámetro polar; DE = diámetro ecuatorial; EP = espesor de pericarpio; SS = sólidos solubles; F = firmeza del fruto.

Los mayores contenidos de fenoles totales se obtuvieron en el tratamiento T1, con una media de 51.70 mg de AG 100⁻¹ FF, superando en 26.05 y 44.29% al contenido determinado en los tratamientos testigos T4 y T8, respectivamente (Cuadro 5). Comportamiento que coincide con lo establecido por Dashti *et al.* (2014), quienes resaltaron que el contenido de fenoles totales se incrementa en frutos de tomate, provenientes de plantas inoculadas con RPCV en comparación a plantas sin inocular. Los compuestos fenólicos se acumulan como un mecanismo de defensa contra

un estrés biótico y/o abiótico (Rivero *et al.*, 2001; Toor *et al.*, 2006). Esta situación pudo contribuir a que los frutos del tratamiento T1 hayan destacado en la mayoría de las variables evaluadas en el presente experimento.

Adicionalmente, es posible que las diferencias determinadas para fenoles totales pudieran ser atribuidas a las temperaturas máximas registradas en el interior del invernadero (Wahid *et al.*, 2007). Los valores obtenidos superaron ampliamente al valor de 26.22 mg AG 100 g⁻¹ FF reportados por Kim *et al.* (2013) en frutos de tomate. Por otro lado, el valor 51.70 mg de AG 100 g⁻¹ FF registrado en el tratamiento T1, superó en 207% al contenido de fenoles totales de 16.8 mg AG 100 g⁻¹ FF en frutos de tomate *cv.* Rio Grande, cuyas plantas se desarrollaron con aplicación de fertilizantes sintéticos (Ilahy *et al.*, 2011). En general, los resultados obtenidos coinciden con reportes de otros investigadores que han reportado un mayor contenido de fenoles totales en frutos de tomate, al aplicar abonos orgánicos *vs* la aplicación de fertilizantes sintéticos (Bhattacharjee *et al.*, 2015; Toor *et al.*, 2006).

En relación a la capacidad antioxidante destacó el valor 66.68 µM Trolox g⁻¹ FF registrado en el tratamiento T1, superando en al menos 3.30% al resto de los tratamientos (Cuadro 5). Estos resultados coinciden con lo establecido por Ordookhain *et al.* (2010) quienes indican, que el uso de RPCV puede aumentar el contenido de licopeno y la actividad antioxidante en frutos de tomate. Por otro lado, el contenido de sales presentes en el sustrato orgánico podría causar estrés nutricional en las plantas de tomate, promoviendo el incremento de la producción de compuestos fenólicos, lo que resulta en un aumento en la actividad antioxidante en los frutos (Preciado-Rangel *et al.*, 2015; Wang y Lin, 2003). Por lo tanto, es factible recomendar la aplicación de la cepa *Bacillus* sp., más la utilización del sustrato a base de compost, como una alternativa de fertilización, para la producción de tomate en invernadero con calidad comercial aceptable y una mejor capacidad antioxidante.

Cuadro 5. Resultados del análisis de varianza de la interacción sustratos x RPCV, sobre el contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante de frutos de tomate.

Tratamiento	Fenoles totales	Capacidad antioxidante
	mg de AG 100 g ⁻¹ FF	μM Trolox g ⁻¹ FF
T1	51.70 a [†]	66.68 a
T2	45.38 b	58.66 bc
T3	43.05 b	64.55 ab
T4	38.00 c	55.62 c
T5	36.47 c	48.58 d
T6	37.64 c	42.51 d
T7	34.87 c	43.03 d
T8	28.80 d	47.00 d
Media	39.49	53.33
DMS	1.38	4.06

[†] Letras distintas dentro de cada columna indican diferencia estadísticas significativas (DMS $P \leq 0.05$).

En cuanto al peso del fruto del tomate, para el cual solo se determinó diferencia significativa ($P \leq 0.05$) por efecto de las RPCV, las plantas inoculadas con la cepa *Bacillus spp.*, presentaron el mayor peso, con una media de 77.78 g, superando en 8.95, 12.10 y 16.78% al peso de fruto obtenido en las plantas inoculadas con las cepa *Aeromonas spp.*, *Pseudomonas lini* y al testigo sin inocular, respectivamente (Cuadro 6). Los resultados sugieren que los biofertilizantes basados en RPCV pueden aumentar la capacidad de absorción de los elementos nutritivos por las plantas, y de este modo evidenciar los efectos positivos sobre los cultivos (Adesemoye *et al.*, 2009). En un estudio sobre el rendimiento y peso del fruto de tomate Mayak *et al.* (2004), determinaron resultados significativamente mayor en plantas de tomate inoculadas con *A. piechaudii*, respecto a plantas testigo sin inocular. Resultados semejantes observaron Dursun *et al.* (2010), con la

aplicación de cepas *A. baumannii* y *B. megaterium* en el cultivo de tomate y pepino (*Cucumis sativus* L.).

Cuadro 6. Valores promedio y diferencia estadística en peso de fruto y rendimiento total de del cultivo de tomate inoculado con RPCV, bajo condiciones de invernadero.

RPCV	Peso de fruto	Rendimiento	Aumento del rendimiento
	g	t ha ⁻¹	%
<i>Bacillus spp.</i>	77.78 a [†]	86.693 a	25.06
<i>Aeromonas spp.</i>	70.82 b	78.051 ab	12.59
<i>Pseudomonas lini</i>	68.37 bc	70.176 b	1.23
Testigo	64.73 c	69.321 b	-
Media	70.43	76.06	
DMS	4.85	9.96	

[†] Letras distintas dentro de cada columna indican diferencia estadísticas significativas (DMS $P \leq 0.05$).

