



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química

Control biológico de hongos fitopatógenos y capacidad  
biofertilizante de *Bacillus* sobre el cultivo de *Capsicum*  
*chinense* Jacq.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental

Presenta

Ing. Carlos Daniel Chan Ku

Dirigido por:

Dr. Juan Ramiro Pacheco Aguilar

Codirigida por:

Dr. Miguel Ángel Mejía Bautista

Querétaro, Qro. a noviembre 2024

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



# Universidad Autónoma de Querétaro

## Facultad de Química

Control biológico de hongos fitopatógenos y capacidad biofertilizante de  
*Bacillus* sobre el cultivo de *Capsicum chinense* Jacq.

### Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental

Presenta

Ing. Carlos Daniel Chan Ku

Dirigido por:

Dr. Juan Ramiro Pacheco Aguilar

Codirigida por:

Dr. Miguel Ángel Mejía Bautista

#### Sinodales

Dr. Juan Ramiro Pacheco Aguilar

Presidente

Dr. Miguel Ángel Mejía Bautista

Secretario

Dr. Juan Campos Guillén

Vocal

Dr. Aldo Amaro Reyes

Suplente 1

M. en C. José Alejandro Cabrera Luna

Suplente 2

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Noviembre 2024

México

## **DEDICATORIA2S**

A Dios quien me ha brindado fuerza, sabiduría y resiliencia en esta etapa académica, ha sido mi guía, fortaleza, fidelidad y amor en todos los momentos difíciles de mi formación, dedicado por siempre darme nuevas oportunidades, el valor y seguridad para lograr mis sueños.

A mi madre la Sra. Manuela del Socorro Ku Canché quién es la persona que más admiro en el mundo y me ha impulsado a ser alguien en la vida. Como familia hemos momentos de vulnerabilidad, siempre has sido mi ejemplo de vencer y de salir adelante. Gracias, porque todo esto se ha reflejado en ser una persona de bien.

A mi hermano Angel Guillermo Chan Ku con su apoyo incondicional, amor y confianza ha hecho posible lograr mis sueños y metas.

A mi abuela la Sra. María Teresa de Jesús Canché Pech mi ejemplo de fortaleza, integridad, sabiduría y lecciones de vida que llevo conmigo siempre.

A mi familia, a los que me acompañaron en la distancia y a los que desde el cielo nunca me dejaron, gracias por todos sus sacrificio y apoyo incondicional. Este logro no me pertenece solo a mí, sino a cada uno de ustedes que me han ayudado a cumplir mis sueños, si me ven volar recuerden que ustedes me dieron las alas, GRACIAS.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Facultad de Química por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

A la Escuela de Agricultura Ecológica U Yits Ka'an, por haberme permitido realizar mis ensayos experimentales de laboratorio y campo durante mi estancia académica.

A la División de Estudios de Posgrados e Investigación del Tecnológico Nacional de México campus Conkal y al Dr. Jairo Cristóbal Alejo por permitirme concluir mis estudios.

Al Dr. Juan Ramiro Pacheco Aguilar por la dirección al trabajo de investigación, apoyo incondicional y su profesionalismo ante cualquier circunstancia, agradezco la oportunidad y confianza brindada en el desarrollo del trabajo.

Al Dr. Miguel Ángel Mejía Bautista su paciencia, constancia y consejos fueron siempre importantes para el desarrollo de este trabajo. Usted forma parte importante de esta historia, que con su profesionalismo y aportes me han permitido llegar a esta instancia tan anhelada.

Gracias por su orientación, apoyo múltiple, palabras de aliento y por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían largas y confusas. Gracias por creer siempre y darme su apoyo en todo momento.

Al Dr. Juan Campos Guillén, Dr. Aldo Amor Reyes y al M. en C. José Alejandro Cabrera Luna quienes conforman el comité del trabajo de investigación, agradezco su apoyo y asesoría brindada durante mi estancia de maestría, así como las recomendaciones pertinentes en el desarrollo del trabajo de investigación.

Agradezco a cada directivo de la facultada de Química en especial al Dr. Miguel Angel Ramos López por su trabajo y su gestión, sin lo cual no estarían las bases ni las condiciones para el aprendizaje en este programa educativo.

A mis amigos y compañeros de posgrado, en especial a Ariadna Espinosa, Adriana Martínez, Mayra Mena y Luis Montes no puedo dejar de agradecerles su apoyo y constancia en los

distintos momentos de trabajo, en las horas más difíciles y por compartir horas de estudio. Cerramos una etapa en esta historia de vida y les agradezco por estar siempre allí.

Estoy agradecido con José Andrés Jiménez Mu cuyo conocimiento y dedicación ha sido de gran valor en la realización de los experimentos de laboratorio, su disposición y experiencia técnica han sido apreciadas en cada momento.

A mis amigos Alejandra Santana y Alberto Ix, que me brindaron su apoyo inquebrantable y por estar presente con una palabra de ánimo en los momentos más desafiantes. Cada uno ha contribuido en mi fortaleza, gracias por ser mi punto de apoyo, mi equipo de aliento y, lo más importante, la familia que yo elegí.

Asimismo, quisiera expresar mi gratitud a Edwin, Gerardo, Emilio y Adriana todas las personas que contribuyeron con el desarrollo del trabajo. Agradezco a todos los que me ayudaron a recopilar datos, los comentarios de mejora, las sugerencias, las entrevistas, las propuestas y análisis. Este trabajo no sería lo que es sin sus aportaciones. A todos

GRACIAS.

## ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL .....	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE: .....	20
I. INTRODUCCIÓN .....	21
II. ANTECEDENTES .....	23
2.1 El cultivo del chile habanero ( <i>Capsicum chinense</i> Jacq.).....	23
2.2 Importancia de hongos fitopatógenos en la producción agrícola.....	23
2.2.1 Hongos fitopatógenos de origen edáfico en regiones tropicales y subtropicales de México .....	24
2.3 Género <i>Fusarium</i> .....	24
2.4 Género <i>Phytophthora</i> .....	26
2.5 Mecanismos de biocontrol de <i>Bacillus</i> y otras especies antagonistas frente a fitopatógenos .....	27
2.6 Bacterias promotoras de crecimiento vegetal .....	28
2.7 Mecanismos bioquímicos de <i>Bacillus</i> relacionados con la promoción de crecimiento vegetal.....	29
2.7.1 Fijación biológica de nitrógeno (N) .....	29
2.7.2 Solubilización de fosfato.....	30
2.7.3 Producción de fitohormonas .....	31
2.7.3.1 Auxinas .....	31

2.7.3.2 Giberelinas .....	32
2.7.3.3 Citoquininas .....	32
2.7.4 Producción de la enzima ACC desaminasa microbiana sobre el 1-aminociclopropano-1-ácido carboxílico (ACC) .....	33
2.7.5 Producción de sideróforos.....	34
III. HIPÓTESIS.....	36
IV. OBJETIVOS .....	37
3.1 Objetivo General.....	37
3.2 Objetivos específicos .....	37
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	38
5.1 Área de estudio.....	38
5.2 Material biológico .....	38
5.3 Actividad hemolítica .....	39
5.4 Evaluación antagónica <i>in vitro</i> de aislados contra <i>Fusarium</i> spp. y <i>Phytophthora</i> sp. ....	39
5.5 Pruebas de patogenicidad de <i>Fusarium</i> sp. en <i>C. chinense</i> . .....	40
5.6 Evaluación de Biocontrol de <i>Fusarium</i> spp. en <i>C. chinense</i> .....	41
5.7 Sintomatología de infección causada por los hongos fitopatógenos de estudio. ....	42
5.8 Actividades bioquímicas relacionadas con la promoción del crecimiento vegetal.....	42
5.8.1 Producción de ácido indolacético (AIA).....	42
5.8.2 Solubilización de fosfato de calcio .....	43
5.8.3. Producción de la enzima 1-aminociclopropano 1-carboxilato de desaminasa (ACC-desaminasa) .....	43
5.8.4. Producción de sideróforos.....	44
5.9 Efecto de los aislados en el crecimiento de plántulas de <i>C. chinense</i> .....	44



5.10 Efecto de la biofertilización de cepas de <i>Bacillus</i> en el rendimiento y calidad de <i>Capsicum chinense</i> .....	45
5.11 Manejo agronómico .....	46
5.11.1 Fertilización orgánica e inorgánica .....	46
5.11.2 Variables evaluadas.....	47
5.12 Diseño experimental y análisis estadístico .....	47
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
6.1 Actividad hemolítica de los aislados bacterianos .....	48
6.2 Evaluación antagónica <i>in vitro</i> de aislados bacterianos contra <i>Fusarium</i> spp. y <i>Phytophthora</i> sp.....	49
6.3. Pruebas de patogenicidad de <i>Fusarium</i> spp. en <i>C. chinense</i> . .....	53
6.4 Evaluación de los aislados para el biocontrol de <i>Fusarium</i> spp. en plantas de <i>C. chinense</i> . .....	56
6.5 Actividades bioquímicas relacionadas con la promoción del crecimiento vegetal.....	60
6.5.1 Producción de ácido indolacético (AIA).....	60
6.5.2 Solubilización de fosfatos insolubles de calcio .....	61
6.5.3 Producción de la enzima 1-aminociclopropano 1-carboxilato de desaminasa (ACC-desaminasa) .....	62
6.5.4. Producción de sideróforos.....	63
6.6 Efecto de los aislados en la promoción de crecimiento en plántulas de <i>C. chinense</i> ...	65
6.7 Biofertilización con <i>Bacillus</i> spp. sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de fruto <i>C. chinense</i> .....	71
VII. CONCLUSIONES .....	75
VIII. REFERENCIAS .....	76
IX. ANEXOS. ....	97

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Aislados bacterianos en estudio .....	38
<b>Cuadro 2.</b> Escala de índice de severidad de la marchitez.....	41
<b>Cuadro 3.</b> Tratamientos establecidos en la biofertilización de <i>C. chinense</i> con dos niveles de fertilización inorgánica.....	46
<b>Cuadro 4.</b> Porcentaje de inhibición de crecimiento radial de aislados contra <i>Fusarium</i> spp. (FCK2 y FCH1) y <i>Phytophthora</i> sp. ....	50
<b>Cuadro 5.</b> Incidencia y severidad de la enfermedad de marchitez por <i>Fusarium</i> spp. FCH7 y FCH8 en plantas de <i>C. chinense</i> . ....	54
<b>Cuadro 6.</b> Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE), severidad y eficiencia del control de <i>Fusarium</i> spp. en <i>C. chinense</i> .....	60
<b>Cuadro 7.</b> Propiedades bioquímicas de los aislados relacionadas con la promoción del crecimiento vegetal. ....	65
<b>Cuadro 8.</b> Efecto de los 19 aislados bacterianos en la promoción de crecimiento de plantas de <i>C. chinense</i> Jacq. a 30 días después de la germinación. ....	69
<b>Cuadro 9.</b> Efecto de los 19 aislados bacterianos en la promoción de crecimiento de plantas de <i>C. chinense</i> Jacq. a 30 días después de la germinación. ....	70
<b>Cuadro 10.</b> Efecto de los aislados en el crecimiento y desarrollo del cultivo de <i>C. chinense</i> Jacq.....	74
<b>Cuadro 11.</b> Efecto de los aislados en el rendimiento y calidad de frutos en <i>C. chinense</i> Jacq.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Plántulas de chile habanero con daños por <i>Fusarium</i> sp.....	25
<b>Figura 2.</b> Estructuras de reproducción asexual y morfología micelial de <i>Fusarium oxysporum</i> .....	25
<b>Figura 3.</b> Morfología micelial de <i>Phytophthora</i> sp.....	26
<b>Figura 4.</b> Plántulas de chile con daños por <i>Phytophthora capsici</i> .....	27
<b>Figura 5.</b> Estructura química de (A) quitina, (B) celulosa y (C) $\beta$ -glucanos.....	28
<b>Figura 6.</b> Ciclo del nitrógeno en el suelo .....	30
<b>Figura 7.</b> Estructuras químicas (A) ácido indol-3-acético (B) ácido indol-3-butírico .....	31
<b>Figura 8.</b> Estructura de ácido giberélico AG3 .....	32
<b>Figura 9.</b> Estructura de la citoquinina .....	33
<b>Figura 10.</b> Actividad de la enzima ACC desaminasa microbiana sobre el ácido 1-aminociclopropano1-carboxílico (ACC) para reducir los niveles de etileno en plantas. ...	34
<b>2.7.5 Producción de sideróforos</b> .....	34
<b>Figura 11.</b> Estructura de un sideróforo microbiano del tipo catecolato .....	35
<b>Figura 12.</b> Actividad hemolítica de los 19 aislados bacterianos estudiados. ....	49
<b>Figura 13.</b> Antagonismo <i>in vitro</i> de los aislados con mayor actividad y <i>B. subtilis</i> Q11 (control positivo) contra <i>Fusarium</i> FCK2 (A), FCH1 (B) y <i>Phytophthora</i> sp.. ....	52
<b>Figura 14.</b> Dendograma de los aislados de acuerdo a sus porcentajes de inhibición contra <i>Fusarium</i> spp. (FCK2 y FCH1) y <i>Phytophthora</i> sp.....	53
<b>Figura 15.</b> Marchitamiento de <i>Fusarium</i> sp. FCH7 en plántulas de <i>C. chinense</i> .. ....	54
<b>Figura 16.</b> Ensayo de patogenicidad de <i>Fusarium</i> sp. FCH7 en plantas de <i>C. chinense</i> . ....	55
<b>Figura 17.</b> Patogenicidad de <i>Fusarium</i> spp. (FCH7 y FCH8) después de 28 días de infección en plántulas de <i>C. chinense</i> . ....	55
<b>Figura 18.</b> Ensayo de biocontrol de <i>Fusarium</i> spp. FCH7 y aislados bacterianos en plántulas de <i>C. chinense</i> .....	57

<b>Figura 19.</b> Ensayo de biocontrol de <i>Fusarium</i> spp. FCH8 y aislados bacterianos en plántulas de <i>C. chinense</i> .....	58
<b>Figura 20.</b> Tratamientos control (+/-) de <i>Fusarium</i> spp. FCH7 y FCH8 en plántulas de <i>C. chinense</i> ., marchitamiento de plántulas inoculadas <i>Fusarium</i> sp. FCH8 con crecimiento fúngico en el sustrato (A), <i>Fusarium</i> sp. FCH7 (B) y plántulas control con solo inoculación de bacteria; AKL1 (C.1) TX6 (C.2) y MAN22 (C.3); y control sin inoculación de patógenos y bacteria (D). .....	58
<b>Figura 21.</b> Curvas del progreso de la enfermedad de la severidad por marchitez inducida por <i>Fusarium</i> sp. FCH7 (A) y <i>Fusarium</i> sp. FCH8 (B) en plantas de chile habanero inoculadas con los aislados bacterianos. ....	59
<b>Figura 22.</b> Determinación de AIA e índoles de los 19 aislados bacterianos mediante la reacción Salkowski .....	61
<b>Figura 23.</b> Solubilización de fosfato de calcio de los aislados en medio NBRIP-BPB .....	62
<b>Figura 24.</b> Producción de la enzima 1-aminociclopropano 1-carboxilato de desaminasa (ACC-desaminasa). ....	63
<b>Figura 25.</b> Producción de sideróforos de los aislados en medio CAS .....	64
<b>Figura 26.</b> Aislados con mayor índice de calidad Dickson en plántulas de <i>C. chinense</i> ...	68
<b>Figura 27.</b> Cosecha de <i>C. chinense</i> con inoculación de MAN22, AKL1, TX6 y CONTROL con dos nivelesde fertilización. ....	73

## RESUMEN

En el sureste mexicano, el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es una importante hortaliza por su alta rentabilidad. La enfermedad de la marchitez, provocada por *Phytophthora* spp. y *Fusarium* spp., causa la principal pérdida de producción que puede ir desde el 25 hasta el 100%. La producción de *C. chinense* en Yucatán enfrenta retos para disminuir el uso de agroquímicos en la nutrición y en el control de fitopatógenos. El objetivo de este trabajo fue caracterizar 19 aislados de *Bacillus* spp. provenientes de suelo de la región sur de Yucatán, por su efecto en la sanidad y el crecimiento en *C. chinense*. En ensayos de biocontrol *in vitro*, todos los *Bacillus* inhibieron el crecimiento micelial de *Fusarium* FCK2, *Fusarium* FCH1 y *Phytophthora* sp. hasta en un 78.20, 68.74 y 67.95 %, respectivamente, siendo las cepas CHP3, MAN22 y TX6, las que mostraron la mayor actividad antifúngica. En la caracterización bioquímica relacionada a la promoción del crecimiento vegetal, todos los *Bacillus* produjeron ácido indolacético AIA en el rango de 8.56-23.08 mg·L<sup>-1</sup>, y en pruebas cualitativas de ACC-desaminasa, producción de sideróforos y solubilización de fosfato el 47.36, 68.42 y 5.26% de las cepas presentaron actividad. En ensayos de biofertilización en planta, todos los *Bacillus* incidieron en el desarrollo de *C. chinense*, siendo AKL1, TX6 y MAN22 los que generaron los mayores índices de calidad, 0.20, 0.20 y 0.26, respectivamente. En pruebas de resistencia a la marchitez, la inoculación de MAN22, TX6 y AKL1 redujo la severidad de la enfermedad ocasionada por *Fusarium* spp. El aislado MAN22 redujo la severidad a un 52.50% para *Fusarium* FCH7 y los aislados AKL1 y MAN22 en un 40.00 y 47.50%, respectivamente contra *Fusarium* FCH8. En cuanto a los ensayos en campo de producción de fruto, MAN22 con 50 y 100% de fertilización inorgánica generó el mayor rendimiento con 196.24 y 208.32 g·planta<sup>-1</sup> y aumentó el número de frutos en un 26.05 y 27.50, incrementando el rendimiento con el 106.58 y 118.08%. sobre el testigo. En conclusión, MAN22 tiene potencial como biofertilizante y agente de control biológico.