Los resultados obtenidos en el presente estudios muestran que el rendimiento total fue influenciado positivamente por las RPCV, sin embargo no hubo diferencias significativas para esta variable en los sustratos, ni para la interacción sustratos x RPCV (Cuadro 3). De acuerdo con Vessey (2003) el incremento en el rendimiento de los cultivos vegetales por la aplicación de RPCV puede ser debido a la producción de metabolitos secundarios, tales como fitohormonas (auxinas, citoquininas y giberelinas), riboflavina, y vitaminas (tiamina, niacina y ácido pantoténico). Existen relaciones positivas entre la inoculación de raíces de tomate con RPCV, así mismo se logra mejorar el rendimiento de fruto (Mena-Violante y Olalde-Portugal, 2007). El rendimiento promedio, al aplicar las RPCV, fue de 76.06 t ha⁻¹, es decir, se incrementó 34.82% con respecto a rendimiento promedio obtenido, por los productores mexicanos en condiciones de riego y temporal (SIAP, 2014). Las plantas inoculadas con la cepa *Bacillus spp.*, presentaron el mayor

rendimiento, con una media de 86.69 t ha⁻¹, superando en 25.06% al rendimiento obtenido en el testigo sin inocular (Cuadro 6). Resultados similares han sido reportados por Xue *et al.* (2009) quienes evidenciaron que los géneros *Acinetobacter* y *Enterobacter* mejoraron significativamente el rendimiento del cultivo de tomate. Los resultados obtenidos, de acuerdo con Sánchez *et al.* (2012) sugieren que la inoculación de las plantas de tomate con RPCV exhibe un gran potencial para estimular el crecimiento y producción en este cultivo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, donde se destaca el efecto de la inoculación de RPCV y la utilización del sustrato a base de compost, en seis de las nueve variables evaluadas, sugieren que estos materiales podrían ser una alternativa de fertilización en la producción de tomate en invernadero, puesto que se incrementó el rendimiento y la calidad nutracéutica de los frutos de tomate sin aplicación de fertilizantes inorgánicos.

AGRADECIMIENTO

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar estudios de maestría No. 001924, CVU No. 661904.

LITERATURA CITADA

- Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., and Kloepper, J. W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microb. Ecol.*, 58(4): 921-929. doi:10.1007/s00248-009-9531-y. (disponible en línea desde mayo 23 de 2009).
- Ayers, R. S., and Westcot, W. D. (1994). Water quality for agriculture. pp. 174. *In*: FAO (ed.). Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1. Rome.

- Bashan, Y., and de-Bashan, L. E. (2010). How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth - A critical assessment. *Advances in Agronomy*, 108: 77-136. doi:10.1016/s0065-2113(10)08002-8. (disponible en línea desde septiembre 3 de 2010).
- Bhattacharjee, P., Chakraborty, B., and Chakraborty, U. (2015). Field evaluation of vermicompost and selective bioinoculants for the improvement of health status of tomato plants. *Journal of Biology and Earth Sciences*, 5(1): 25-33.
- Cano, R. P., Figueroa, V. U., Cruz, M. J. M., Araiza, E. I. A., y Moreno, R. A. (2011). Determinación del requerimiento de lavado y fitotoxicidad en composta y sustratos para la producción en invernadero. pp. 320-334. *En: M. Fortis, E. Salazar, J. Dimas & P. Preciado (eds.). Agricultura Orgánica. Cuarta parte. Universidad Juárez del Estado de Durango. México.*
- Castellano, Z. J., y Ojodeagua, J. L. (2009). Formulación de la solución nutritiva. pp. 131-156. *En: J. Z. Castellano (ed.). Manual de producción de tomate en invernadero. Celaya, Gto, México. Intagri, S. C.*
- Cooper, W., Bouzayen, M., Hamilton, A., Barry, C., Rossall, S., and Grierson, D. (1998). Use of transgenic plants to study the role of ethylene and polygalacturonase during infection of tomato fruit by *Colletotrichum gloeosporioides*. *Plant Pathology*, 47: 308-316.
- Costales, D., Lisbel, M., y Miriam, N. (2007). Efecto del tratamiento de semillas con una mezcla oligogalacturónidos sobre el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Cultivos Tropicales*, 28(1): 85-91.
- Cuartero, J., and Fernández, M. R. (1999). Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae*, 78: 83-125.
- Dashti, H. N., Montasser, S. M., Ali, A. N. Y., and Cherian, M. V. (2014). Influence of plant growth promoting rhizobacteria on fruit yield, pomological characteristics and chemical contents in cucumber mosaic virus-infected tomato plants. *Kuwait J. Sci.*, 41(2): 205-220.
- de la Cruz-Lázaro, E., Estrada-Botello, M. A., Robledo-Torres, V., Osorio-Osorio, R., Márquez-Hernández, C., y Sánchez-Hernández, R. (2009). Producción de tomate en invernadero con composta y vermicomposta como sustrato. *Universidad y Ciencia*, 25: 59-67.
- Dursun, A., Ekinci, M., and Donmez, M. F. (2010). Effects of foliar application of plant growth promoting bacterium on chemical contents, yield and growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Pak. J. Bot.*, 42(5): 3349-3356.
- Fraser, P. D., Enfissi, E. M., and Bramley, P. M. (2009). Genetic engineering of carotenoid formation in tomato fruit and the potential application of systems and synthetic biology approaches. *Arch. Biochem. and Biophys.*, 483(2): 196-204. doi:10.1016/j.abb.2008.10.009. (disponible en línea desde octubre 12 de 2008).

- Ilahy, R., Hdider, C., Lenucci, M. S., Tlili, I., and Dalessandro, G. (2011). Antioxidant activity and bioactive compound changes during fruit ripening of high-lycopene tomato cultivars. *J. of Food Composition and Analysis*, 24(4-5): 588-595. doi:10.1016/j.jfca.2010.11.003. (disponible en línea desde diciembre 21 de 2010).
- INFOAM (2003). International Federation of Organic Agriculture Movements. Norma para la producción y procesado orgánico (pp. 158). Alemania.
- Juárez-Maldonado, A., de Alba, R. K., Zermeño, G. A., Ramírez, H., y Benavides, M. A. (2015). Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrarias*, 6(5): 943-954.
- Khan, M. S., Zaidi, A., and Wani, P. A. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 27(1): 29-43. doi:10.1051/agro:2006011.
- Kim, I. S., Jin, S. K., Yang, M. R., Chu, G. M., Park, J. H., Rashid, R. H., Kim, J. Y., and Kang, S. N. (2013). Efficacy of tomato powder as antioxidant in cooked pork patties. *Asian Australas. J. Anim. Sci.*, 26(9): 1339-1346. doi:10.5713/ajas.2013.13079. (disponible en línea desde septiembre 1 de 2013).
- Kloepper, J. W., and Schroth, M. N. (1978). Plant growth promoting rhizobacteria on radishes. pp. 879-882. *In: Gilbert-Clorey (ed.). Proceeding of the 4th International Conference on Plant Pathogenic Bacteria (Vol. 2).* France.
- Kumar, N., Singh, H. K., and Mishra, P. K. (2015). Impact of organic manures and biofertilizers on growth and quality parameters of *Strawberry* cv. Chandler. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(15): 1-6. doi:10.17485/ijst/2015/v8i15/51107. (disponible en línea desde julio 2015).
- Lucy, M., Reed, E., and Glick, R. B. (2004). Application of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 86: 1-25.
- Mayak, S., Tirosh, T., and Glick, B. R. (2004). Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. *Plant Science*, 166(2): 525-530. doi:10.1016/j.plantsci.2003.10.025. (disponible en línea desde noviembre 27 de 2003).
- Mena-Violante, H. G., Cruz-Hernández, A., Paredes-López, O., Gómez-Lim, M. Á., y Olalde-Portugal, V. (2009). Cambios relacionados con textura de frutos y mejoramiento de la vida de anaquel por la inoculación de raíces de tomate con *Bacillus subtilis* BEB-13BS. *Agrociencia*, 43: 559-567.
- Mena-Violante, H. G., and Olalde-Portugal, V. (2007). Alteration of tomato fruit quality by root inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): *Bacillus subtilis* BEB-13bs. *Scientia Horticulturae*, 113(1): 103-106. doi:10.1016/j.scienta.2007.01.031. (disponible en línea desde marzo 13 de 2007).
- Muñoz, R. J. d. J. (2009). Manejo del cultivo de tomate en invernadero. pp. 63-108. *En: J. Z. Castellano (ed.). Manual de producción de tomate en invernadero Intagri S. C.: Celaya, Gto. México.*