**Palabras claves:** Rizobacteria, biocontrol, sanidad vegetal y biofertilización.

## ABSTRACT

In southeastern Mexico, habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) is an important vegetable due to its high profitability. Wilt disease, caused by *Phytophthora* spp. and *Fusarium* spp., is the main cause of production losses, ranging from 25 to 100%. The production of *C. chinense* in Yucatán faces challenges in reducing the use of agrochemicals for nutrition and control of phytopathogens. The objective of this study was to characterize 19 isolates of *Bacillus* spp. from the soil of southern Yucatán for their effect on the health and growth of *C. chinense*. In *in vitro* biocontrol assays, all *Bacillus* isolates inhibited the mycelial growth of *Fusarium* FCK2, *Fusarium* FCH1, and *Phytophthora* sp. by up to 78.20%, 68.74%, and 67.95%, respectively. Strains CHP3, MAN22, and TX6 showed the highest antifungal activity. In the biochemical characterization related to plant growth promotion, all *Bacillus* isolates produced indoleacetic acid (IAA) in the range of 8.56–23.08 mg·L<sup>-1</sup>. In qualitative tests for ACC deaminase, siderophore production, and phosphate solubilization, 47.36%, 68.42%, and 5.26% of the strains showed activity, respectively. In plant biofertilization assays, all *Bacillus* strains impacted the development of *C. chinense*, with AKL1, TX6, and MAN22 generating the highest quality indices of 0.20, 0.20, and 0.26, respectively. In wilt resistance tests, inoculation with MAN22, TX6, and AKL1 reduced the severity of disease caused by *Fusarium* spp. The MAN22 isolate reduced severity by 52.50% for *Fusarium* FCH7, while AKL1 and MAN22 reduced severity by 40.00% and 47.50%, respectively, against *Fusarium* FCH8. In field fruit production trials, MAN22, with 50% and 100% inorganic fertilization, achieved the highest yield with 196.24 and 208.32 g·plant<sup>-1</sup>, increasing the number of fruits by 26.05% and 27.50%, and boosting yield by 106.58% and 118.08% compared to the control. In conclusion, MAN22 has potential as a biofertilizer and biological control agent.

**Keywords:** Rhizobacteria, biocontrol, plant health and biofertilization.

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE:**

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras.

Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y doy reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

---

Ing. Carlos Daniel Chan Ku

## I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es de interés comercial por su consumo y producción en la península de Yucatán, el elevado contenido de capsaicina del fruto tiene propiedades para su uso en la industria alimentaria y farmacéutica. La riqueza genética del chile en México se debe en gran parte a la diversidad de climas y suelos, y el cultivo de chile habanero se caracteriza por una variedad de frutos en forma, color, aroma y grado de pungencia. Los factores territoriales de la península de Yucatán como el clima templado es un principal factor que determina y caracteriza la producción, la elevada temperatura, composición mineral, capacidad de retención de agua, profundidad del suelo y humedad relativa de la región son factores que le dan al cultivo las características de rendimiento y calidad del fruto para su denominación de origen en el 2010.

El sistema agrícola intensivo emplea una explotación de la tierra con el fin de garantizar un suministro suficiente de alimentos, el cual ha desarrollado en las últimas décadas un excesivo empleo de agroquímicos (insecticidas, herbicidas, fungicidas y fertilizantes). El uso indiscriminado de agroquímicos ha desfavoreciendo las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, y en la capacidad para retención agua y nutrientes. De igual manera la aplicación de agroquímicos para el control de agentes patógenos ha afectado la producción agrícola, generando contaminación al ambiente, resistencia a estos microorganismos patógenos e ingresando alimentos con efectos negativos a la salud.

Los hongos fitopatógenos son un grupo de microorganismos heterótrofos, cosmopolitas y heterogéneos que pueden comportarse como saprófitos o parásitos en plantas. Las enfermedades causadas por hongos fitopatógenos provocan pérdidas importantes en el rendimiento y la calidad de los cultivos, limitan su producción y causan grandes pérdidas económicas. Una de las principales limitantes de producción del chile en México es la enfermedad conocida como la marchitez que afecta la raíz o totalidad de la planta, presentándose en las primeras etapas de desarrollo (plántulas), planta adulta y frutos. Esta enfermedad es ocasionada por el complejo de hongos como *Fusarium* spp. y *Phytophthora* spp.



En la agricultura es el manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE) garantiza la rentabilidad y producción de los cultivos, en el que se implementan estrategias de control físicos, culturales, químicos y biológicos. El control biológico es de mayor importancia dentro del MIPE favoreciendo la actividad de organismos para el control en plagas y enfermedades, el uso de microorganismos antagonistas como bacterias, levaduras y hongos ejercen un control sobre diferentes patógenos de interés.

El concepto de Rizobacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (RPCV) o Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR), se deriva de las bacterias rizosféricas con propiedades que promueven el crecimiento y la sanidad de los cultivos. Las RPCV se encuentran en dos conjuntos: bacterias que promueven el crecimiento vegetal (mecanismos directos), que intervienen en su metabolismo como: solubilizando fosfatos, producción de sideróforos, la producción de hormonas (giberelinas, auxinas y citoquininas) o fijando nitrógeno atmosférico; y las bacterias para el control biológico (mecanismos indirectos) con efecto inhibitorio a fitopatógenos o activando los mecanismos de defensa.

El objetivo del trabajo fue evaluar los efectos antagónicos *in vitro* e *in vivo* contra *Fusarium* spp. y *Phytophthora* sp. con bacterias del suelo de la región sur del estado de Yucatán, así como evaluar sus efectos estimulantes del crecimiento vegetal sobre el cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense*). En esta investigación se tuvo efectividad antagónica *in vitro* de los aislados contra *Fusarium* spp. y *Phytophthora* sp. generando mayor antagonismo contra *Fusarium* sp. FCK2 con los aislados DZ1, CHP3 y MAN22. Mientras que para *Fusarium* sp. FCH1 los aislados MAN22, DZ1, CHP3 y TX6; y para *Phytophthora* sp. se estimó con el aislado TX6. El biocontrol a la marchitez generada por *Fusarium* spp. en *C. chinense*, se tiene que las inoculaciones de los aislados bacterianos MAN22 y AKL1, sí redujeron la severidad de la enfermedad ocasionada por estos patógenos. En la evaluación en la promoción de crecimiento en *C. chinense*, los aislados MAN22, TX6 y AKL1 tuvieron incidencias para mejorar algunas variables evaluadas, generando mayor índice de calidad en las plántulas de *C. chinense*. De igual manera estos aislados bacterianos con la interacción de la fertilización química, generaron un mejor crecimiento y desarrollo de plantas de *C. chinense*.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 El cultivo del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)

El chile habanero y su producción a nivel nacional se concentra principalmente en cinco entidades federativas: Sinaloa, Yucatán, Tabasco, Campeche y Quintana Roo; siendo Yucatán el segundo estado con mayor superficie cultivable y en producción anual, con 264 hectáreas y 3,555 toneladas al año, respectivamente (SIAP, 2023). Aunque la producción se encuentre en diversas entidades de la república mexicana, son las entidades que forman la península de Yucatán (Yucatán, Quintana Roo y Campeche), los que poseen la denominación de Origen desde el año 2010, la cual certifica su autenticidad. La zona de producción apta para el cultivo en función a sus requerimientos como el clima cálido subhúmedo, suelos poco profundos los cuales predominan los leptosoles y luvisoles mismos que no toleran excesos de humedad; son factores que prevalecen en la península lo que da origen a las características de producción y calidad del chile habanero (DOF, 2010).

En la península de Yucatán el fruto de *C. chinense* ocupa un lugar principal entre los productos agrícolas de Yucatán por su grado de pungencia y contenido de capsaicina. Este cultivo igualmente es importante para su consumo directo o como una materia prima en la gastronomía por su utilidad en gran cantidad de platillos y, su uso de fuente de vitaminas, minerales y colorantes naturales en los alimentos, así como el interés en más compuestos fitoquímicos en la industria de la salud y la cosmética (Coop-Gamas *et al.*, 2011; Chan-Chunab *et al.*, 2011). Estas propiedades han sido clave para la producción y desarrollo sustentable de este cultivo (Laborde y Pozo, 1984; Borges-Gómez *et al.*, 2010; Cedrón, 2013).

### 2.2 Importancia de hongos fitopatógenos en la producción agrícola

Los patógenos de mayor importancia en pérdidas de producción son los hongos fitopatógenos, causantes de enfermedades en los principales órganos de los cultivos (raíces, tallos, hojas, flores y frutos). Los daños ocasionados representan altos riesgos para la seguridad alimentaria que impiden la producción de mayor cantidad y calidad de alimentos, son el grupo patógenos más importante desde el punto de vista económico, ocasionando bajos rendimientos y en casos extremos la pérdida total de los cultivos (FAO, 2010; Juárez-Becerra *et al.*, 2010).

### **2.2.1 Hongos fitopatógenos de origen edáfico en regiones tropicales y subtropicales de México**

El suelo posee una de las mayores reservas de biodiversidad, donde existe una amplia gama de interacciones, positivas (comensalismo, sinergismo y mutualismo) como negativas (competencia y amensalismo) entre microorganismos y otro, la importancia de las interacciones entre las plantas y la comunidad de microorganismos del suelo influyen en la productividad agrícola (Lumsden *et al.*, 1987).

Los hongos fitopatógenos del suelo, suelen adaptarse y distribuirse en distintas regiones. Estos fitopatógenos causan grandes daños a la producción agrícola; además producen micotoxinas dañinas para los animales y humanos. (Cook y Baker, 1983; Trigos *et al.*, 2008).

En México se ha reportado la incidencia de la enfermedad de la marchitez en la producción de chile en regiones tropicales y subtropicales, que es causada por agentes principales como *Phytophthora capsici*, *Fusarium solani*, *Fusarium oxysporum* y *Rhizoctonia solani* (Fernández-Herrera *et al.*, 2007; Guillén-Cruz *et al.*, 2006; Rivera-Jiménez, 2009). La diversidad de estos hongos fitopatógenos adaptados a distintos hospederos, representa un verdadero problema, debido a su prevalencia, severidad y daño económico a los sistemas agrícolas tropicales y subtropicales (Rodríguez-Guzmán, 2001). Estos microorganismos patógenos afectan los cultivos en los procesos fisiológicos como en la absorción y transporte de agua o nutrientes, la fotosíntesis y metabolismo celular, el crecimiento y maduración del fruto, la senescencia de tejidos causando de la defoliación, el daño a estructuras reproductivas, maduración temprana e irregular y la pudrición radicular en las diversas etapas fenológicas (Velásquez-Valle *et al.*, 2001; Martínez-Ruiz *et al.*, 2016).

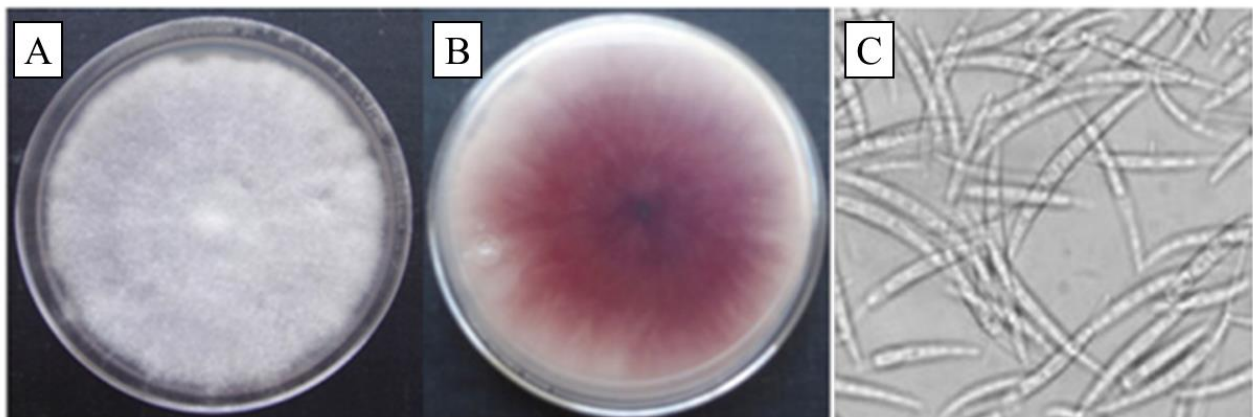
### **2.3 Género *Fusarium***

Las especies de *Fusarium* son un conjunto de hongos distribuidos en suelos y plantas, que poseen la capacidad de desarrollarse a temperaturas de hasta 37 °C, son considerados patógenos oportunistas al producir una infección cuando existe una lesión o las defensas del huésped se encuentren disminuidas (Tapia y Amaro, 2014). Las especies pertenecientes a este género poseen un potencial epigenético en cultivos importantes, causando enfermedades caracterizadas por la marchitez, el tizón y la pudrición (Ma *et al.*, 2013) (Figura 1 y 2). En

hortalizas se registra afectaciones en cultivos de chile, tomate, cebolla, lechuga y remolacha; en frutales se ha registrado en cultivos de cítricos, guayaba, vid y bananos; en plantas aromáticas en albahaca; en cultivos de fibra como en lino y cáñamo y por último en plantas forrajeros como alfalfa (Arbeláez-Torres, 2000).



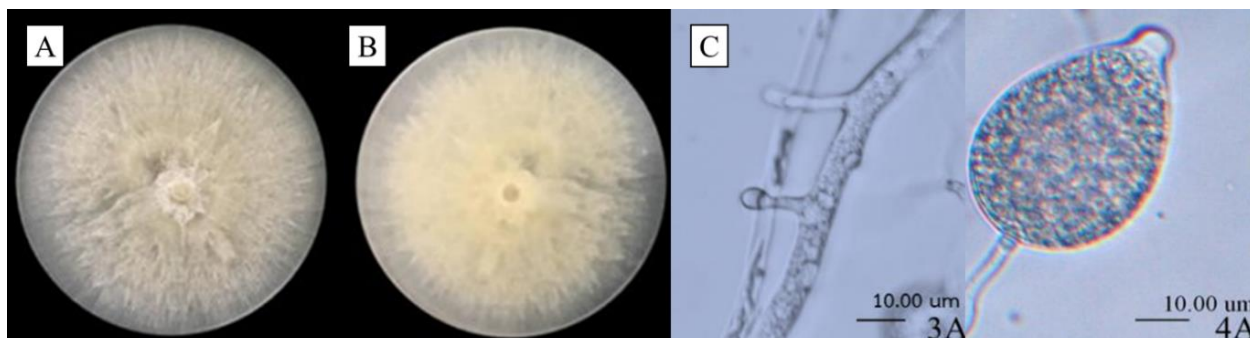
**Figura 1.** Plántulas de chile habanero con daños por *Fusarium* sp. (A) afectación en el follaje de la plántula y (B) afectación radicular y tallo (Mejía-Bautista *et al.*, 2016).



**Figura 2.** Estructuras de reproducción asexual y morfología micelial de *Fusarium oxysporum*, (A) Colonia en la parte superior; (B) Reverso de la placa en coloración purpura y (C) Macroconidios (Robles-Yerena *et al.*, 2016).

## 2.4 Género *Phytophthora*

Las especies del género *Phytophthora* habitan medios acuáticos y terrestres, son altamente reproductivas y su subsistencia facilita la incidencia de enfermedades en la agricultura (Hon, 2018; Judelson y Ah-Fong, 2019). Las especies de este género al igual que otros oomicetos, depende completamente del agua para su reproducción, comenzando con la formación de esporofitos y esporangios, para su liberación y distribución de zoosporas (Figura 3). Estas zoosporas tienen la capacidad de infectar plantas susceptibles y comenzar un ciclo de enfermedad. En México se han registrado 17 especies del género *Phytophthora* como enfermedades en cultivos agrícolas, siendo *P. capsici*, *P. infestans* y *P. cinnamomi* las de mayor prevalencia (Kang *et al.*, 2017; Cárdenas-Rodríguez *et al.*, 2021). Los reservorios de agua en el suelo (suelos anegados) son fuente de dispersión de especies de *Phytophthora*, causantes de enfermedades en diferentes cultivos hortícolas, ornamentales, forestales y frutales, generando pudrición en la raíz y estrangulamiento de tallos en plántulas (Figura 4). *P. palmivora* se ha descubierto causando pudrimiento en yemas y frutos de la palma y *P. capsici* causando marchitez y podredumbre en tallos y raíz en chile, tomate, berenjena, zanahoria, calabaza y otros cultivos comerciales (Hong *et al.*, 2008; Loyd *et al.*, 2014; Soto-Palancarte *et al.*, 2017).



**Figura 3.** Morfología micelial de *Phytophthora* sp. (A) parte superior de la colonia; (B) reverso de la placa y (C) hifa y esporangio (Suksiri *et al.*, 2018).