- Noh, M. J., Yam, C. C., Borges, G. L., Zúñiga, A. J. J., y Godoy, H. G. (2014). Aislados bacterianos con potencial biofertilizante para plántulas de tomate. *Terra Latinoamericana*, 32: 273-281.
- Olivares-Campos, M. A., Hernández-Rodríguez, A., Vences-Contreras, C., Jáquez-Balderrama, J. L., y Ojeda-Barrios, D. (2012). Lombricomposta y composta de estiércol de ganado vacuno lechero como fertilizantes y mejoradores de suelo. *Universidad y Ciencia*, 28(1): 27-37.
- Ordookhain, K., Khavazi, K., Moezzi, A., and Rejali, F. (2010). Influence of PGPR and AMF on antioxidant activity, lycopene and potassium contents in tomato. *African Journal of Agricultural Research*, 5(10): 1108-1115. doi:10.5897/ajar09.183. (disponible en línea desde mayo 18 de 2010).
- Pal, A., Maji, S., Govid, Kumawat, R., Kumar, S., and Meena, D. C. (2015). Efficacy of various sources of nutrients on growth, flowering, yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum*) cv. Azad T-6. *The Bioscan An International Quaterly Journal of Life Sciences*, 10(1): 473-477.
- Preciado-Rangel, P., García-Villela, K. M., Fortis-Hernández, M., Trejo Valencia, R., Rueda Puente, E. O., and Esparza-Rivera, J. R. (2015). Nutraceutical quality of cantaloupe melon fruits produced under fertilization with organic nutrient solutions. *Ciencia e Investigación Agraria*, 42(3): 475-481. doi:10.4067/s0718-16202015000300015. (disponible en línea desde diciembre 2015).
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 363(1491): 447-465. doi:10.1098/rstb.2007.2163. (disponible en línea desde julio 25 de 2007).
- Raviv, M. (2015). Production of high-quality composts for horticultural purposes: A mini-review. *HortTechnology*, 15(1): 52-57.
- Raviv, M., Oka, Y., Katan, J., Hadar, Y., Yogeve, A., Medina, S., Krasnovsky, A., and Ziadna, H. (2005). High-nitrogen compost as a medium for organic container-grown crops. *Bioresour. Technol.*, 96(4): 419-427. doi:10.1016/j.biortech.2004.06.001. (disponible en línea desde agosto 7 de 2004).
- Rivero, M. R., Ruiz, M. J., García, C. P., López-Lefebvre, R. L., Sánchez, E., and Romero, L. (2001). Resistance to cold and heat stress: accumulation of phenolic compounds in tomato and watermelon plants. *Plant Science*, 160: 315-321.
- Rodríguez, D. N., Cano, R. P., Figueroa, V. U., Palomo, G. A., Favela, C. E., Álvarez, R. V. d. P., Márquez, H. C., y Moreno, R. A. (2008). Producción de tomate en invernadero con humus de lombriz como sustrato. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(3): 265-272.
- Rodríguez, H., and Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17: 319-339.

- Rojas-Solís, D., Hernández-Pacheco, C. E., and Santoyo, G. (2016). Evaluation of *Bacillus* and *Pseudomonas* to colonize the rhizosphere and their effect on growth promotion in tomato (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 22(1): 45-57. doi:10.5154/r.rchsh.2015.06.009. (disponible en línea desde abril 27 de 2016).
- SAGARPA, (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) (2014). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de Producción Agrícola. Producción Agrícola de Tomate Rojo (Jitomate). <http://www.siap.gob.mx/> (Consulta: abril 04, 2016).
- Saharan, B. S., and Nehra, V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: A critical review. *Life Sciences and Medicine Research*, 21: 1-30.
- Sánchez, L. D. B., Gómez, V. R. M., Garrido, R. M. F., y Bonilla, B. R. R. (2012). Inoculación con bacterias de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(7): 1401-1415.
- Santiago-López, G., Preciado-Rangel, P., Sánchez-Chavez, E., Esparza-Rivera, J., Fortis-Hernández, M., y Moreno-Reséndez, A. (2016). Organic nutrient solutions in production and antioxidant capacity of cucumber fruits. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28(7): 518-521. doi:10.9755/ejfa.2016-01-083. (disponible en línea desde marzo 29 de 2016).
- Santillana, N., Arellano, C., and Zúñiga, D. (2005). Capacidad del *Rhizobium* de promover el crecimiento en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Miller). *Ecología Aplicada*, 4: 47-51.
- Statistical Analysis System, (SAS) (2004). What's New in SAS 9.0, 9.1, 9.1.2 and 9.1.2. SAS institute Inc. Cary N. C. USA.
- Spaepen, S., Vanderleyden, J., and Okon, Y. (2009). Plant growth-promoting actions of rhizobacteria. 51: 283-320. doi:10.1016/s0065-2296(09)51007-5. (disponible en línea desde septiembre 16 de 2009).
- Toor, R. K., Savage, G. P., and Heeb, A. (2006). Influence of different types of fertilisers on the major antioxidant components of tomatoes. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(1): 20-27. doi:10.1016/j.jfca.2005.03.003. (disponible en línea desde agosto 9 de 2005).
- United States Department of Agriculture (USDA) (1991).. United States Standards for Grades of Fresh Tomatoes. <https://www.ams.usda.gov/?dDocName=STELPRDC5050331> (Consulta: marzo 02, 2016).
- Vessey, K. J. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255: 571-586.
- Viti, C., Tatti, E., Decorosi, F., Lista, E., Rea, E., Tullio, M., Sparvoli, E., and Giovannetti, L. (2010). Compost effect on plant growth-promoting rhizobacteria and mycorrhizal fungi population in maize cultivations. *Compost Science & Utilization*, 18(4): 273-281. doi:10.1080/1065657x.2010.10736966. (disponible en línea desde julio 23 de 2013).

- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., and Foolad, M. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3): 199-223. doi:10.1016/j.envexpbot.2007.05.011. (disponible en línea desde junio 4 de 2007).
- Wang, Y. S., and Lin, H. S. (2003). Compost as soil supplement increases the level of antioxidant compounds and oxygen radical absorbance capacity in strawberries. *J. Agric. Food Chem.*, 51: 6844-6850.
- Waterman, P. G., and Mole, S. (1994). *Analysis of phenolic plant metabolites* (B. S. Publications Ed.). Oxford, Boston.
- Williams, W. B., Cuvelier, M. E., and Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensm. Wiss. & Technol.*, 28: 25-30.
- Xue, Q. Y., Chen, Y., Li, S. M., Chen, L. F., Ding, G. C., Guo, D. W., and Guo, J. H. (2009). Evaluation of the strains of *Acinetobacter* and *Enterobacter* as potential biocontrol agents against *Ralstonia* wilt of tomato. *Biological Control*, 48(3): 252-258. doi:10.1016/j.biocontrol.2008.11.004. (disponible en línea desde noviembre 12 de 2008).
- Yang, J., Kloepper, J. W., and Ryu, C. M. (2009). Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Sci.*, 14(1): 1-4. doi:10.1016/j.tplants.2008.10.004. (disponible en línea desde diciembre 4 de 2008).

IV. CONCLUSIONES GENERALES

Las plantas de tomate se desarrollaron con un buen vigor y sin ningún problema de plagas o enfermedades, lo indica que las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal evaluadas favorecieron el desarrollo de las plantas utilizando diferentes mecanismos de acción como son la solubilización de fosfato y producción de fitohormonas principalmente AIA. El mejor sustrato para el crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate fue el que contenía compost, este abono orgánico representa una alternativa con respecto al uso de fertilizantes inorgánicos, así evitar la contaminación y contribuir al mejoramiento de las propiedades del suelo.

El rendimiento del cultivo de tomate se incrementó significativamente con la inoculación de la rizobacterias *Bacillus spp.*, respecto a las plantas sin inocular. La calidad nutracéutica de frutos de tomate se vio favorecida por la interacción de las rizobacterias con el sustrato a base de compost, lo cual permite concluir que los alimentos producidos en abonos orgánicos es una alternativa para obtener alimentos inocuos y con alto valor nutricional. Por lo tanto, se podría indicar que los biofertilizantes y los abonos orgánicos por ejemplo el compost son una alternativa de fertilización en la producción del cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero.

V. LITERATURA CITADA

- Ahemad, M., & Khan, M. S. (2010). *Pseudomonas aeruginosa* strain PS1 enhances growth parameters of greengram [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] in insecticide-stressed soils. *Journal of Pest Science*, 84(1), 123-131. doi: 10.1007/s10340-010-0335-0
- Ahemad, M., & Khan, M. S. (2012). Alleviation of fungicide-induced phytotoxicity in greengram [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] using fungicide-tolerant and plant growth promoting *Pseudomonas* strain. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(4), 451-459. doi: 10.1016/j.sjbs.2012.06.003
- Ahmad, F., Ahmad, I., & Khan, M. S. (2008). Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. *Microbiological Research*, 163(2), 173-181. doi: 10.1016/j.micres.2006.04.001
- Alfonso, T. E., Leyva, Á., & Hernández, A. (2006). Microorganismos benéficos como biofertilizantes eficientes para el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill). *Revista Colombiana Biotecnología*, 7(2), 47-54.
- Almaghrabi, O. A., Massoud, S. I., & Abdelmoneim, T. S. (2013). Influence of inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on tomato plant growth and nematode reproduction under greenhouse conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(1), 57-61. doi: 10.1016/j.sjbs.2012.10.004
- Armenta-Bojórquez, A. D., García-Gutiérrez, C., Camacho-Báez, J. R., Apodaca-Sánchez, M. Á., Gerardo-Montoya, L., & Nava-Pérez, E. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 6(1), 51-56.
- Ashrafuzzaman, M., Akhtar, H. F., Razi, I. M., Anamul, H. M., Zahurul, I. M., Shahidullan, S. M., & Meon, S. (2009). Efficiency of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of rice growth. *African Journal of Biotechnology*, 8(7), 1247-1252.
- Babalola, O. O. (2010). Beneficial bacteria of agricultural importance. *Biotechnol Lett*, 32(11), 1559-1570. doi: 10.1007/s10529-010-0347-0