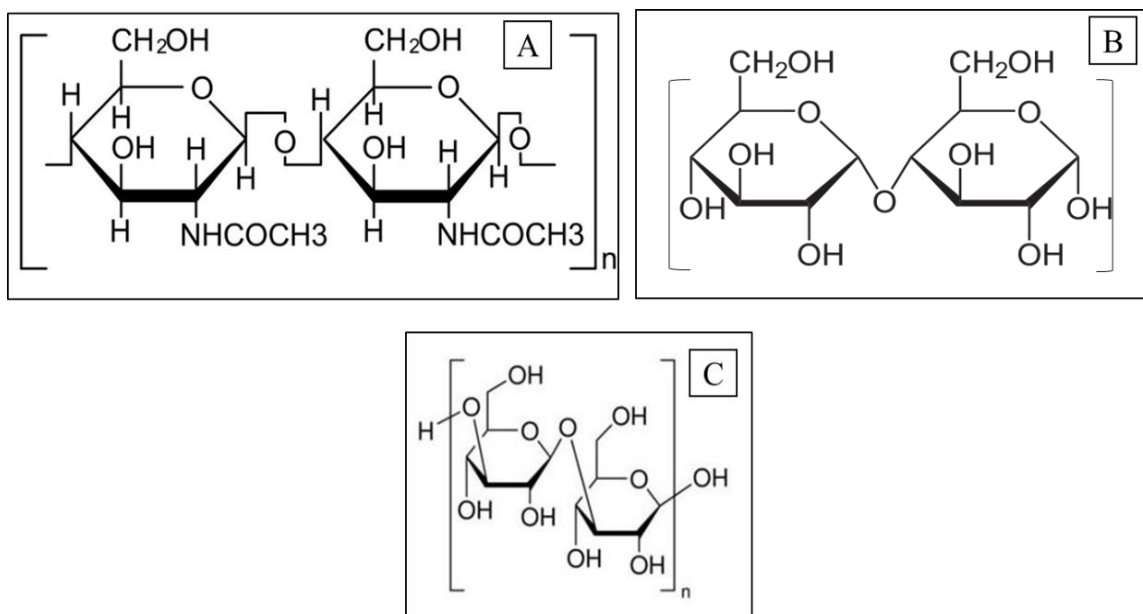


**Figura 4.** Plántulas de chile con daños por *Phytophthora capsici*. (A) Marchitamiento en plántulas, (B y C) pudrición de radicular y tallo (Vásquez *et al.*, 2009).

## 2.5 Mecanismos de biocontrol de *Bacillus* y otras especies antagonistas frente a fitopatógenos

Las especies del género *Bacillus* poseen propiedades de biocontrol, al competir y eliminar a otros microorganismos que afectan el desarrollo de los cultivos, existe una diversidad genética de *Bacillus* en la rizosfera con la propiedad de colonizar el sistema radicular a través de una asociación benéfica tanto para la planta como para el microorganismo (Kim *et al.*, 1997; Choi *et al.*, 1999). Estas características se deben a la capacidad de producir metabolitos secundarios, como antibióticos y otras sustancias con propiedades antibacterianas y antifúngicas que previenen infección de patógenos en plantas. Las especies de las cuales *B. subtilis*, *B. cereus*, *B. pumillus* y *B. polymyxa* han sido las más reportadas. Estas presentan rápido crecimiento, aunado a la capacidad del género para formar endoesporas, producir lipopéptidos y metabolitos secundarios, las cuales pueden emplearse en la inhibición de agentes patógenos, siendo una alternativa para el control biológico (Shoda, 2000). Dentro de la producción de péptidos y lipopeptídicos antimicrobianos, la micobacilina, iturina, bacilomicinas, micosubtilinas y fingistatinas; son metabolitos producidos por diferentes especies de *Bacillus*, *Brevibacillus* y *Paenibacillus* con actividad antifúngica (Souto *et al.*, 2004). Estos géneros también se ha reportado que pueden producir metabolitos antifúngicos volátiles y enzimas degradantes de quitina (Sadfi *et al.*, 2001). En algunos casos pueden presentar capacidad micoparasítica, donde el agente patógeno es literalmente consumido por el antagonista,

utilizando enzimas extracelulares como quitinasas, celulasas y  $\beta$ -1,3-glucanasas, lisando la quitina, celulosa y  $\beta$ -glucanos, de la pared celular del hongo u otros organismos; esta estrategia junto a la competencia por nutrientes, oxígeno o espacio han sido reportados en los agentes de control biológicos ideales para su comercialización (Hoyos-Carvajal *et al.*, 2008).



**Figura 5.** Estructura química de (A) quitina, (B) celulosa y (C)  $\beta$ -glucanos (Castañeda-Ramírez *et al.*, 2011; Pizarro *et al.*, 2014).

## 2.6 Bacterias promotoras de crecimiento vegetal

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), tienen un impacto para la biofertilización (Kloepper *et al.*, 1989). Poseen una naturaleza heterogénea con un vasto número de especies; las cuales por su capacidad de colonizar la rizosfera de los cultivos, mejoran el desarrollo de los cultivos y aumentan su producción (Hariprasad *et al.*, 2009). Se han reportado aislados pertenecientes a los géneros de *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Agrobacterium*, *Azotobacter*, *Serratia*, *Rhizobium*, *Enterobacter* y *Phyllobacterium*. Dentro de las más sobresalientes se encuentran los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* (Adesemoye *et al.*, 2008). Entre los principales mecanismos de las PGPR destacan la fijación de nitrógeno, la mineralización o solubilización de minerales, la producción de moléculas reguladoras de crecimiento de raíces y general de la planta, tanto la inhibición como resistencia sistémica a patógenos así como las interacciones sinérgicas con otros microorganismos. Estos



mecanismos de acción de acuerdo a Aguirre *et al.* (2009) se clasifican como directos o indirectos:

*Mecanismos directos:* Encontramos la síntesis de fitohormonas del crecimiento como: auxinas, giberelinas y citoquininas o sus precursores. Los metabolitos producidos tales como el ácido indolacético (AIA) regula la apertura de las estomas y el crecimiento radical, lo cual mejora la absorción de agua y nutrientes del suelo (Vernner y Martín, 2009). Además, las PGPR puede estimular el crecimiento de los cultivos través de la solubilización de fósforo y la fijación biológica de nitrógeno y la actividad ACC desaminasa (Penrose y Glick, 2003).

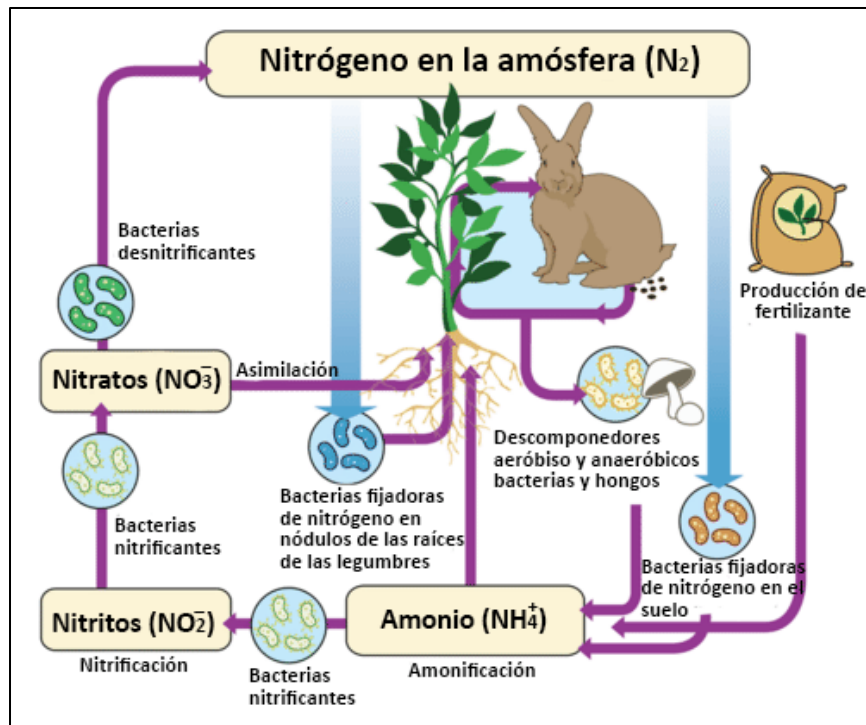
*Mecanismos indirectos:* Los metabolitos generados por las PGPR ejercen funcionalidad antagonista hacia el control biológico o inhibición de crecimiento microbiano perjudicial para las plantas, con la producción de sideróforos, antibióticos, enzimas degradantes de pared celular (quitinasa, celulosa y glucanasa) y mecanismos de resistencia a patógenos (Schwanemann *et al.*, 2020 y Sánchez-Carrillo y Guerra-Ramírez, 2022).

## **2.7 Mecanismos bioquímicos de *Bacillus* relacionados con la promoción de crecimiento vegetal**

### **2.7.1 Fijación biológica de nitrógeno (N)**

El nitrógeno (N) es de los principales elementos nutricionales en cultivos, sin embargo, el 80% del N se encuentra en el suelo en forma orgánica, cuya asimilación no es imposible por los cultivos debido al triple enlace entre los elementos N<sub>2</sub>. Los microorganismos del suelo son responsables de convertir el nitrógeno a formas disponibles para los cultivos, mediante la mineralización de la materia orgánica (Xie *et al.*, 1998; Brady y Raymond, 2002; Oberson *et al.*, 2013). En el suelo, los microorganismos contribuyen al ciclo del nitrógeno, convirtiendo los componentes orgánicos del nitrógeno en amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) proceso llamado amonificación y, después, al oxidarlo a nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (Figura 6) (He y Zhang, 2014). Por otro lado, las bacterias del género *Rhizobium* tienen la capacidad de fijar el N atmosférico, en asociación simbiótica con leguminosas (Silvester, 1983; Sessitsch *et al.*, 2002). El segundo género bacteriano rizosférico, capaz de fijar nitrógeno (de manera libre), incluye especies de *Azospirillum* (Santi *et al.*, 2013).





**Figura 6.** Ciclo del nitrógeno en el suelo (Cerón y Aristizábal, 2012).

### 2.7.2 Solubilización de fosfato

El suelo contiene gran cantidad de fósforo, sin embargo, la cantidad disponible para las plantas se encuentra en bajo porcentaje, debido a que la mayor parte del fósforo se encuentra insoluble, asociado a los minerales primarios (rocas ígneas y metamórficas) y secundarios (rocas sedimentarias), que constituyen la gran reserva de fósforo insoluble inorgánico en el suelo. Los microorganismos del suelo solubilizadores de fósforo, emplean los exudados de raíces, metabolizándolos y secretando ácidos orgánicos (ácido butírico, oxálico, succínico, málico, glucónico, acético, láctico, cítrico, etc.) que favorecen la solubilización del fósforo mineral (Goswami *et al.*, 2014).

El fósforo es absorbido por los cultivos en dos formas solubles: fosfato dihidrógeno  $[H_2O_4P]^-$  y fosfato monoácido  $(NH_4)_2HPO_4$  (Ticconi *et al.*, 2001). Las bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV) solubilizan el fosfato para suministrar a las plantas y darles una ventaja sobre todas las plantas que no tienen una microbiota soluble a este mineral. (Mixquititla y Villegas, 2016).

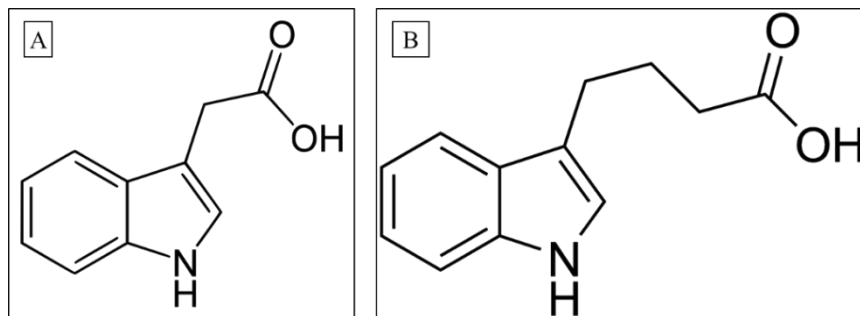
Existen microorganismos del género *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Rhizobium*, etc. capaces de solubilizar P del suelo de forma natural a través de la producción de fitasas, permitiendo la solubilización del P a partir del ácido fítico. Este proceso permite la movilización del P en las plantas y su mejor aprovechamiento del nutriente (Corrales *et al.*, 2014).

### 2.7.3 Producción de fitohormonas

Las fitohormonas son producidas internamente por las plantas y funcionan en bajas concentraciones para alterar los patrones de crecimiento, las principales son la auxina, la giberelina y la citoquinina, dentro de los principales procesos fisiológicos controlados por fitohormonas incluyen: la división celular, elongamiento radicular y desarrollo de órganos vegetativos en diferentes etapas fenológicas (Glick, 2014).

#### 2.7.3.1 Auxinas

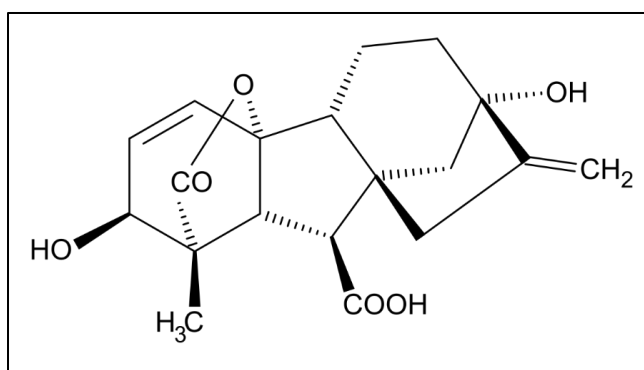
Diversas especies de bacterias sintetizan auxinas como subproductos de su metabolismo, incluidos el ácido indol acético (IAA), el ácido indol butírico (IAB) o sus precursores (Figura 7), estas moléculas han sido estudiadas por su efecto en el desarrollo de las plantas, especialmente en el desarrollo de las raíces. El IAA estimulan tanto respuestas rápidas (mayor elongación celular) como respuestas a largo plazo (división y diferenciación celular). Las plantas expuestas a IAA poseen un mayor desarrollo de raíces laterales y mayor número de brotes, permitiendo a la planta absorber mejor los nutrientes y desarrollarse integralmente. (Aeron *et al.*, 2011; Lavenus *et al.*, 2013; Salazar-Henao *et al.*, 2016).



**Figura 7.** Estructuras químicas (A) ácido indol-3-acético (B) ácido indol-3-butírico (Alcántara-Cortes *et al.*, 2019).

### 2.7.3.2 Giberelinas

Las giberelinas es un extenso grupo de fitohormonas (con más de 120 moléculas), en el que cuatro son sintetizados por bacterias: GA1, GA2, GA3 y GA20 (Figura 8). Estas fitohormonas son transportadas desde la raíz hasta la parte aérea, que estimulan y regulan el desarrollo de las plantas (Wong *et al.*, 2015). Algunas acciones de las giberelinas en las plantas son la estimulación en el desarrollo vegetativo, inducción a la floración, la acumulación de carbohidratos en las yemas florales, mejor calidad de frutos y mayor el rendimiento. Sin embargo, la respuesta depende del estado vegetativo y la dosis de aplicación (Vásquez y Pérez, 2006, Wakchaure *et al.*, 2018; Fang *et al.*, 2019). La producción de giberelinas son de gran interés, no obstante, para las PGPR no es común, a pesar de ello se han documentado dos especies como *B. pumilus* y *B. licheniformis* (Gutiérrez-Mañero *et al.*, 2001).

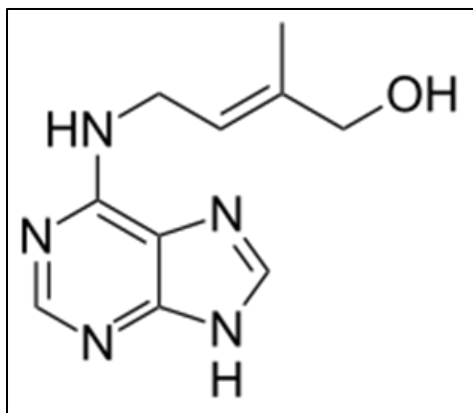


**Figura 8.** Estructura de ácido giberélico AG3 (Ross *et al.*, 2018).

### 2.7.3.3 Citoquininas

Las citoquininas también conocidas como citoquinas es otro grupo de fitohormonas derivados de la adenosina o de aminopurinas. donde la zeatina, benciladenina y kinetina son las más importantes (Figura 9). Estas moléculas son derivados de purina que promueven la división y la diferenciación celular de los cultivos agrícolas, asimismo, regulan el crecimiento y el desarrollo vegetal. Principalmente los cultivos usan las citoquininas para mantener las células madre pluripotentes en los lóbulos y meristemos de las raíces (Leibfried *et al.*, 2005). Los microorganismos principales productores de citoquininas sustituidas en N<sub>6</sub> estudiados

pertenecen a géneros como *Pseudomonas*, *Azospirillum* y *Bacillus*, que han sido aislados en cebada y canola (Persello-Cartieaux *et al.*, 2001).



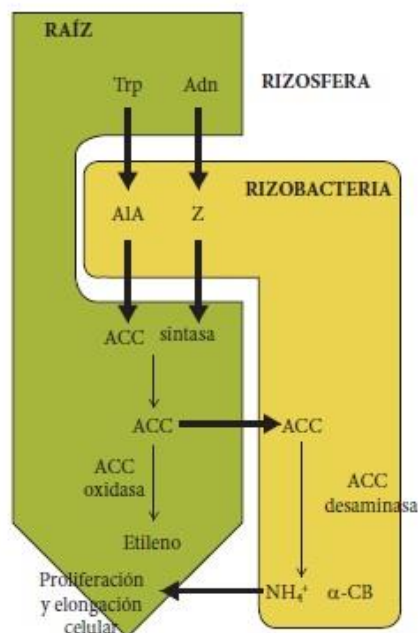
**Figura 9.** Estructura de la citoquinina zeatina (Huertas *et al.*, 2004).

#### **2.7.4 Producción de la enzima ACC desaminasa microbiana sobre el 1-aminociclopropano-1-ácido carboxílico (ACC)**

El etileno es una fitohormona producto del estrés biótico y abiótico, que a altos niveles ejerce efectos en los cultivos, tales como retrae el crecimiento radicular, acelera la senescencia de flores, promueve la abscisión de flores y frutos. El mecanismo de acción que las PGPR emplean para promover el crecimiento vegetal es mediante la disminución de los niveles del precursor del etileno el ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) a través de la enzima ACC desaminasa (Figura 10) (Glick *et al.*, 1998).

El ACC desaminasa fracciona el ACC en la vía biosintética en las plantas, cuando la molécula se incide en dos productos: amoníaco y  $\alpha$ -cetobutirato. Las bacterias con actividad ACC-desaminasa colonizan las raíces y utilizan ACC como fuente de carbono y nitrógeno tanto en el interior de la raíz como en el exudado de la raíz (Holguín *et al.*, 2003).