- Bashan, Y., & de-Bashan, L. E. (2010). How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth - A critical assessment. *Advances in Agronomy*, 108, 77-136. doi: 10.1016/s0065-2113(10)08002-8
- Beckles, D. M., Hong, N., Stamova, L., & Luengwilai, K. (2011). Biochemical factors contributing to tomato fruit sugar content: a review. *Fruits*, 67(1), 49-64. doi: 10.1051/fruits/2011066.
- Bhattacharjee, R. B., Singh, A., & Mukhopadhyay, S. N. (2008). Use of nitrogen-fixing bacteria as biofertiliser for non-legumes: prospects and challenges. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(2), 199-209. doi: 10.1007/s00253-008-1567-2
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal Microbiology Biotechnology*, 28(4), 1327-1350. doi: 10.1007/s11274-011-0979-9
- Caballero-Mellado, J. (2006). Microbiología agrícola e interacciones microbianas con plantas. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 48(2), 154-161.
- Çakmakçı, R., Dönmez, F., Aydın, A., & Şahin, F. (2006). Growth promotion of plants by plant growth-promoting rhizobacteria under greenhouse and two different field soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6), 1482-1487. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.09.019
- Camelo, R. M., Vera, M. S. P., & Bonilla, B. R. R. (2011). Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal. *Revista Corpoica- Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 12(2), 159-166.
- Carballo, C. A. (1992). La calidad genética y su importancia en la producción de semillas. In Mendoza O. L., Favela C. E., Cano R. P. & Esparza M. J. (Eds.), *Situación actual de la producción, investigación y comercio de semillas en México* (pp. 80-101). Torreón, Coahuila, México: Memoria Tercer Simposium.
- Carvajal, M., Juan Sebastián, & Mera, B. A. C. Fertilización biológica: técnica de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible. *Producción + Limpia* 5(2), 79-96.
- Castagno, L. N., Estrella, M. J., Sannazzaro, A. I., Grassano, A. E., & Ruiz, O. A. (2011). Phosphate-solubilization mechanism and in vitro plant growth promotion activity mediated by *Pantoea eucalypti* isolated from *Lotus tenuis* rhizosphere in the Salado

- River Basin (Argentina). *Journal of Applied Microbiology*, 110(5), 1151-1165. doi: 10.1111/j.1365-2672.2011.04968.x
- Castañeda-Miranda, R., Ventura-Ramos, E. J., Peniche-Vera, R. d. R., & Herrera-Ruiz, G. (2007). Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de México. *Agrociencia*, 41, 317-335.
- Castellano, Z. J., & Borbón, M. C. (2009). Panorama de la horticultura protegida en México. In Castellano J. Z. (Ed.), *Manual de producción de tomate en invernadero* (pp. 1-18). Celaya, Gto, México: Intagri, S. C.
- Costales, D., Lisbel, M., & Miriam, N. (2007). Efecto del tratamiento de semillas con una mezcla oligogalacturónidos sobre el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Cultivos Tropicales*, 28(1), 85-91.
- Chirinos, J., Leal, Á., & Montilla, J. (2006). Uso de insumos biológicos como alternativa para la agricultura sostenible en la zona sur del Estado Anzoátegui. *Revista Digital CENIAP Hoy* 11, 1-7.
- Das, A. J., Kumar, M., & Kumar, R. (2013). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): An alternative of chemical fertilizer for sustainable, environment friendly agriculture. *Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences*, 1(4), 21-23.
- de la Cruz-Lázaro, E., Estrada-Botello, M. A., Robledo-Torres, V., Osorio-Osorio, R., Márquez-Hernández, C., & Sánchez-Hernández, R. (2009). Producción de tomate en invernadero con composta y vermicomposta como sustrato. *Universidad y Ciencia*, 25, 59-67.
- De Vleeschauwer, D., & Höfte, M. (2009). Rhizobacteria-induced systemic resistance. *Advances in Botanical Research*, 51, 223-281. doi: 10.1016/s0065-2296(09)51006-3
- Defrieri, R. L., Jimenez, M. P., Efron, D., & Palma, M. (2005). Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. *Agriscientia*, 22(1), 25-31.
- Díaz, V. P., Ferrera-Cerrato, R., Almaraz, S. J. J., & Alcántar, G. G. (2001). Inoculación de bacterias promotoras de crecimiento en lechuga. *Terra Latinoamericana*, 19(4), 327-335.

- Dobbelaere, S., Vanderleyden, J., & Okon, Y. (2003). Plant Growth-Promoting Effects of Diazotrophs in the Rhizosphere. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22(2), 107-149. doi: 10.1080/713610853
- Dorai, M., Papadopoulos, A., & Gosselin, A. (2001). Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie, EDP Sciences*, 21(4), 367-383.
- Dorais, M., Papadopoulos, P. A., & Gosselin, A. (2001). Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie, EDP Sciences*, 21, 367-383.
- Escobar, C., Horna, Y., Careño, C., & Mendoza, G. (2011). Caracterización de cepas nativas de *Azotobacter* spp. y su efecto en el desarrollo de *Lycopersicon esculentum* Mill. "tomate" en Lambayeque. *Scientia Agropecuaria*, 2, 39-49.
- Espinoza-Villavicencio, J. L., Palacios-Espinosa, A., Ávila-Serrano, N., Guillén-Trujillo, A., Luna-de la Peña, R., Ortega-Pérez, R., & Murillo-Amador, B. (2007). La ganadería orgánica, una alternativa de desarrollo pecuario para algunas regiones de México: una revisión. *Interciencia*, 32(6), 385-390.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2013). Consultado: 20-03-2016 en <http://faostat3.fao.org/>
- Félix, H. J. A., Sañudo, T. R. R., Rojo, M. G. E., Martínez, R. R., & Odalde, P. V. (2008). Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai*, 4(1), 57-67.
- Figuerola, V. U., & Cueto, W. J. A. (2003). Uso sustentable del suelo y abonos orgánicos. In Salazar S. E., Fortis H. M., Vázquez A. A. & Vázquez V. C. (Eds.), *Abonos orgánicos y plasticultura* (pp. 1-19). Gómez Palacio, México: Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, COCyTED.
- Foolad, M. R. (2007). Genome mapping and molecular breeding of tomato. *International Journal Plant Genomics*, 2007, 64358. doi: 10.1155/2007/64358
- Fortis-Hernández, M., Leos-Rodríguez, J. A., Preciado-Rangel, P., Orona-Castillo, I., García-Salazar, J. A., García-Hernández, J. L., & Orozco-Vidal, J. A. (2009). Aplicación de abonos orgánicos en la producción de maíz forrajero con riego por goteo. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 329-336.

- Fortis, H. M., Sánchez, T. C., Preciado, R. P., Salazar, S. E., Segura, C. M. Á., Orozco, V. J. A., . . . Trejo Valencia, R. (2013). Sustratos orgánicos tratados para producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo sistema protegido. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México*, 1(2), 1-7.
- Fraser, P. D., Enfissi, E. M., & Bramley, P. M. (2009). Genetic engineering of carotenoid formation in tomato fruit and the potential application of systems and synthetic biology approaches. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 483(2), 196-204. doi: 10.1016/j.abb.2008.10.009
- García, M. H. A., Balderrama, C. P. J., Castro, E. L., Mungarro, I. C., Arrellano, G. M., Martínez, J. L., & Gutiérrez, C. M. A. (2014). Efecto del abono de sustrato gastado de champiñón en el rendimiento de frijol *Phaseolus vulgaris* L. *Terra Latinoamericana*, 32(1), 69-76.
- García, S. I. E., Hynes, R. K., & Nelson, L. M. (2001). Cytokinin production by plant growth promoting rhizobacteria and selected mutants. *Canadian Journal of Microbiology*, 47(5), 404-411. doi: 10.1139/w01-029
- Genevini, P., Adani, F., Veeken, A. H. M., & Scaglia, B. (2002). Evolution of humic acid-like and core-humic acid-like during high-rate composting of pig faeces amended with wheat straw. *Soil Science and Plant Nutrition*, 48(2), 135-141. doi: 10.1080/00380768.2002.10409183
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica (Cairo)*, 2012, 963401. doi: 10.6064/2012/963401
- Gómez, C. M. Á., Schwentesius, R. R., Ortigoza, R. J., & Gómez, T. L. (2010). Situación y desafíos del sector orgánico de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrarias*, 1(4), 593-608.
- Hariprasad, P., & Niranjana, S. R. (2008). Isolation and characterization of phosphate solubilizing rhizobacteria to improve plant health of tomato. *Plant and Soil*, 316(1-2), 13-24. doi: 10.1007/s11104-008-9754-6
- Hartmann, A., Rothballer, M., & Schmid, M. (2008). Lorenz Hiltner, a pioneer in rhizosphere microbial ecology and soil bacteriology research. *Plant Soil*, 312, 7-14. doi: 10.1007/s11104-007-9514-z

- Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Annals of Microbiology*, 60(4), 579-598. doi: 10.1007/s13213-010-0117-1
- Hernández-Rodríguez, O. A., Ojeda-Barrios, D. L., López, D. J. C., & Arras, V. A. M. (2010). Abonos organicos y su efecto en las propiedades físicas química biológicas del suelo. *Tecnociencia, Chihuahua*, 4(1), 1-6.
- Inbar, J., & Chet, I. (1991a). Detection of chitinolytic activity in the rhizosphere using image analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 23(2), 239-242.
- Inbar, J., & Chet, I. (1991b). Evidence that chitinase produced by *Aeromonas caviae* is involved in the biological control of soil-borne plant pathogens by this bacterium. *Soil Biology and Biochemistry*, 23(10), 973-978.
- James, E. K., & Baldani, J. I. (2012). The role of biological nitrogen fixation by non-legumes in the sustainable production of food and biofuels. *Plant and Soil*, 356(1-2), 1-3. doi: 10.1007/s11104-012-1317-1
- Jha, B. K., Gandhi Pragash, M., Cletus, J., Raman, G., & Sakthivel, N. (2008). Simultaneous phosphate solubilization potential and antifungal activity of new fluorescent pseudomonad strains, *Pseudomonas aeruginosa*, *P. plecoglossicida* and *P. mosselii*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25(4), 573-581. doi: 10.1007/s11274-008-9925-x
- Juárez-López, P., Bungarín-Montoya, R., Sánchez-Monteón, A. L., Balois-Morales, R., Juárez-Rosete, C. R., & Cruz-Crespo, E. (2012). Horticultura protegida en Nayarit, México situación actual y perspectivas. *Revista Bio Ciencias*, 1(4), 16-24.
- Juárez-Maldonado, A., de Alba, R. K., Zermeño, G. A., Ramírez, H., & Benavides, M. A. (2015). Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrarias*, 6(5), 943-954.
- Kang, S. M., Khan, A. L., Muhammad, H., Zabta, K. S., Kim, Y. H., Joo, G. J., & Lee, I. J. (2012). *Acinetobacter calcoaceticus* ameliorated plant growth and influenced gibberellins and functional biochemicals. *Pakistan Journal of Botany*, 44(1), 365-372.

- Kang, S. M., Khan, A. L., You, Y. H., Kim, J. G., Kamran, M., & Lee, I. J. (2014). Gibberellin production by newly isolated strain *Leifsonia soli* SE134 and its potential to promote plant growth. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *24*(1), 106-112.
- Khalid, A., Arshad, M., & Zahir, Z. A. (2006). Phytohormones: microbial production and applications. In Uphoff N. (Ed.), *Biological approaches to sustainable soil systems*. (pp. 207-220). Boca Raton, Florida, USA: Taylor & Francis/CRC.
- Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture - A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *27*(1), 29-43. doi: 10.1051/agro:2006011
- Kim, J., & Rees, C. D. (1994). Nitrogenase and biological nitrogen fixation. *Biochemistry*, *33*(2), 389-397.
- Kloepper, J. W., Gutierrez-Estrada, A., & McInroy, J. A. (2007). Photoperiod regulates elicitation of growth promotion but not induced resistance by plant growth-promoting rhizobacteria. *Canadian Journal Microbiology*, *53*(2), 159-167. doi: 10.1139/w06-114
- Kloepper, J. W., Reddy, M. S., Kenney, D. S., Vavrina, C. S., Kokalis-Burelle, N., Rodríguez-Kabana, R., & Martínez-Ochoa, N. (2004). Application for rhizobacteria in transplant production and yield enhancement. *Acta Horticulturae*, *631*, 217-229.
- Kloepper, J. W., & Schroth, M. N. (1978). Plant growth promoting rhizobacteria on radishes. In Gilbert-Clorey (Ed.), *Proceeding of the 4th International Conference on Plant Pathogenic Bacteria* (Vol. 2, pp. 879-882). France.
- Latha, P., Anand, T., Ragupathi, N., Prakasam, V., & Samiyappan, R. (2009). Antimicrobial activity of plant extracts and induction of systemic resistance in tomato plants by mixtures of PGPR strains and Zimmu leaf extract against *Alternaria solani*. *Biological Control*, *50*(2), 85-93. doi: 10.1016/j.biocontrol.2009.03.002
- Lernoud, J., & Willer, H. (2016). *Current statistics on organic agriculture worldwide: area, producers, markets, and selected crops*. Ackerstrasse 113, 5070 Frick Switzerland: Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick, and IFOAM - Organics International, Bonn.
- Loper, J. E., & Schroth, M. N. (1986). Influence of bacterial source of indole-3-acetic acid on root elongation of sugar beet. *Phytopathology*, *76*, 386-389.