La enzima disminuye el nivel de etileno en las raíces, lo que hace que su longitud sea mayor. Las bacterias que metabolizan el ACC a través de la ACC desaminasa en la raíz, reducen la concentración en el interior, lo que a su vez reduce la concentración de etileno (Penrose y Glick, 2003).



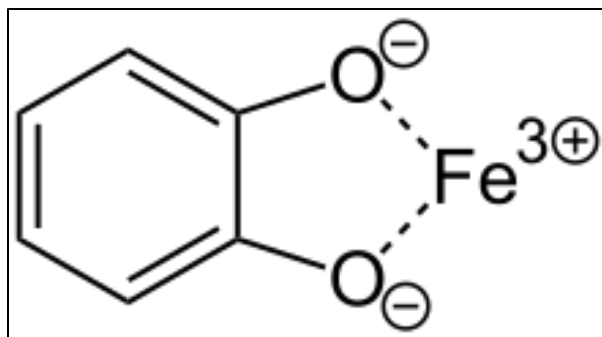
**Figura 10.** Actividad de la enzima ACC desaminasa microbiana sobre el ácido 1-aminociclopropano1-carboxílico (ACC) para reducir los niveles de etileno en plantas (Esquavei-Cote *et al.*, 2013).

### 2.7.5 Producción de sideróforos

El hierro (Fe) como nutriente en los cultivos incide en la síntesis de clorofila, este elemento forma parte de la estructura de las enzimas que catalizan reacciones bioquímicas en procesos de la fotosíntesis (oxido-reducción), respiración, metabolismo del nitrógeno, y sulfato. En condiciones fisiológicas, el hierro puede existir en la forma ferrosa (Fe<sup>2+</sup>) o en la forma férrica (Fe<sup>3+</sup>), encontrándose mayormente en silicatos de ferromagnesio, hidróxidos u óxidos de hierro, formas que no son fácilmente asimilables por las plantas (Aguado-Santacruz *et al.*, 2012; Colombo *et al.*, 2013).

Diversos microorganismos como bacterias, hongos, levaduras y algunas plantas particularmente gramíneas producen moléculas llamadas sideróforos que actúan como agentes

quelantes específicos de  $\text{Fe}^{3+}$ . Los principales grupos de sideróforos incluyen catecolatos (fenolatos), hidroxamatos y carboxilatos (Figura 11) (Haas y D efago, 2005; Radzki *et al.*, 2013). Los sider oforos a trav es del mecanismo de acción permite absorber el hierro de manera eficiente, liberando compuestos orgánicos quelantes. Este elemento puede ser absorbido por enzimas de la membrana plasmática vegetal, transportando el hierro por la enzima reductora (FRO1), el cual reduce el  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{+2}$  y transportando de  $\text{Fe}^{+2}$  (IRT) para su absorción por la membrana plasmática (Ahmed y Holmstr m, 2014). Otro mecanismo es por complejos de microorganismos que forman sider oforos a trav es de compuestos orgánicos con el hierro  $\text{Fe}^{3+}$  en el suelo, estos son asimilados por el microorganismo que los producen como por otros microorganismos habitan en las cercanías para su reducción y fácil absorción por parte de la planta (Conte y Walter, 2011). La inoculación de las Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV) ejercen una actividad metabólica, que contribuye a inhibir o controlar el crecimiento de microorganismos indeseables, así como mejorar el crecimiento y rendimiento del cultivo de *Capsicum chinense* Jacq.



**Figura 11.** Estructura de un sideróforo microbiano del tipo catecolato con  $\text{Fe}^{3+}$  (Aguado-Santacruz *et al.*, 2012).

### III. HIPÓTESIS

La capacidad inhibitoria *in-vitro* hacia *Fusarium* spp. y *Phytophthora* sp. y la estimulación de crecimiento vegetal generado por los aislados *Bacillus* spp., pueden ser utilizados para reducir la incidencia de enfermedades en plantas de *Capsicum chinense* Jacq. y ser un bioinculante eficaz que permita estimular el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo.

## IV. OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo General

Caracterizar aislados de *Bacillus* spp. provenientes de suelo de la región sur de Yucatán, por su efecto en la sanidad y actividad promotora del crecimiento vegetal sobre el cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.).

### 3.2 Objetivos específicos

- Evaluar la capacidad antagónica *in vitro* de aislados de *Bacillus* spp. provenientes de suelo de la zona de Yucatán contra *Fusarium* sp. y *Phytophthora* sp. patógenos causantes de la marchitez
- Cuantificar la capacidad de los aislados bacterianos para reducir la incidencia de la marchitez en plantas de chile habanero causada por *Fusarium* spp. y *Phytophthora* sp.
- Determinar la capacidad de solubilización de fosfatos, producción de AIA, actividad ACC-desaminasa y producción de sideróforos en los aislados bacterianos, relacionados con la promoción del crecimiento vegetal
- Evaluar el efecto promotor de crecimiento de 19 aislados de *Bacillus* spp. en plántulas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.)
- Evaluar el efecto de la biofertilización con *Bacillus* spp. sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de fruto del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.).



## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Área de estudio

El trabajo se realizó en dos sitios, la fase de laboratorio en instalaciones de la Universidad Autónoma de Querétaro en el laboratorio de Plantas y Biotecnología Agrícola de la facultad de Química y la fase de campo se realizó en instalaciones de la Escuela de Agricultura Ecológica “U Yits Ka'an”, en la carretera Maní/Dzan del municipio de Maní, Yucatán, México.

### 5.2 Material biológico

Se emplearon 19 aislados bacterianos (Cuadro 1), obtenidas de muestras de suelo de la región sur del estado de Yucatán, proporcionados por el Laboratorio Campesino “Bernardo Xiu Uc”, de la Escuela de Agricultura Ecológica U Yits Ka'an de Maní, Yucatán. Las bacterias se activaron en agar nutritivo (AN), para ensayos de actividad antagonista *in vitro* se usaron dos cepas de *Fusarium* spp. proporcionadas por el Laboratorio Campesino “Bernardo Xiu Uc” y de *Phytophthora* sp. proporcionada por el laboratorio Quimia del estado de Sinaloa, y para los ensayos de biocontrol se usó una cepa de *Fusarium* sp del Laboratorio Campesino “Bernardo Xiu Uc”, los cuales fueron cultivadas y realizadas las pruebas en agar papa dextrosa (PDA).

**Cuadro 1.** Aislados bacterianos en estudio

Aislados	Localidad	Aislados	Localidad
<b>AKL1</b>	Akil, Yucatán	<b>OXK1</b>	Oxkutzcab, Yucatán
<b>CHP2</b>	Chapab, Yucatán	<b>OXK2</b>	Oxkutzcab, Yucatán
<b>CHP3</b>	Chapab, Yucatán	<b>SAC2</b>	Sacalum, Yucatán
<b>DZ1</b>	Dzan Yucatán	<b>SAC3</b>	Sacalum, Yucatán
<b>MAM1</b>	Mama, Yucatán	<b>SE2</b>	Santa Elena, Yucatán
<b>MAM2</b>	Mama, Yucatán	<b>TK1</b>	Tekit, Yucatán
<b>MAM3</b>	Mama, Yucatán	<b>TK2</b>	Tekit, Yucatán
<b>MAM4</b>	Mama, Yucatán	<b>TX6</b>	Tixmehuac, Yucatán
<b>MAN5</b>	Maní, Yucatán	<b>TX7</b>	Tixmehuac, Yucatán
<b>MAN22</b>	Maní, Yucatán		

### 5.3 Actividad hemolítica

Se evaluó la actividad hemolítica en los 19 aislados en placas de agar-sangre Becton Dickinson (BD) [15 g·L<sup>-1</sup> Peptona de Caseína, 5 g·L<sup>-1</sup> Peptona de soya, 5 g·L<sup>-1</sup> NaCl, 15 g·L<sup>-1</sup> agar y 50 mL·L<sup>-1</sup> sangre de carnero, pH de 7.4]. Los aislados fueron sembrados por estría, identificando la actividad hemolítica con la producción de halo (zona clara) en el medio debido a la tensión superficial y el rompimiento de la membrana de los eritrocitos del medio presuntamente relacionada con la secreción de antibióticos como lipopéptidos (Smythy *et al.* 2010; Becerra y Horna, 2016). Las placas se incubaron a 27 °C durante 24 h, evaluando los valores del diámetro del halo producido (Guillén-Navarro *et al.* 2023).

### 5.4 Evaluación antagónica *in vitro* de aislados contra *Fusarium spp.* y *Phytophthora sp.*

Los ensayos de antagonismo para control de *Fusarium spp.* y *Phytophthora sp.* se realizaron mediante cultivo dual (Khalil *et al.*; 2021), para ello, placas Petri con Papa Dextrosa Agar (PDA) fueron sembradas en el centro con un disco de micelio activo del hongo fitopatógeno y las bacterias sembradas por estría a 2 cm de distancia, como control se sembraron placas con el hongo sin bacterias. Las cajas Petri se incubaron a 27 °C hasta que las cajas control, el hongo cubra toda la superficie (Rubio-Tinajero *et al.*, 2021; Montoya-Martínez *et al.*, 2023). El efecto antagónico de las bacterias fue determinado mediante la inhibición en el crecimiento micelial del hongo, obteniendo el porcentaje de inhibición del crecimiento radial (PICR) (Ezziyyani *et al.*, 2007; Andrade-Hoyos *et al.*, 2019) siguiendo la Ecuación (1).

$$\text{PICR} = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

R1: Crecimiento radial del hongo en las placas control.

R2: Crecimiento radial del hongo patógeno en interacción con el antagonista.

El ensayo se estableció con 19 tratamientos (aislados bacterianos) en confrontación con dos hongos del género *Fusarium spp.* (FCH1 y FCK2) y uno de *Phytophthora sp.*, adicionalmente, se empleó a *Bacillus subtilis* (Q11) de control positivo. Se estableció un diseño experimental

completamente al azar con tres repeticiones considerando cada caja Petri como unidad experimental.

### **5.5 Pruebas de patogenicidad de *Fusarium* sp. en *C. chinense*.**

Se produjeron plántulas de *C. chinense* empleando semillas de la variedad naranjo criollo (Anexo 1), fueron desinfectadas con NaClO al 2% v·v<sup>-1</sup>, seguidamente de tres lavados con agua destilada estéril, posteriormente, fueron sembradas en charolas de poliestireno con sustrato estéril comercial Cosmopeat®, asegurando un adecuado manejo agronómico y fertilización con la formulación 125-100-150 de N-P-K y un complemento de fertilización foliar (Bayfolan®) (Soria *et al.*, 2002).

Se obtuvieron plántulas de 28 días después de la germinación (DDG) a las cuales se les realizó pruebas de patogenicidad para determinar la virulencia por acción del hongo fitopatógeno (Anexo 2). El inoculo del patógeno se preparó remojando 200 ml de granos de mijo blanco (*Panicum miliaceum*) con 175 ml de caldo de jugo V8 (200 ml·L<sup>-1</sup> de jugo, 800 ml·L<sup>-1</sup> de agua destilada con 3 g·L<sup>-1</sup>) en matraces de 500 ml durante 24 h, el medio fue esterilizado a 120 °C dos veces durante 30 min (Anexo 3 y 4). Los hongos evaluados con anterioridad en confrontación directa (*Phytophthora* sp., *Fusarium* spp. FCH1 y FCH2), no generaron patogenicidad, por lo que se sustituyeron por dos aislados de *Fusarium* spp. (FCH7 y FCH8) de la colección nueva del Laboratorio Campesino “Bernardo Xiu Uc”. El medio de granos de mijo se inoculó con cinco discos de micelio de *Fusarium* spp. FCH7 y FCH8 cultivado en PDA e incubando para su crecimiento durante dos semanas a temperatura ambiente. Se prepararon macetas en bolsas de polietileno de 10 x 20 cm con sustrato estéril comercial Cosmopeat®. El sustrato fue esterilizado a 120 °C por 15 min (Callaghan *et al.*, 2016; Jung *et al.*, 2016; Mejía-Bautista *et al.*, 2016). A este sustrato se le adicionó 10 g de granos de mijo con el crecimiento de los fitopatógenos y se depositó una plántula por maceta, y con el fin de permitir la infección del patógeno a la planta, se le realizó un corte de 1 cm al ápice de la raíz (Anexo 5). El testigo recibió una mezcla de granos de mijo sin infestar. Se establecieron 15 repeticiones considerando una planta como unidad experimental y, se realizaron evaluaciones cada cuatro días durante 32 días. Las variables evaluadas son la incidencia y se estimó la severidad con apoyo de una escala de cinco clases (Moran-Bañuelos *et al.*, 2010):

**Cuadro 2.** Escala de índice de severidad de la marchitez

Escala	Descripción de la enfermedad
0	Hojas y tallos turgentes
3	Hojas inferiores con clorosis y pérdida de turgencia solamente
5	Hojas medias e inferiores marchitas y la punta del tallo con inclinación ligera
7	Hojas marchitas y punta del tallo colgante
9	Planta muerta

### **5.6 Evaluación de Biocontrol de *Fusarium* spp. en *C. chinense***

Para evaluar la capacidad de biocontrol de las bacterias en estudio sobre la incidencia de la marchitez de la planta de chile habanero provocada por *Fusarium* spp. (FCH7 y FCH8) se realizó ensayos en plántulas, se produjeron en las mismas condiciones del ensayo de patogenicidad y manejo agronómico correspondiente.

Las plántulas se inocularon con los aislados MAN22, TX6 (por su capacidad de biocontrol *in vitro*) y AKL1, que son los aislados que presentaron mayor índice de calidad en plántulas (Índice de Dickson). Cuando las plántulas emitieron sus primeras hojas verdaderas, a 10 días después de la germinación (DDG) se inocularon con 1 mL en la base del tallo de suspensión bacteriana a una concentración celular ajustada a  $10^8$  células mL<sup>-1</sup>. y al testigo se le aplicó 1 mL de 0.9 % de NaCl, repitiendo esta actividad a los 17 y 24 DDG, con la misma concentración, a los 28 DDG se realizó el trasplante en vasos de polietileno con 60 g con sustrato estéril comercial Cosmopeat®.

Posteriormente, la infección en plántulas se realizó empleando la misma metodología en el ensayo de patogenicidad con el patógeno de *Fusarium* spp. FCH7 y FCH8. Posteriormente se suministraron 3 mL de la solución bacteriana a los 28 y 35 DDG (Anexo 6). Cada tratamiento se consideró de la siguiente manera:

T1: Plántulas con la inoculación bacteriana en presencia de hongos fitopatógenos

T2: Plántulas con inoculación de hongos fitopatógenos sin presencia bacteriana

T3: Plántulas con inoculación bacteriana en ausencia de hongos fitopatógenos

T4: Plántulas sin inoculación de hongos fitopatógenos y bacterias.

Las variables a evaluar fueron la incidencia de los patógenos a través de porcentaje plantas dañadas y la severidad con el modelo del Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad (ABCPE) calculando la intensidad de la enfermedad del daño a partir del primer síntoma de la enfermedad (Mejía-Bautista *et al.*, 2016). Se estableció un diseño completamente al azar con 10 repeticiones para cada tratamiento, representando cada maceta una unidad experimental.

$$ABCPE = \sum_{i=1}^{n-1} [(x_i + x_{i+1})/2](t_{i+1} - t_i) \quad (2)$$

### **5.7 Sintomatología de infección causada por los hongos fitopatógenos de estudio.**

La sintomatología de *Fusarium* spp. inducido por el amarillamiento de las hojas inferiores, marchitez en tallo y hojas, xilema en coloración café oscuro, raíces necróticas y, muerte de la planta. La sintomatología de *Phytophthora* sp. inducido por la necrosidad y obstrucción en la base del tallo causando marchitez progresiva, el tejido reblandecido y necrosado por la incidencia del hongo ocasionando marchitamiento completo de las plantas (Mendoza y Pinto 1983; Mendoza 1996; Fernández-Herrera *et al.*, 2013).

### **5.8 Actividades bioquímicas relacionadas con la promoción del crecimiento vegetal**

#### **5.8.1 Producción de ácido indolacético (AIA)**

Los aislados fueron sembrados por triplicado tomando una muestra del aislado mediante picadura, inoculado en 5 mL de caldo Luria Bertani (LB) [5 g·L<sup>-1</sup> NaCl, 5 g·L<sup>-1</sup> extracto de levadura, 10 g·L<sup>-1</sup> peptona de caseína] suplementado con 1 g·L<sup>-1</sup> de L-triptófano e incubados a 160 rpm durante 120 h (Luna *et al.*, 2013). Finalizando la incubación, los cultivos fueron centrifugados a 4,000 rpm durante 10 min para la obtención del sobrenadante. Se dejó reaccionar 1 mL del sobrenadante con 2 mL del reactivo Salkowski [91 ml de FeCl<sub>3</sub>·6 H<sub>2</sub>O (0.5 M) y 49 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 98 %] (relación 1:2); dejando incubar por 30 minutos (Glickmann

y Dessaux, 1995; Acuña *et al.*, 2011; Acurio *et al.*, 2020). La concentración de AIA fue determinado con la absorbancia a 530 nm (espectrofotómetro Dynamica Halo XB-10/Vis 20) y una curva estándar de AIA de 3.6 a 25.2 mg·L<sup>-1</sup>.

### **5.8.2 Solubilización de fosfato de calcio**

La solubilización cualitativa de fosfatos se realizó sembrando los aislados por estría en medio sólido de National Botanical Research Institute Phosphate Growth (NBRIP) [10 g·L<sup>-1</sup> glucosa, 5 g·L<sup>-1</sup> Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 5 g·L<sup>-1</sup> MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 0.25 g·L<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.2 g·L<sup>-1</sup> KCl, 0.1 g·L<sup>-1</sup> (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] con 18 g·L<sup>-1</sup> de agar y adicionado con 0.025 g·L<sup>-1</sup> de azul de bromofenol (BPB); medio contenido de Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> insoluble como fuente de fósforo con un pH de 7.2 (Mehta y Nautiyal, 2001; Pradhan y Sukla, 2006; Liu *et al.*, 2015). El resultado cualitativo se determinó positivo a través de halos blanquecinos del medio sólido (Ben *et al.*, 2009; Qureshi *et al.*, 2012).

Se determinó cuantitativamente la capacidad solubilizadora de fosfato de los aislados con mayor actividad antagonista (Figura 14), con mayor índice de calidad Dickson en plántulas y el aislado con solubilización en medio sólido. Los aislados se mantuvieron en crecimiento en caldo nutritivo, posterior a su crecimiento se tomaron 250 µL del caldo de las bacterias inoculando por triplicado en matraces con 25 mL de medio NBRIP, ajustando pH a 7.0 (Mehta y Nautiyal, 2001). Manteniendo en agitación constante a 200 rpm por 5 días. La cantidad de fósforo soluble en el sobrenadante, se determinó con el método de azul de molibdeno (Ben *et al.*, 2009)

### **5.8.3. Producción de la enzima 1-aminociclopropano 1-carboxilato de desaminasa (ACC-desaminasa)**

El ensayo cualitativo de la actividad ACC-desaminasa, se realizó sembrando los aislados por estría mediante el medio mínimo Dworkin y Foster (DF) [4 g·L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 6 g·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 0.2 g·L<sup>-1</sup> MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 2 g·L<sup>-1</sup> glucosa, 2 g·L<sup>-1</sup> ácido glucónico y 2 g·L<sup>-1</sup> ácido cítrico con oligoelementos: 1 mg·L<sup>-1</sup> FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 10 mg·L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 11.19 mg·L<sup>-1</sup>, MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 124.6 mg·L<sup>-1</sup> ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 78.22 mg·L<sup>-1</sup> CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, 10 mg·L<sup>-1</sup> MoO<sub>3</sub>, pH 7.2] con 1-aminociclopropano 1-carboxilato (ACC) como fuente de N (Penrose y Glick, 2003; Gupta and

Pandey, 2019) incubadas durante 3 días a 30 °C. Las bacterias con crecimiento fueron consideradas con actividad ACC desaminasa.

#### **5.8.4. Producción de sideróforos**

El ensayo cualitativo a la producción de sideróforos, se realizó en el medio cromo azurol-S (CAS); en el que se empleó 30.25 mg de CAS disueltos en 25 ml de agua destilada y mezclada con 5 ml de solución de hierro (III) [ $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  de HCl]. En agitación constante, esta solución se añadió lentamente a 36.45 mg de HDTMA disueltos en 20 ml de agua. La solución final fue aforada a un volumen de un litro. Los aislados fueron sembrados por triplicado tomando una muestra del aislado mediante picadura, inoculado en 5 mL de caldo Luria Bertani (LB) [ $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl,  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  extracto de levadura,  $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  peptona de caseína] e incubados a 160 rpm durante 24 h (Luna *et al.*, 2013). Finalizando la incubación, los cultivos fueron centrifugados a 4,000 rpm durante 10 min para la obtención del sobrenadante. En 2 mL de medio CAS se añadió 2 mL de solución bacteriana y dejando incubando por 30 minutos (Shin *et al.*, 2001; Hu y Xu, 2011). La variación en la coloración de azul a naranja, se considerará positivo en la producción de sideróforos (Alexander y Zuberer, 1991).

#### **5.9 Efecto de los aislados en el crecimiento de plántulas de *C. chinense***

Para evaluar el efecto promotor de las bacterias en estudio sobre plántulas de *C. chinense* se realizó en condiciones de vivero ubicado en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Primero se produjeron las plántulas empleando semillas de la variedad naranjo criollo, desinfectadas con NaClO al 2% v/v, seguidamente de tres lavados con agua destilada estéril, posteriormente, fueron sembradas en charolas de poliestireno con sustrato, asegurando un adecuado manejo agronómico y fertilización con la formulación 125-100-150 de N-P-K y un complemento de fertilización foliar (Bayfolan®) (Soria *et al.*, 2002).

Las bacterias fueron cultivadas en agar nutritivo por 24 h a 30 °C. Posteriormente, se tomó el crecimiento bacteriano para ser disuelto en 5 mL de solución salina estéril a 0.8 % para obtener las células. La concentración celular se ajustó a  $10^8$  células  $\text{mL}^{-1}$ . A los 7 días de después de

la germinación (DDG) se realizó la inoculación en la base del tallo de la plántula con 1 mL de una suspensión bacteriana (Luna *et al.*, 2013). Al control se le aplicó 1 mL de solución salina al 0.8 %. Las plántulas se cultivaron por 30 DDG; al término las variables evaluadas fueron altura, diámetro, número de hojas, longitud radicular, volumen radicular, peso fresco y seco, como variables de crecimiento; y se determinó el Índice de Calidad de Dickson (ICD) (Anexo 7) (Dickson *et al.*, 1960; Sosa Pech *et al.*, 2019) siguiendo la ecuación (2):

$$IDC = \frac{\text{Peso seco total (g)}}{\left(\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro del tallo (mm)}}\right) + \left(\frac{\text{Peso seco de la parte aérea (g)}}{\text{Peso seco de la parte radicular (g)}}\right)} \quad (3)$$

El ensayo se estableció con 19 tratamientos (aislados bacterianos) y un control sin inoculación bacteriana. Se estableció un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones considerando 10 plántulas como unidad experimental.

### **5.10 Efecto de la biofertilización de cepas de *Bacillus* en el rendimiento y calidad de *Capsicum chinense***

Para evaluar la biofertilización de las bacterias en estudio sobre la producción de chile habanero se realizará en condiciones de cielo abierto ubicado en la Escuela de Agricultura Ecológica “U Yits Ka’an”.

Primero se produjeron las plántulas de tal manera que se emplearon semillas de la variedad naranjo criollo, desinfectadas con NaClO al 2% v/v, seguidamente de tres lavados con agua destilada estéril, posteriormente, fueron sembradas en charolas de poliestireno con sustrato estéril comercial Cosmopeat® (Anexo 8), asegurando un adecuado manejo agronómico y fertilización con la formulación 125-100-150 de N-P-K y un complemento de fertilización foliar (Bayfoliar) (Soria *et al.*, 2002).

Después, las plántulas se inocularon con los tres aislados bacterianos con mayor índice de calidad de Dickson, inoculadas en la base del tallo a sus primeras hojas verdaderas a 10 días después de la germinación (DDG) a una inoculación de 1 mL a una suspensión bacteriana a una concentración celular ajustada a  $10^8$  células·mL<sup>-1</sup>, al testigo fue aplicado 1 mL de 0.9 % de NaCl, repitiendo esta actividad de inoculación a los 17 y 24 DDG, con la misma concentración.



EL trasplante se realizó a 45 días DDG en bolsas de polietileno (25 x 40 cm) contenido con un volumen de 12 L con una mezcla de suelo tipo Luvisol más composta (proporción 2:1) (Anexo 9). Establecidos a cielo abierto realizando tres inoculaciones adicionales con los aislados seleccionados: al momento del trasplante, a los 60 y 75 DDG. Aplicando 5 mL por planta en la base del tallo. Al control se le aplicó a 5 mL de 0.9 % de NaCl en los mismos tiempos (Mejía-Bautista *et al.*, 2022).

Se estableció un diseño experimental completamente al azar con cuatro plantas en cada unidad experimental por tres repeticiones; se establecieron los tres con mayor índice de calidad de Dickson y considerando un control sin inoculación bacteriana. Los tratamientos (Cuadro 3) fueron definidos por el esquema de fertilización al 100% y uno al 50% (Soria *et al.*, 2002), para probar la eficiencia de las bacterias en campo.

**Cuadro 3.** Tratamientos establecidos en la biofertilización de *C. chinense* con dos niveles de fertilización inorgánica

<b>Tratamientos</b>	<b>Aislado + Fertilización</b>	<b>Tratamientos</b>	<b>Aislado + Fertilización</b>
T1	Aislado 1-50	T5	Aislado 3-50
T2	Aislado 1-100	T6	Asilado 3-100
T3	Aislado 2-50	T7	CONTROL-50
T4	Aislado 2-100	T8	CONTROL-100
		T9	Sin fertilización química

## 5.11 Manejo agronómico

### 5.11.1 Fertilización orgánica e inorgánica

Obtenidas las plántulas en semilleros fueron trasladadas a una estructura rudimentaria denomina Ka'anché con recubrimiento en la parte superior con malla sombra del 50 % de iluminación. El riego de las plántulas se realizó de manera manual dependiendo de los requerimientos del cultivo y las condiciones climatológicas, se les proporcionó un manejo integrado de plagas de acuerdo a los requerimiento (Anexo 10) (Tucuch *et al.*, 2012), la fertilización se realizó en aplicaciones semanales con base a las recomendaciones regionales del cultivo con la fórmula 125-100-150 de N-P-K y fertilización foliar (Soria *et al.*, 2002) con

la suplementación de una fertilización orgánica a base de composta que se aplicó al momento del trasplante en la mezcla inicial, y posterior a ello se adicionó 200 g.planta<sup>-1</sup> de composta sólida producido en la Escuela de Agricultura Ecológica “U Yits Ka’an”, con aplicaciones subsecuentes cada 20 días (López-Arcos *et al.*, 2012).

### **5.11.2 Variables evaluadas.**

Las plantas se establecieron hasta los 140 DDT, en las cuales se evaluaron las siguientes variables.

#### **5.11.2.1 Variables Agronómicas.**

Altura de la planta (AP). Medido con un flexómetro (cm), de la base del tallo hasta la yema terminal.

Diámetro de tallo (DT). Registrado con un vernier digital (mm), en la base del tallo por arriba de la superficie del suelo.

#### **5.11.2.2 Variables de rendimiento y calidad de frutos**

Numero de frutos (NF). La cuantificación se realizó mediante el conteo directo, tomando en cuenta el número total de frutos cuajados (Anexo 11).

Diámetro ecuatorial (DE). Se midió con la ayuda de un vernier digital (mm) hacia lo ancho del fruto.

Diámetro polar (DP) se midió con un vernier digital (mm) tomando desde la base del pedúnculo hasta el ápice del fruto.

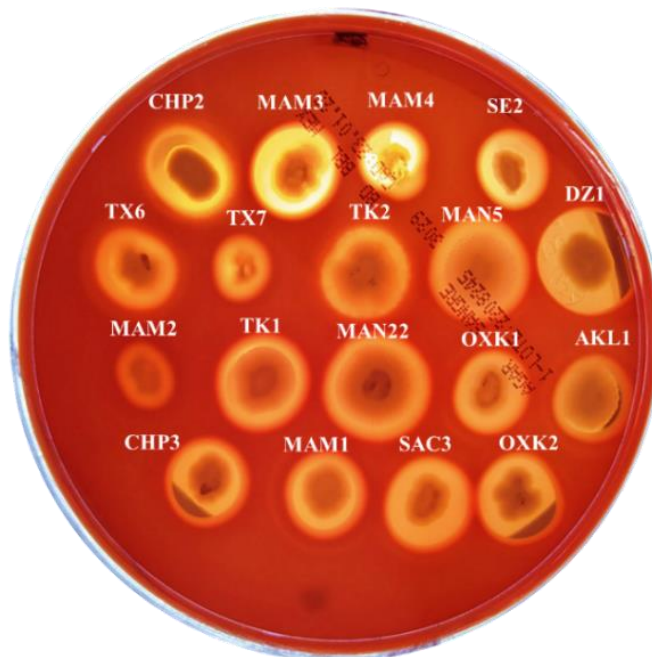
### **5.12 Diseño experimental y análisis estadístico**

Los datos obtenidos en cada ensayo fueron sujetos al análisis de varianza (ANDEVA) y prueba de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ), los análisis se realizaron con el paquete estadístico InfoStat Ver. Libre (Di Rienzo *et al.*, 2008).

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Actividad hemolítica de los aislados bacterianos

En este estudio se identificó en los aislados la actividad hemolítica a través de la formación de halos en el medio agar-sangre, actividad debida a la degradación de la membrana de los eritrocitos del medio. La intensidad en el crecimiento y los halos generados por los aislados en este estudio fueron observados en su mayoría, en donde 18 de los 19 formaron halo hemolítico, solamente el aislado SAC2 no presentó esta actividad (Figura 12). Los 18 aislados generaron halo en un rango de 0.67 a 2.83 mm, siendo los aislados DZ1, CHP2, MAM3, SAC3 y CHP3 de mayor producción con valores de 2.83, 2.76, 2.32, 2.28 y 2.06 mm, respectivamente (Cuadro 4). En el estudio de Shen *et al.* (2010) con *Bacillus* identificaron que la actividad hemolítica se debe a la presencia de sustancias desestabilizadoras relacionados con lipopéptidos biosurfactantes. Este género ha sido estudiado por poseer la capacidad de producir antibióticos lipopéptidos como surfactina, iturinas y fengicinas para el control biológico de agentes fitopatógenos (Stein, 2005; Villarreal-Delgado *et al.*, 2018; Dobrzyński *et al.*, 2023). Con la actividad hemolítica relacionado con la síntesis de lipopéptidos por su parte, Mejía *et al.* (2016) en *B. subtilis* CBRF8 detectaron genes relacionados con la producción de lipopéptidos como bacilomicina D, iturina A y surfactina que están relacionados con el biocontrol de *F. equiseti* y *F. solani*. En este contexto, de igual manera Sarti (2019) en su estudio identificaron la capacidad hemolítica de cepas de *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* en el biocontrol de *Fusarium solani* y *Pythium* sp. Estos estudios nos indican que la capacidad hemolítica de los aislados en estudio, pudiera estar relacionados con su actividad de biocontrol, por la posible producción de lipopéptidos.



**Figura 12.** Actividad hemolítica de los 19 aislados bacterianos estudiados.

### **6.2 Evaluación antagónica *in vitro* de aislados bacterianos contra *Fusarium* spp. y *Phytophthora* sp.**

El efecto antagónico evaluado de los aislados bacterianos contra *Fusarium* spp. y *Phytophthora* sp., nos indica que todos los aislados mostraron inhibición de crecimiento radial (ICR) sobre los fitopatógenos. El análisis de varianza para la variable ICR mostró diferencias entre los 19 aislados bacterianos en este estudio ( $P \leq 0.05$ ) (Cuadro 4).

Los rangos de ICR para *Fusarium* spp. FCK2 y FCH1 fueron del 10.75 al 78.20% y 8.34 al 68.74%, respectivamente. Para el caso de *Phytophthora* sp. fue del 19.14 al 77.32%.

El ICR sobre *Fusarium* sp. FCK2 se tiene que los aislados DZ1, CHP3 y MAN22 generaron valores similares de inhibición del 78.20, 76.85 y 74.99%, respectivamente. Sobre la cepa de *Fusarium* sp. FCH1 el ICR se tuvo que los aislados MAN22, DZ1, CHP3, TX6 y *Bacillus subtilis* Q11, tuvieron valores similares de inhibición, con valores de 68.74, 67.60, 66.67, 64.71 y 64.64%, respectivamente. Para el ICR sobre *Phytophthora* sp. se tiene que *Bacillus subtilis* Q11 y el aislado TX6 tuvieron valores de inhibición similares del 77.32 y 67.95%, respectivamente (Figura 13).

**Cuadro 4.** Porcentaje de inhibición de crecimiento radial de aislados contra *Fusarium* spp. (FCK2 y FCH1) y *Phytophthora* sp.