- López-Mtz., J. D., Díaz, E. A., Martínez, R. E., & Valdez, C. R. (2001). Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra Latinoamericana*, 19(4), 293-299.
- López, A. M., Poot, M. J. E., & Mijangos, C. M. A. (2012). Respuesta del chile habanero (*Capsicum chinense* L. Jacq) al suministro de abono orgánico en Tabasco, México. *Revista Científica UDA Agrícola*, 12(2), 307-3012.
- López, L. V., Cruz, H. M. A., Fernández, D. S., & Mendoza, H. A. (2015). Diversidad bacteriana en raíces de maíz híbrido convencional y genéticamente modificado. *Revista Internacional de Botánica Experimental* 85, 233-243.
- Lucy, M., Reed, E., & Glick, R. B. (2004). Application of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 86, 1-25.
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541-556. doi: 10.1146/annurev.micro.62.081307.162918
- Luna-Guevara, M. L., & Delgado-Alvarado, A. (2014). Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Avances en Investigación Agropecuaria*, 18(1), 51-66.
- MacMillan, J. (2002). Occurrence of gibberellins in vascular plants, fungi, and bacteria. *Journal of Plant Growth Regulation* 20, 387-442.
- Márquez, H. C., Cano, R. P., Chew, M. Y. L., Moreno, R. A., & Rodríguez, D. N. (2006). Sustratos en la producción orgánica de tomate cherry bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(2), 183-188.
- Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T. H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., . . . Boldrin, A. (2013). Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 721-732. doi: 10.1007/s13593-013-0148-7
- Martínez, L. L., Martínez, P. R. A., Hernández, I. M., Arvizu, M. S. M., & Pacheco, A. J. R. (2013). Caracterización de rizobacterias aisladas de tomate y su efecto en el crecimiento de tomate y pimiento. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(1), 63-69.
- Mayak, S., Tirosh, T., & Glick, B. R. (2001). Stimulation of the Growth of Tomato, Pepper and Mung Bean Plants by the Plant Growth- Promoting Bacterium *Enterobacter*

- cloacae* CAL3. *Biological Agriculture & Horticulture*, 19(3), 261-274. doi: 10.1080/01448765.2001.9754929
- Mena-Violante, H. G., Cruz-Hernández, A., Paredes-López, O., Gómez-Lim, M. Á., & Olalde-Portugal, V. (2009). Cambios relacionados con textura de frutos y mejoramiento de la vida de anaquel por la inoculación de raíces de tomate con *Bacillus subtilis* BEB-13BS. *Agrociencia* 43, 559-567.
- Minorsky, P. V. (2007). On the Inside. *Plant Physiology*, 146(2), 323-324. doi: 10.1104/pp.104.900246
- Molina, R. D., Bustillos, C. M. d. R., Rodríguez, A. O., Morales, G. Y. E., Santiago, S. Y., Castañeda, L. M., & Muñoz, R. J. (2015). Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Revista de la DES Ciencias Biológicas Agropecuarias*, 17(2), 24-34.
- Moreno, R. A., Aguilar, D. J., & Luévano, G. A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 15(29), 763-774.
- Nadeem, S. M., Naveed, M., Zahir, Z. A., & Asghar, H. N. (2013). Plant–microbe interactions for sustainable agriculture: fundamentals and recent advances. In Arora N. K. (Ed.), *Plant Microbe Symbiosis: Fundamentals and Advances* (pp. 51-103). India: Springer.
- Nieto-Garibay, A., Murillo-Amador, B., Troyo-Diéguéz, E., Larrinaga-Mayoral, J. Á., & García-Hernández, J. L. (2002). El uso de compostas como alternativa ecológica para la producción sostenible del Chile (*Capsicum annuum* L.) en zonas áridas. *Interciencia*, 27(8), 417-421.
- Nuncio-Orta, G., Mendoza-Villarreal, R., Robledo-Torres, V., Vázquez-Badillo, M., & Almaraz-Suárez, J. J. (2015). Influencia de Rizobacterias en la Germinación y Vigor de Semillas de Chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. ‘var. Grande’). *ITEA- Información Técnica Económica Agraria*, 111(1), 18-33. doi: 10.12706/itea.2015.002
- Olivares-Campos, M. A., Hernández-Rodríguez, A., Vences-Contretas, C., Jáquez-Balderrama, J. L., & Ojeda-Barrios, D. (2012). Lombricomposta y composta de estiércol de ganado vacuno lechero como fertilizantes y mejoradores de suelo. *Universidad y Ciencia*, 28(1), 27-37.

- Ordookhain, K., Khavazi, K., Moezzi, A., & Rejali, F. (2010). Influence of PGPR and AMF on antioxidant activity, lycopene and potassium contents in tomato. *African Journal of Agricultural Research*, 5(10), 1108-1115. doi: 10.5897/ajar09.183
- Ortíz-Castro, R., Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., & López-Bucio, J. (2014). The role of microbial signals in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*, 4(8), 701-712. doi: 10.4161/psb.4.8.9047
- Ortiz, T. J. A., Delgadillo, M. J., Rodríguez, M. M. d. l. N., & Calderón, Z. G. (2016). Inoculación bacteriana en el crecimiento y calidad del fruto de cinco variedades de fresa en suelos con pH contrastante. *Terra Latinoamericana*, 34(2), 177-185.
- Patten, L. C., & Glick, R. B. (1995). Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Canadian Journal of Microbiology*, 42, 207-220.
- Peralta, E. I., Knapp, S., & Spooner, M. D. (2005). New Species of Wild Tomatoes (*Solanum* Section *Lycopersicon*: Solanaceae from Northern Peru. *Systematic Botany*, 30(2), 424-434.
- Pérez, E., Sulbarán, M., Ball, M. M., & Yarzabal, L. A. (2007). Isolation and characterization of mineral phosphate-solubilizing bacteria naturally colonizing a limonitic crust in the south-eastern Venezuelan region. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(11), 2905-2914. doi: 10.1016/j.soilbio.2007.06.017
- Pérez, V. A., & Landeros, S. C. (2009). Agricultura y deterioro ambiental. *Elementos*, 73, 19-25.
- Pieterse, C. M., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C., & Bakker, P. A. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Reviews Phytopathology*, 52, 347-375. doi: 10.1146/annurev-phyto-082712-102340
- Preciado, R. P., Fortis, H. M., García, H. J. L., Rueda, P. E., Esparza, R. J. R., Lara, H. A., . . . Orozco, V. J. (2010). Evaluacion de soluciones nutritivas organicas en tomate en invernadero. *Interciencia* 36(9), 689-693.
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 363(1491), 447-465. doi: 10.1098/rstb.2007.2163
- Raviv, M. (2015). Production of high-quality composts for horticultural purposes: A mini-review. *HortTechnology*, 15(1), 52-57.