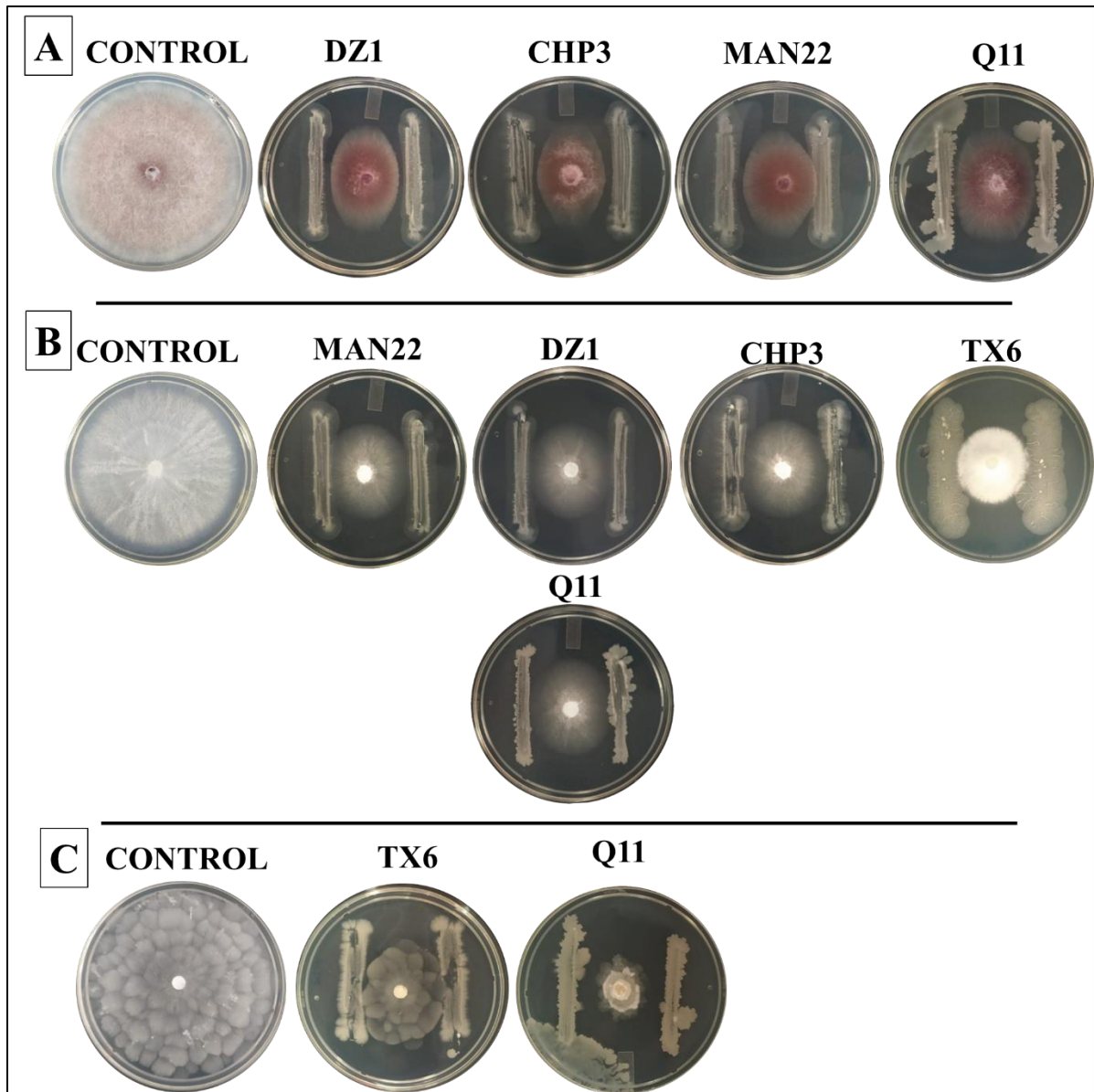
Aislados	H.H (mm)	% ICR		
		<i>Fusarium</i> sp. (FCK2)	<i>Fusarium</i> sp. (FCH1)	<i>Phytophthora</i> sp.
Q11	NR*	66.52±1.29 B	<b>63.64±1.48 A</b>	<b>77.32±1.40 A</b>
DZ1	2.83	<b>78.20±1.05 A</b>	<b>67.60±1.74 A</b>	59.67±1.74 BCDE
CHP3	2.06	<b>76.85±2.02 A</b>	<b>66.67±1.71 A</b>	62.92±1.69 BCD
MAN22	1.86	<b>74.99±1.29 AB</b>	<b>68.74±1.53 A</b>	64.92±0.73 BC
TX6	1.23	65.26±0.47 B	<b>64.71±1.34 A</b>	<b>67.95±2.12 AB</b>
OXK2	1.80	37.74±4.69 C	34.41±8.03 CD	39.63±2.74 HI
SE2	1.12	30.80±9.07 CDE	25.51±4.18 DE	39.41±1.69 HI
MAM2	1.19	28.12±1.97 DEF	31.08±1.84 CD	47.10±2.69 FGH
SAC2	0.00	27.08±6.92 DE	49.43±4.41 B	40.42±5.54 HI
AKL1	0.86	23.49±6.16 DEF	16.20±1.75 EFG	53.84±2.18 DEFG
CHP2	2.76	22.83±1.28 DEF	12.67±3.30 FG	39.61±4.09 HI
MAN5	1.28	20.03±2.46 EFG	11.05±4.08 FG	41.72±2.78 HI
TK2	1.55	18.51±1.78 EFG	14.62±4.30 FG	36.45±6.01 I
MAM1	1.23	14.44±2.40 FG	19.96±5.14 EF	52.73±1.32 EFG
MAM3	2.32	13.45±5.18 FG	18.40±3.75 EFG	58.08±2.59 BCDE
OXK1	1.56	13.45±3.47 FG	38.24±7.87 C	38.50±4.13 HI
MAM4	1.65	12.17±2.48 G	20.56±2.32 EF	19.14±3.45 J
TK1	1.55	11.79±4.79 G	8.34±2.53 G	44.38±7.21 GHI
TX7	0.67	11.57±2.60 G	18.12±2.58 EFG	56.36±7.64 CDEF
SAC3	2.18	10.75±3.79 G	17.18±4.47 EFG	39.14±3.48 HI
CV	–	11.93	13.33	7.73

H.H = Halo de hemólisis; NR = No realizado; CV = Coeficiente de variación. Literal con misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey  $P \geq 0.05$ ).

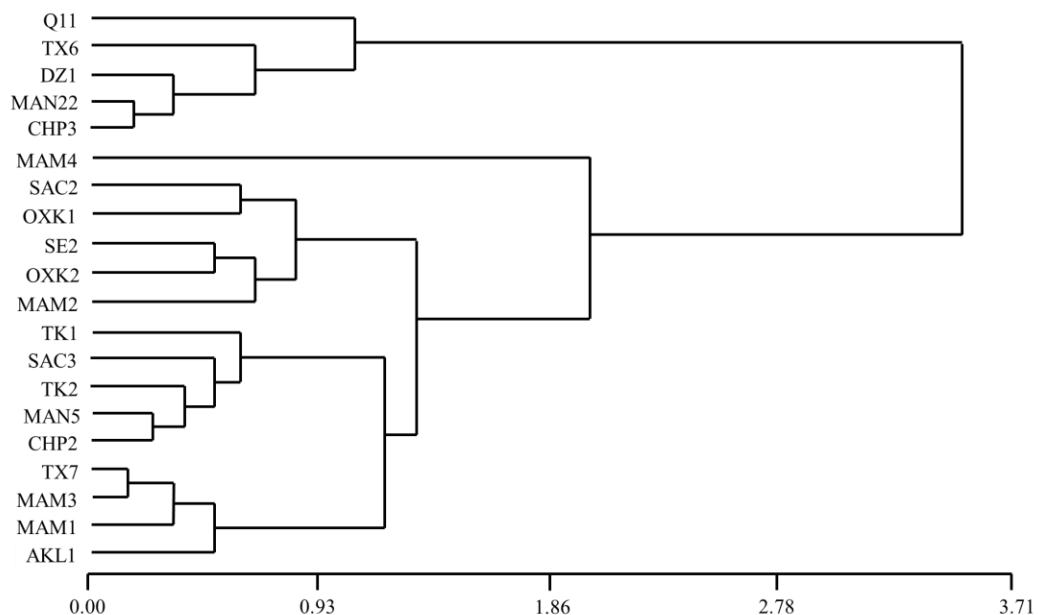
La actividad antagonista de *Bacillus* sobre hongos fitopatógenos está ampliamente estudiada, debido a sus diferentes mecanismos como: competencia por la colonización de la rizosfera, producción de lipopéptidos como iturina, fengicina y surfactina y producción de enzimas

líticas (Chang *et al.*, 2010). Esta actividad antagonista es reportada por Khan *et al.* (2018) en la evaluación antagonista *in vitro* con cepas de *Bacillus* spp. contra *F. oxysporum* f. sp. *conglutinans*, *F. oxysporum* f. sp. *matthioli* y *F. solani* registrando una inhibición del 60 al 70%, datos similares a los reportados en este estudio sobre este género; por su parte Devi *et al.* (2022) usando cepas de *Bacillus* spp. ERBS10 y ERBS51 en confrontación con *F. oxysporum* obtuvieron un porcentaje de inhibición del 55.68 y 58.43% respectivamente, datos inferiores a los registrados con los aislados en este estudio. Mientras que Li *et al.* (2022) con una cepa de *B. subtilis* YN-42(L) generó una inhibición contra *F. oxysporum* del 68.47 %, resultados similares a los reportados en este estudio.

Estudio realizado con *Bacillus* para el biocontrol de *Phytophthora* spp., se ha encontrado el realizado por Li *et al.* (2020) usando una cepa de *B. licheniformis* BL06 en confrontación directa con *P. capsici* obtuvo una ICR del 70 %, resultados que son similares a los obtenidos con los aislados en este estudio. Por su parte, Alfiky *et al.* (2022) al realizar pruebas de biocontrol contra *P. infestans* con una cepa de *B. subtilis* EG21 con el cual lograron una ICR de un 82.0%; Zhang *et al.* (2023) usando una cepa de *B. velezensis* con inhibió el crecimiento micelial de dos cepas de *P. infestans* T30-4 y 88069 con valores de ICR de 91.89 y 95.89 %, respectivamente, valores superiores a los de este estudio. Los resultados obtenidos para el ICR en este estudio con de los aislados bacterianos en confrontación con *Fusarium* spp. FCK2, FCH1 y *Phytophthora* sp. son agentes potenciales para el biocontrol de estos fitopatógenos; en los que pudieran estar involucrados diversos mecanismos como: la competencia por espacio o nutrientes, compuestos antimicrobianos o antifúngicos, enzimas líticas o en su caso la producción de lipopéptidos como la iturina, la fengicina y surfactina (Chang *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2010; Mejía *et al.*, 2016; Pedraza *et al.*, 2019). El potencial como agente de biocontrol de los aislados TX6, DZ1, MAN22 y CHP3 se verificó con un análisis de conglomerados que fueron los que tuvieron valores más cercanos control positivo con *B. subtilis* Q11, demostrando que estos aislados fueron los que generaron mayor actividad antagonista sobre los fitopatógenos como *Fusarium* spp. (FCK2 y FCH1) y *Phytophthora* sp. (Figura 14).



**Figura 13.** Antagonismo *in vitro* de los aislados con mayor actividad y *B. subtilis* Q11 (control positivo) contra *Fusarium* FCK2 (A), FCH1 (B) y *Phytophthora* sp. (C).



**Figura 14.** Dendrograma de los aislados de acuerdo a sus porcentajes de inhibición contra *Fusarium* spp. (FCK2 y FCH1) y *Phytophthora* sp.

### 6.3. Pruebas de patogenicidad de *Fusarium* spp. en *C. chinense*.

En el estudio de patogenicidad por *Fusarium* spp. FCH7 y FCH8 en chile habanero, se estableció la infección de la enfermedad dando lugar al proceso de patogénesis con sintomatologías de: clorosis, flacidez y defoliación total, ahogamiento del tallo, pudrición y marchitamiento. Los síntomas de la enfermedad se presentaron en la primera semana de infección con los patógenos (Figura 15 y 16). Se registró la incidencia del 100% para los dos hongos fitopatógenos en estudio. Sin embargo, se obtuvo mayor severidad para *Fusarium* sp. FCH7 registrando un marchitamiento y muerte total en las plántulas y para *Fusarium* sp. FCH8 un marchitamiento del 98.33% (Cuadro 5). Para los testigos sin la presencia de patógeno se puede observar plantas sin marchitamiento y manteniéndose sanas al término del experimento. Sin embargo, se pudo observar que las plantas infectadas con la FCH8 lograron su máxima infección a los 16 días después de la infección (DDI) y para FCH7 hasta los 28 DDI de los patógenos (Figura 17). El resultado obtenido en relación a la incidencia fue similar en *C. chinense* obteniendo un 97.0 % con la cepa de *F. oxysporum* (López-Benítez *et al.*, 2022), mientras que Iqbal *et al.* (2024) con la cepa *F. oxysporum* f. sp. *capsici* obtuvieron un daño del 100% en *C. annuum*, valores iguales a los obtenidos en este estudio. Mejía-Bautista *et al.*

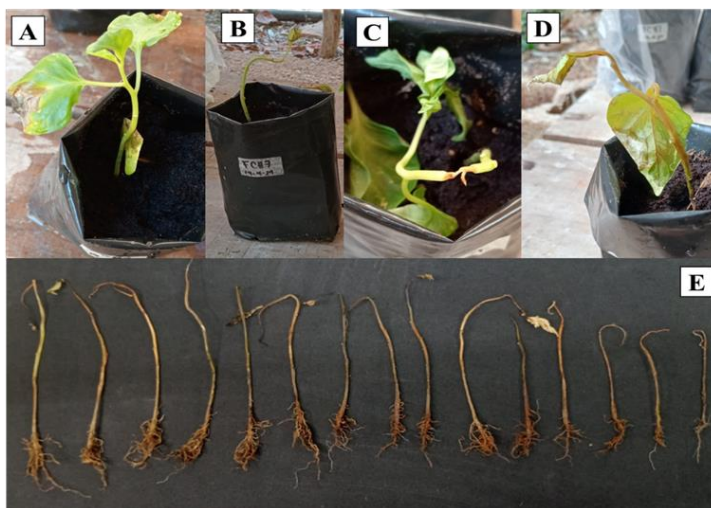


(2016), en pruebas de patogenicidad en *C. chinense* con cepas de *F. equiseti* y *F. solani* lograron la infección con incidencias del 100% y severidad de 77.5 y 90.0%, respectivamente, valores inferiores a los de este estudio. En estudios de patogenicidad en plantas de *Capsicum* spp. inoculadas con *Fusarium* spp. se generó la enfermedad de la marchitez provocando síntomas como: necrosis en el tallo, hojas cloróticas, marchitez y muerte total de la planta, los mismos síntomas obtenidos en este estudio (Herrera-Parra *et al.*, 2011; González *et al.*, 2023).

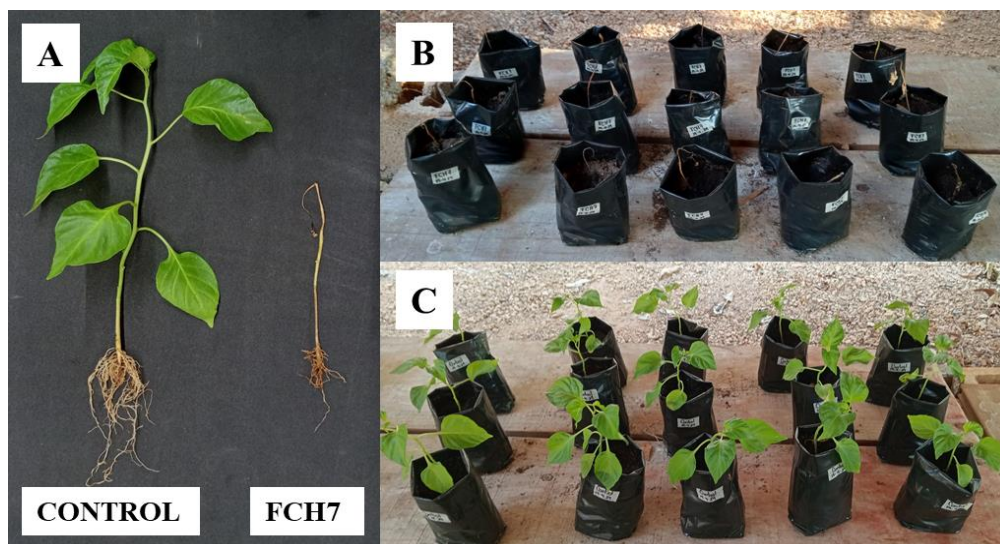
**Cuadro 5.** Incidencia y severidad de la enfermedad de marchitez por *Fusarium* spp. FCH7 y FCH8 en plantas de *C. chinense*.

Tratamiento	Incidencia final (%)	Daño final (%)
FCH7	100±0.0 A	100±0.0 A
FCH8	100±0.0 A	98.33±6.45 A
Testigo	0.0±0.0 B	0.0±0.0 B
CV	0.0	4.60

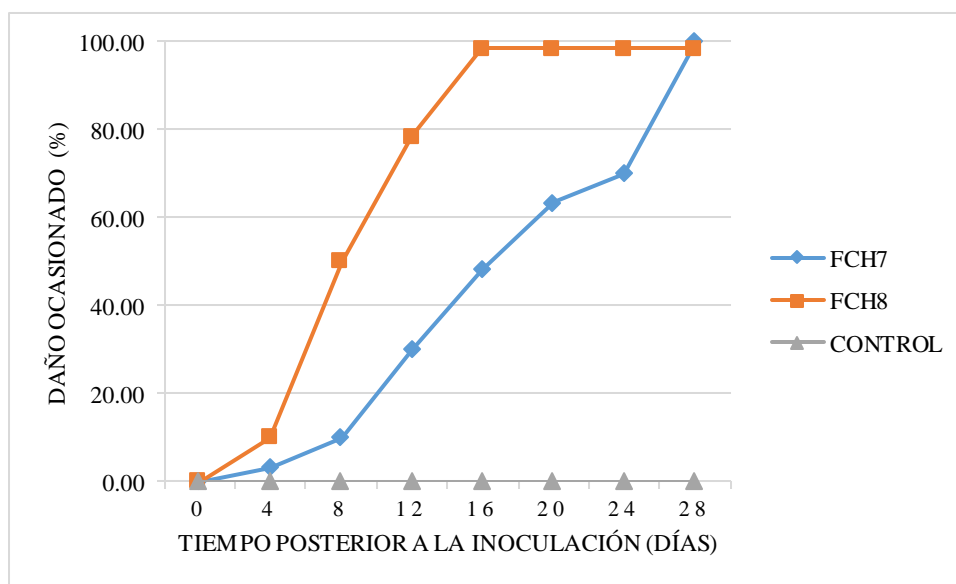
Medias con letras diferentes en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey 0.05). CV= Coeficiente de variación.



**Figura 15.** Marchitamiento de *Fusarium* sp. FCH7 en plántulas de *C. chinense*. Clorosis (A), flacidez y defoliación total (B), ahogamiento del tallo (C), pudrición (D) y plántulas muertas con daños severos en la raíz (E).



**Figura 16.** Ensayo de patogenicidad de *Fusarium* sp. FCH7 en plantas de *C. chinense*. con daño completo de plántulas comparada al control (A). Severidad máxima en las todas plántulas con el patógeno (B) y plántulas control (C).