- Raviv, M., Oka, Y., Katan, J., Hadar, Y., Yogeve, A., Medina, S., . . . Ziadna, H. (2005). High-nitrogen compost as a medium for organic container-grown crops. *Bioresource Technology*, *96*(4), 419-427. doi: 10.1016/j.biortech.2004.06.001
- Reddy, P. P. (2014). *Plant growth promoting rhizobacteria for horticultural crop protection*. Bangalore, Karnataka, India: Springer.
- Richardson, E. A. (2001). Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, *28*, 897-906.
- Rodríguez, D. N., Cano, R. P., Figueroa, V. U., Palomo, G. A., Favela, C. E., Álvarez, R. V. d. P., . . . Moreno, R. A. (2008). Producción de tomate en invernadero con humus de lombriz como sustrato. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *31*(3), 265-272.
- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, *17*, 319-339.
- Rodríguez, H., Fraga, R., Gonzalez, T., & Bashan, Y. (2006). Genetics of phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth-promoting bacteria. *Plant and Soil*, *287*(1-2), 15-21. doi: 10.1007/s11104-006-9056-9
- Rojas-Solís, D., Hernández-Pacheco, C. E., & Santoyo, G. (2016). Evaluation of *Bacillus* and *Pseudomonas* to colonize the rhizosphere and their effect on growth promotion in tomato (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, *22*(1), 45-57. doi: 10.5154/r.rchsh.2015.06.009
- Rubio, L. M., & Ludden, P. W. (2008). Biosynthesis of the iron-molybdenum cofactor of nitrogenase. *Annual Review of Microbiology*, *62*, 93-111. doi: 10.1146/annurev.micro.62.081307.162737
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2012). Consultado: 25-03-2016 en <http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de Producción Agrícola (SAGARPA). (2014). *Producción Agrícola de Tomate Rojo (Jitomate)*. Consultado: 05-04-2016 en <http://www.siap.gob.mx/>
- Saharan, B. S., & Nehra, V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: A critical review. *Life Sciences and Medicine Research*, *21*, 1-30.

- Sánchez, L. D. B., Gómez, V. R. M., Garrido, R. M. F., & Bonilla, B. R. R. (2012). Inoculación con bacterias de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(7), 1401-1415.
- Santiago-López, G., Preciado-Rangel, P., Sánchez-Chavez, E., Esparza-Rivera, J., Fortis-Hernández, M., & Moreno-Reséndez, A. (2016). Organic nutrient solutions in production and antioxidant capacity of cucumber fruits. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28(7), 518-521. doi: 10.9755/ejfa.2016-01-083
- Sosa, P. (2015). El largo y sinuoso camino de la Química. *Educación Química*, 26(4), 263-266. doi: 10.1016/j.eq.2015.09.006
- Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Okon, Y. (2009). Plant growth-promoting actions of rhizobacteria. *Advances in Botanical Research*, 51, 283-320. doi: 10.1016/s0065-2296(09)51007-5
- Tejera, H. B., Rojas, B. M. M., & Heydrich, P. M. (2011). Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de hongos fitopatógenos. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 42(3), 131-138.
- Tjamos, E. C., Tjamos, S. E., & Antoniu, P. P. (2010). Biological management of plant diseases: Highlights on research and application. *Journal of Plant Pathology*, 92(4), 17-21.
- Toor, R. K., & Savage, G. P. (2006). Changes in major antioxidant components of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chemistry*, 99(4), 724-727. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.08.049
- Tsavkelova, E. A., Cherdyntseva, T. A., Klimova, S. Y., Shestakov, A. I., Botina, S. G., & Netrusov, A. I. (2007). Orchid-associated bacteria produce indole-3-acetic acid, promote seed germination, and increase their microbial yield in response to exogenous auxin. *Archives of Microbiology*, 188(6), 655-664. doi: 10.1007/s00203-007-0286-x
- Tsavkelova, E. A., Klimova, S. Y., Cherdyntseva, T. A., & Netrusov, A. I. (2006). Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 42(2), 117-126. doi: 10.1134/s0003683806020013

- Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M. L., Touraine, B., Moenne-Loccoz, Y., Muller, D., . . . Prigent-Combaret, C. (2013). Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in Plant Science*, *4*, 356. doi: 10.3389/fpls.2013.00356
- Velázquez, E., García-Fraile, P., Ramírez-Bahena, M.-H., Rivas, R., & Martínez-Molina, E. (2010). Bacteria involved in nitrogen-fixing legume symbiosis: current taxonomic perspective *Microbes for legume improvement* (pp. 1-25): Springer.
- Vessey, K. J. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, *255*, 571-586.
- Viti, C., Tatti, E., Decorosi, F., Lista, E., Rea, E., Tullio, M., . . . Giovannetti, L. (2010). Compost effect on plant growth-promoting rhizobacteria and mycorrhizal fungi population in maize cultivations. *Compost Science & Utilization*, *18*(4), 273-281. doi: 10.1080/1065657x.2010.10736966
- Waliszewski, K. N., & Blasco, G. (2010). Propiedades nutraceuticas del licopeno. *Salud Pública de México*, *53*(3), 254-265.
- Weston, L. A., Ryan, P. R., & Watt, M. (2012). Mechanisms for cellular transport and release of allelochemicals from plant roots into the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany* *63*(9), 3445-3454. doi: 10.1093/jxb/ers054
- Willer, H., & Lernoud, J. (2016). *The world of organic agriculture. Statistics and emerging trends 2016*. Ackerstrasse 113, 5070 Frick Switzerland: Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Frick, and IFOAM - Organics International, Bonn.
- Wu, S. C., Cao, Z. H., Li, Z. G., Cheung, K. C., & Wong, M. H. (2005). Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial. *Geoderma*, *125*(1), 155-166. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.07.003
- Yang, J., Kloepper, J. W., & Ryu, C. M. (2009). Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Science*, *14*(1), 1-4. doi: 10.1016/j.tplants.2008.10.004
- Yaxley, R. J., Ross, J. J., Sherriff, J. L., & Reid, B. J. (2001). Gibberellin biosynthesis mutations and root development in pea. *Plant Physiology*, *125*, 627-633.