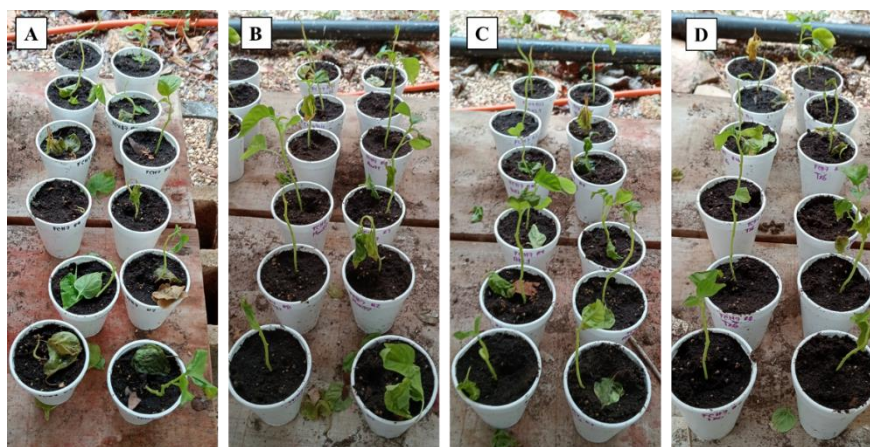
**Figura 17.** Patogenicidad de *Fusarium* spp. (FCH7 y FCH8) después de 28 días de infección en plántulas de *C. chinense*. Siendo un 0 % sin daño y 100 % daño severo.

#### 6.4 Evaluación de los aislados para el biocontrol de *Fusarium* spp. en plantas de *C. chinense*.

La aparición de sintomatología de la enfermedad en las plantas de *C. chinense* por las cepas de *Fusarium* spp. FCH7 y FCH8, se observaron al cuarto día de establecido los experimentos y generando una mayor severidad durante el progreso de la enfermedad, alcanzando un 100 % con ambas cepas de *Fusarium* spp. (Figura 18 y 19). Después de 16 días de infección, el control sin inoculación de patógenos, no presentó la enfermedad (Figura 21). Se pudo observar que las plantas inoculadas con la cepa de *Fusarium* sp. FCH8 presentaba crecimiento micelial sobre el sustrato (Figura 20). El análisis del área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) de las plantas inoculadas con los aislados bacterianos generaron diferencias significativas. Con la inoculación del aislado MAN22 se generó menor ABCPE contra la cepa FCH7 con valor de 325.0 %Unidad·día<sup>-1</sup>, mientras que para la cepa FCH8 los aislados MAN22 y AKL1 generaron menor ABCPE en las plantas, con valores de 395 y 350 Unidad·día<sup>-1</sup> (Cuadro 6). Para severidad final ( $Y_{final}$ ), con *Fusarium* sp. FCH7 se puede observar que con el aislado MAN22 se indujo una severidad del 52.5%, mientras que para FCH8 los aislados MAN22 y AKL1 generaron una severidad del 47.5 y 40.0%, respectivamente; Con estos datos se permitió calcular los mayores niveles de control de la enfermedad con la inoculación del aislado MAN22 con un 47.5% para cepa FCH7 y para la cepa FCH8 se tiene una mayor eficacia con los aislados AKL1 y MAN22 con un 60.0 y 52.5%, respectivamente. En estudios de resistencia a la marchitez por *Fusarium* spp. en *C. chinense* inoculadas con cepas de *B. subtilis* CBMT51 redujeron la severidad en un 39.7% de la enfermedad causada por *F. equiseti*, con eficiencia de control del 47.8%, mientras que para *F. solani* se tuvo un mejor biocontrol con una cepa *B. cereus* BL18 reduciendo la severidad en un 41.7% con una eficiencia de control del 50.9%, éstos valores son similares a los obtenidos en este estudio (Mejía-Bautista *et al.*, 2016). Por su parte Yu *et al.* (2011), en su estudio realizado confirman que la reducción de la enfermedad generada por *F. oxysporum* en *C. annuum* con la aplicación de *B. subtilis* CAS15, se atribuye a una posible inducción a la resistencia sistémica (IRS) conferida a las plantas, debido a la inoculación bacteriana. En este contexto, Hernández-Castillos *et al.* (2014), mencionan que la IRS inducida por *Bacillus* spp. es debido a la capacidad de ejercer mecanismos de biocontrol como la antibiosis, producción de sideróforos,

competencia por nutrientes y producción de enzimas hidrolíticas. En el cultivo de *C. annuum* se confirió resistencia contra *Phytophthora capsici* al emplear cepas de *B. amyloliquefaciens* UQ154 y *B. velezensis* UQ156 y *B. megaterium* con una eficacia de 40 al 57.7% (Akgül y Mirik, 2008).

En el cultivo de *C. chinense* inoculados cepas de *B. cereus* BL18, se pudo detener el progreso de la enfermedad de la marchitez ocasionada por *F. equiseti* y *F. solani* en 630.0 y 587.5 Unidad·día<sup>-1</sup>, en este estudio el %Unidad·día<sup>-1</sup> fueron menores (Mejía-Bautista *et al.*, 2016). Autores como Yu *et al.* (2011), indican que la pre-inoculación con las bacterias benéficas tienden a mejorar la activación de la IRS en las plantas, lo cual se pudiera ver reflejado en una menor severidad y menor %Unidad·día<sup>-1</sup> de plantas enfermas, mecanismo de inoculación empleada en este estudio. Así mismo, se pudo observar que la capacidad de biocontrol de la enfermedad está asociada con el tipo de aislado bacteriano y la especie de fitopatógenos a controlar, estos resultados concuerdan con lo reportado por Mejía-Bautista *et al.* (2016). La incorporación de especies bacterianas para el control biológico de hongos fitopatógenos, pueden generar una gestión eficaz en la resistencia hacia las enfermedades que tienen origen en el suelo, lo que pudiera disminuir en el uso de productos de síntesis química para el control de enfermedades en cultivos hortícolas.



**Figura 18.** Ensayo de biocontrol de *Fusarium* spp. FCH7 y aislados bacterianos en plántulas de *C. chinense*. Control + (A), tratamiento MAN22 (B), tratamiento AKL1 (C) y tratamiento TX6 (D).

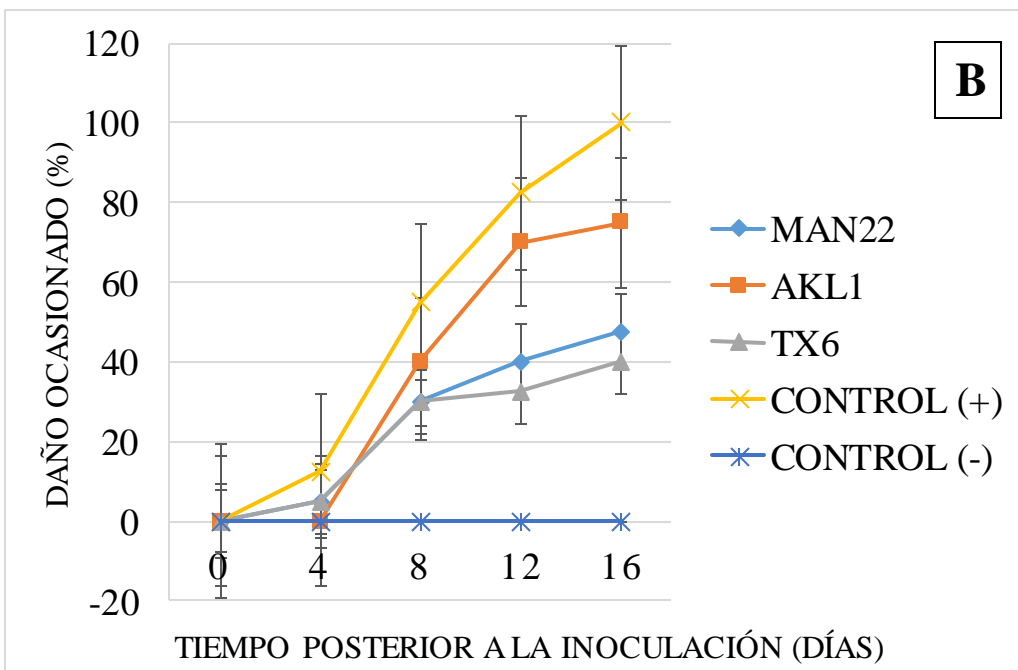
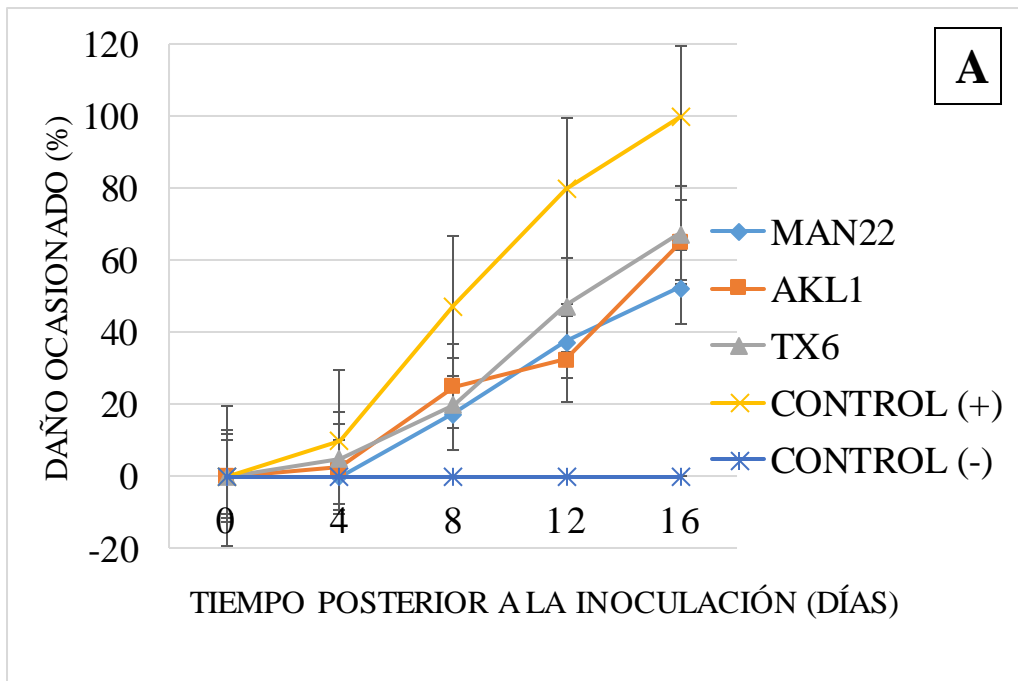




**Figura 19.** Ensayo de biocontrol de *Fusarium* spp. FCH8 y aislados bacterianos en plántulas de *C. chinense*. Control + (A), tratamiento MAN22 (B), tratamiento AKL1 (C) y tratamiento TX6 (D).



**Figura 20.** Tratamientos control (+/-) de *Fusarium* spp. FCH7 y FCH8 en plántulas de *C. chinense*., marchitamiento de plántulas inoculadas *Fusarium* sp. FCH8 con crecimiento fúngico en el sustrato (A), *Fusarium* sp. FCH7 (B) y plántulas control con solo inoculación de bacteria; AKL1 (C.1) TX6 (C.2) y MAN22 (C.3); y control sin inoculación de patógenos y bacteria (D).



**Figura 21.** Curvas del progreso de la enfermedad de la severidad por marchitez inducida por *Fusarium* sp. FCH7 (A) y *Fusarium* sp. FCH8 (B) en plantas de chile habanero inoculadas con los aislados bacterianos.

**Cuadro 6.** Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE), severidad y eficiencia del control de *Fusarium* spp. en *C. chinense*.

Tratamientos	<i>Fusarium</i> sp. FCH7			<i>Fusarium</i> sp. FCH8		
	ABCPE (% Unidad·día <sup>1</sup> )	Y <sub>final</sub> (%)	Efic. (%)	ABCPE (% Unidad·día <sup>1</sup> )	Y <sub>final</sub> (%)	Efic. (%)
MAN22	<b>325.0 b</b>	<b>52.5 b</b>	<b>47.5 a</b>	<b>395.0 b</b>	<b>47.5 b</b>	<b>52.5 a</b>
TX6	370.0 ab	65.0 ab	35.0 ab	590.0 ab	75.0 ab	25.0 ab
AKL1	425.0 ab	67.5 ab	32.50 ab	<b>350.0 b</b>	<b>40.0 b</b>	<b>60.0 a</b>
Testigo +	750.0 a	100.0 a	0.0 b	800.0 a	100.0 a	0.0 b
Testigo -	0.0 c	0.0 c	0.0 b	0.0 c	0.0 c	0.0 b

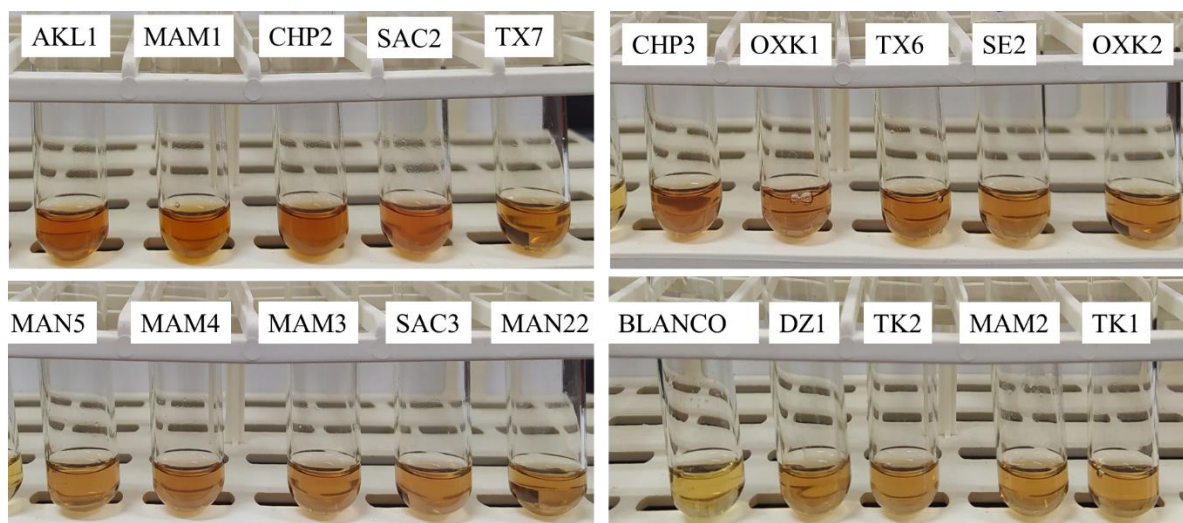
Medias con letras diferentes en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey  $P \leq 0.05$ ). Testigo + con presencia del patógeno; Testigo – sin patógenos ni bacterias.

## 6.5 Actividades bioquímicas relacionadas con la promoción del crecimiento vegetal

### 6.5.1 Producción de ácido indolacético (AIA)

En la producción de ácido indolacético (AIA) e indoles, los 19 aislados bacterianos produjeron AIA en un rango del 8.56 al 23.08 mg·L<sup>-1</sup>, siendo el aislado SAC2 con mayor producción y que fue igual a los aislados CHP3, SAC3, CHP2, con valores de 23.08, 19.97, 18.57 y 18.42 mg·L<sup>-1</sup>, respectivamente (Cuadro 7). Se pudo observar la reacción colorimétrica de Salkowski de los aislados con mayor producción de AIA posiblemente por la oxidación de compuestos indólicos (Figura 22). Sosa-Pech *et al.* (2019) con cepas de *Bacillus* spp. obtuvieron una concentración de AIA en un rango del 4.73 al 8.59 µg·mL<sup>-1</sup>, mientras que Mejía-Bautista *et al.* (2022) con cepas *Bacillus subtilis* CBMT2 y *Bacillus cereus* BL18 obtuvieron una mayor producción con 5.45 y 4.37 µg mL<sup>-1</sup> respectivamente, en ambos estudios se realizaron para promover el crecimiento en plántulas de chile habanero (*C. chinense*), datos que son inferiores a los reportados en este estudio. Por su parte Ratnaningsih *et al.* (2023) con una cepa de *Bacillus* sp. NCTB5I obtuvieron una concentración de 36.93 mg·L<sup>-1</sup>, valores que fueron superiores a los de este estudio. La producción de AIA es un indicador potencial de las rizobacterias al estimular el desarrollo del sistema radicular de las plantas, promoviendo el crecimiento y desarrollo de las plantas; sin embargo, la concentración del AIA dependerá de la especie bacteriana, los genes implicados que moderan o regulan las rutas biosintéticas y las

enzimas para convertir el AIA en sus formas conjugadas (Patten y Glick, 1996; Patten y Glick, 2002; Batista *et al.*, 2021).



**Figura 22.** Determinación de AIA e índoles de los 19 aislados bacterianos mediante la reacción Salkowski.

### 6.5.2 Solubilización de fosfatos insolubles de calcio

De los 19 aislados bacterianos probados en medio sólido para la solubilización de fosfatos de calcio con el método cualitativo, solamente el aislado SAC2 generó halo de solubilización, dicha expresión de actividad se visualizó a los siete días de crecimiento bacteriano (Figura 23). Este mecanismo ha sido estudiado y determinado por otros autores como Almoneafy *et al.*, (2012). Sin embargo, Beltrán-Pineda (2014) al evaluar cualitativamente, obtuvo 14 cepas de 21 con capacidad de solubilizar fosfato. Así mismo, Mejía-Bautista *et al.* (2022), determinaron cualitativamente la solubilización de fósforo por acción de 11 aislados bacterianos. Para el método cuantitativo, para poder estimar la solubilización de fósforo soluble, para este método de cuantificación solamente se realizaron para los cinco aislados que generaron mayor Índice de Calidad de Dickson (ICD) en plántulas de chile habanero y una que solubilizó fosfato en medio sólido, que fueron la MAN22, TX6, AKL1, CHP3, DZ1 y SAC2. Las seis bacterias solubilizaron el fósforo en un rango de concentración de 2.08 a 14.01 mg·L<sup>-1</sup>, además que los aislados lograron disminuir el pH del medio de cultivo con valores de 6.42 a 5.55 (Cuadro 7). Los exudados extracelulares de enzimas a través de raíces o microorganismos asociados a la rizosfera, es un mecanismo que contribuye a la disponibilidad



de P. La disminución de pH es mecanismo en la solubilización de compuestos fosfatados producido por la liberación de ácidos orgánicos, cuyas propiedades quelantes favorecen la formación de complejos insolubles con metales, consecuentemente produciendo la liberación de P (Beltrán, 2015; Elhaissof *et al.*, 2022). Bahadir *et al.* (2018) reportó 51 cepas de *Bacillus* spp. con capacidad solubilizadora de fosfato con la producción de ácidos orgánicos como: ácido acético, ácido propiónico, ácido isobutírico, ácido isocaproico, ácido caproico y ácido heptanoico, como posibles ácidos quelantes del fósforo. Por su parte, Mejía-Bautista *et al.* (2021), lograron determinar de forma cuantitativa la solubilización de fósforo de 13.01 a 55.82 mg·L<sup>-1</sup>, valores superiores a los reportados en este estudio. De igual forma mencionan que existe una diversidad de microorganismos solubilizadores de fosfato aislados en distintos tipos de suelo y que pueden ser aplicados a varios tipos de cultivos de interés agrícola, como el chile habanero.

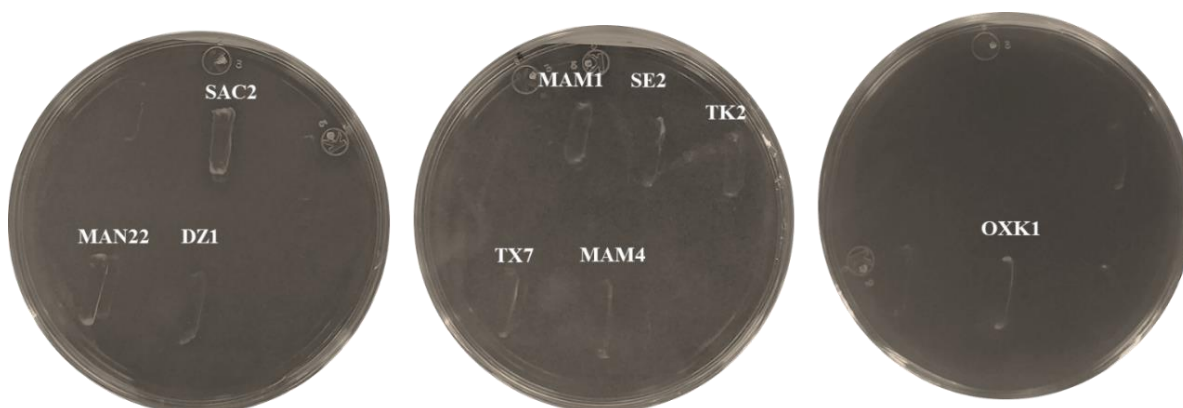


**Figura 23.** Solubilización de fosfato de calcio de los aislados en medio NBRIP-BPB

### 6.5.3 Producción de la enzima 1-aminociclopropano 1-carboxilato de desaminasa (ACC-desaminasa)

En el estudio en la producción de la enzima ACC-desaminasa, se obtuvieron que nueve de los 19 aislados tienen la capacidad de producir la enzima (Cuadro 7). De los aislados que tuvieron la capacidad de crecer en el medio de cultivo se puede observar diferentes intensidades en el crecimiento teniendo a los aislados SAC2 y MAN22 con un ligero mayor crecimiento, seguido de los aislados MAM1, DZ1, OXK1, SE2, MAM4, TK2 y TX7 (Figura 24). El mayor o menor crecimiento de las colonias en el medio (DF), pueda deberse a la expresión del gen *acdS*, el

cual codifica la síntesis de ACC desaminasa (Esquivel *et al.*, 2013). Esta actividad también fue detectada en el estudio realizado por Mejía-Bautista *et al.* (2022), en donde sus aislados de *Bacillus* spp. tuvieron diferentes intensidades en su crecimiento en el medio de cultivo. La actividad ACC-desaminasa es considerada un mecanismo directo de crecimiento vegetal, a través de la producción de  $\alpha$ -cetobutirato y amoníaco, que al disminuir los niveles de ACC-desaminasa, previene aumentos excesivos en la síntesis de etileno bajo diversas condiciones de estrés (Glick, 2012; Orozco-Mosqueda *et al.*, 2020). En estudios realizados con cepas de *Bacillus* spp. con actividad enzimática de ACC-desaminasa, demuestran la capacidad de promover el crecimiento en cultivos de *Zea mays*, *C. annuum* L. y *C. chinense* (Wang *et al.*, 2018; Misra y Chauhan, 2020; Mejía-Bautista *et al.*, 2022).

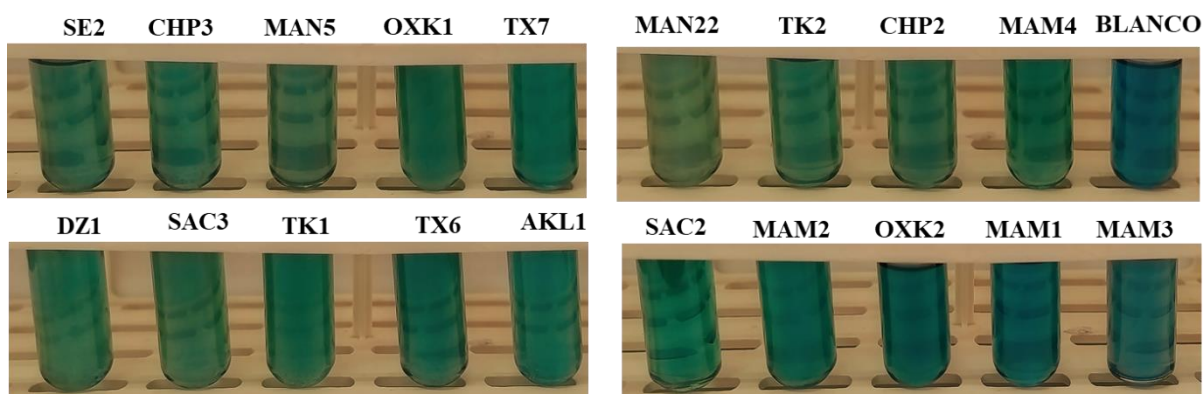


**Figura 24.** Producción de la enzima 1-aminociclopropano 1-carboxilato de desaminasa (ACC-desaminasa).

#### 6.5.4. Producción de sideróforos

La producción de sideróforos, fue determinada en todos los aislados en diferentes intensidades de decoloración y crecimiento en el medio adicionado con el reactivo CAS (Cuadro 7). Los aislados que demostraron mayor cambio en la decoloración del medio por la posible producción de sideróforos se encuentra el aislado MAN22 con mayor decoloración; seguida con una intensidad media con SE2, CHP3, MAN5, DZ1, SAC3, TK2, CHP2, MAM4 y SAC2; y con intensidad baja con la TK1, TX6, AKL1, OXK1 y TX7 (Figura 25). Estudios realizados por Sultana *et al.* (2021) con una cepa de *Bacillus aryabhatai* MS3, lograron identificar una mayor producción de sideróforos en condiciones limitadas de hierro, incluso bajo estrés salino;

en este mismo estudio lograron identificar la expresión del *gen entD*, que es el que participa directamente en la biosíntesis de sideróforos. Algunos autores determinan que la producción de sideróforos en algunas especies de bacterias, pueden generar promoción del crecimiento en las plantas y al mismo tiempo aumentar la producción de las enzimas que están relacionadas con la defensa vegetal. Además, limitan el crecimiento de patógenos en las plantas y debido a la captación del hierro (por acción de los sideróforos), elemento primordial para el crecimiento de los patógenos (Grobekak *et al.*, 2015; Kashyap *et al.*, 2021). En este contexto Ghazy y El-Nahrawy (2021), con una cepa de *B. subtilis* MF497446, determinaron la producción de sideróforos en las bacterias, y que estas incidieron en parámetros de crecimiento y un aumento en el rendimiento del cultivo de *Zea mays*, logrando de igual forma la reducción de la infección *in vitro* e *in vivo* de *Cephalosporium maydis*. Por su parte Wang *et al.* (2022), al estudiar la cepa de *Bacillus* sp. AS19 identificaron actividad siderófila al promover el crecimiento y alargamiento de raíces en *Gynura divaricata* (Linn.).



**Figura 25.** Producción de sideróforos de los aislados en medio CAS. Una decoloración más pronunciada se relaciona con una mayor presencia de sideróforos.

**Cuadro 7.** Propiedades bioquímicas de los aislados relacionadas con la promoción del crecimiento vegetal.

<b>Aislado</b>	<b>AIA mg·L<sup>-1</sup></b>	<b>SF</b>	<b>P mg·L<sup>-1</sup></b>	<b>pH</b>	<b>ACC-Desaminasa</b>	<b>SI</b>
SAC2	<b>23.08 A</b>	+	<b>13.08 A</b>	5.55	+++	++
CHP3	19.97 AB	-	2.08 D	6.42	-	++
SAC3	18.57 ABC	-	ND	ND	-	++
CHP2	18.42 ABC	-	ND	ND	-	++
OXK2	15.46 BCD	-	ND	ND	-	-
MAM1	15.25 BCD	-	ND	ND	++	-
DZ1	14.97 BCD	-	5.26 C	6.24	++	++
AKL1	13.52 CDE	-	4.87 C	6.33	-	+
MAM2	12.79 CDE	-	ND	ND	-	-
TX6	12.60 CDE	-	11.16 B	5.82	-	+
MAN22	12.51 CDE	-	<b>14.01 A</b>	<b>5.64</b>	+++	+++
SE2	11.74 DE	-	ND	ND	+	++
MAN5	11.36 DE	-	ND	ND	-	++
MAM4	11.26 DE	-	ND	ND	+	++
MAM3	11.01 DE	-	ND	ND	-	-
TK1	10.29 DE	-	ND	ND	-	+
TK2	10.01 DE	-	ND	ND	+	++
OXK1	9.68 DE	-	ND	ND	++	+
TX7	8.56 E	-	ND	ND	+	+

+ = Actividad o crecimiento. Intensidad de crecimiento: + menor crecimiento; +++ Mayor crecimiento; - = Sin crecimiento. AIA= ácido indol acético; SF= Solubilización de fosfato; P = Fósforo; ACC-desaminasa = 1-aminociclopropano 1-carboxilato de desaminasa y SI= Sideróforos. ND = No determinado. Medias con letras diferentes en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

### 6.6 Efecto de los aislados en la promoción de crecimiento en plántulas de *C. chinense*

Los análisis de varianza para la promoción de crecimiento de plántulas de chile habanero (*C. chinense*) a los 30 días después de la siembra, mostraron respuestas significativas ( $P \leq 0.05$ ) en las variables evaluadas (Cuadro 8 y 9).

**Altura.** Para esta variable se obtuvo que 12 aislados tuvieron efecto superior al control con un incremento del 48.76 al 127.33%, destacando el aislado MAN22 que fue superior al control, con el valor más alto en incremento, pero estadísticamente igual a los aislados TX6, DZ1, CHP3, AKL1, SAC2 y OXK1.

**Diámetro del tallo.** Para esta variable se tuvo que 10 aislados tuvieron efecto superior al control con incrementos del 31.72 al 136.54%; sin embargo, se destaca el aislado MAN22, que fue superior al resto de los aislados y al control, con un incremento 136.54%.

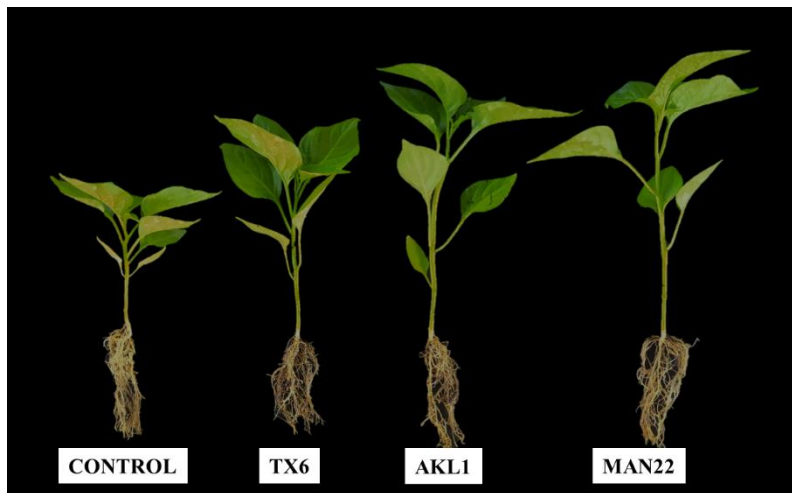
**Número de hojas.** En esta variable se obtuvo que 10 de los aislados fueron superior al control con un incremento del 12.76 al 28.23%, sin embargo, se destacan los aislados TX6, AKL1 y MAN22 que fueron superiores al control con 27.07, 27.65 y 28.23%, respectivamente.

**Longitud y volumen radicular.** Para la variable de longitud de radicular, se tuvo que seis aislados fueron superiores al control con incrementos del 14.34 al 40.19%, sin embargo, se destaca al aislado SAC3 es superior al control con el mayor incremento en la longitud radicular. Para el caso del volumen radicular se obtuvo que los aislados TX6, OXK2, SAC2, MAN22 y AKL1 tuvieron efecto superior al control, con incremento en el volumen radicular del 86.04, 90.64, 109.30, 109.30 y 123.25%, respectivamente.

**Peso fresco y seco total.** Para la variable de peso fresco total, se obtuvieron 10 aislados con efecto superior al control con incrementos del 48.36 al 164.75%, Sin embargo, el aislado AKL1 fue superior al control, con valores similares a los aislados TX6, MAM2, DZ1 y SAC2 con valores de 131.96, 132.78, 138.96, 142.62 y 164.75%, respecto al control. Para el peso seco total, se tuvo que 13 aislados fueron superiores al control con incrementos del 53.33 al 300%, destacando el aislado MAN22 con mejor efecto sobre los demás aislados y el control, con el valor más alto registrado.

**Índice de calidad de Dickson (ICD).** Para la variable de ICD se obtuvieron seis aislados con mejores índices de calidad con incrementos de 180 a 420%, respecto al control (Cuadro 8). Sin embargo, los aislados AKL1, TX6 y MAN22, obtuvieron los valores numéricos más altos respecto al mayor índice de calidad Dickson (Figura 26). Con este parámetro de ICD, se puede determinar los aislados que mejor promovieron el crecimiento, indicando que a través de este

parámetro se pueden obtener plántulas con mejor calidad. El efecto de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal en chile habanero ha sido reportado por diversos autores. Adame-García *et al.* (2021), con la inoculación de bacterias del género *Bacillus* spp. en plántulas de chile habanero encontraron efectos en la altura con un registro mayor de 8.6 cm y 0.0414 g de peso seco, los cuales son inferiores a los obtenidos en este estudio. De igual forma Sosa-Pech *et al.* (2019) con la cepa de *Bacillus* sp. CBCC57. en plántulas de chile habanero obtuvieron incrementos en las variables de altura, diámetro del tallo y biomasa seca con valores de 3.66 cm, 1.85 mm y 56.14 mg respecto a su control, siendo datos inferiores a este estudio, de igual forma reportaron con esta cepa plántulas con 0.55 de índice de calidad Dickson. Mientras que Shin *et al.* (2021) con la inoculación de *Bacillus velezensis* BS1 en *C. anuum* obtuvieron un incremento en la altura del 41.28%. Hernández-Huerta *et al.* (2023) con cepas de *Bacillus* spp. en la promoción de crecimiento de *C. anuum* obtuvieron un rango de índice de calidad de Dickson del 0.018 a 0.040 datos inferiores a este estudio. El crecimiento y desarrollo de las plantas con la inoculación de bacterias se debe principalmente a la producción de fitohormonas como el ácido indolacético y a solubilización de minerales como el fósforo (López-Bucio *et al.*, 2013, Luna-Fletes *et al.*, 2021), propiedades que se han sido producidas por las bacterias en este estudio.



**Figura 26.** Aislados con mayor índice de calidad Dickson en plántulas de *C. chinense*

**Cuadro 8.** Efecto de los 19 aislados bacterianos en la promoción de crecimiento de plantas de *C. chinense* Jacq. a 30 días después de la germinación.

<b>Aislado</b>	<b>ALT (cm)</b>	<b>DT (mm)</b>	<b>NH</b>	<b>LR (cm)</b>
MAN22	<b>9.23±1.10 a</b>	<b>5.89±0.07 a</b>	<b>6.63±0.12 a</b>	8.13±0.15 cd
TX6	8.45±0.64 ab	4.84±0.13 b	<b>6.57±0.15 a</b>	7.68±0.08 defg
DZ1	8.38±0.58 abc	5.11±0.44 b	6.03±0.32 ab	9.29±0.43 ab
CHP3	8.32±0.18 abc	4.84±0.10 b	5.87±0.06 b	9.47±0.36 ab
AKL1	7.78±1.53 abcd	4.89±0.64 b	<b>6.60±0.20 a</b>	8.05±0.37 cde
SAC2	7.53±0.78 abcde	4.80±0.15 b	6.20±0.20 ab	7.61±0.10 defgh
OXK1	7.38± 0.66 abcde	3.28±0.24 cd	5.93±0.32 b	7.75±0.17 defg
OXK2	7.30±0.64 bcde	3.71±0.08 c	6.10±0.56 ab	7.77±0.14 cdefg
SAC3	7.18±0.62 bcde	3.80±0.16 c	5.63±0.21 bc	<b>9.87±0.58 a</b>
MAM4	6.65±0.03 bcde	2.76±0.08 de	5.87±0.10 b	6.10±0.19 i
TX7	6.55±1.07 cde	3.23±0.32 cde	5.83±0.15 b	7.79±0.48 cdef
TK1	6.04±0.64 de	2.66±0.05 de	5.67±0.03 bc	8.67±0.36 bc
MAM2	5.69±0.25 ef	3.62±0.15 c	5.70±0.17 bc	7.65±0.46 defg
SE2	4.02±0.24 fg	1.11±0.09 f	4.15±0.15 d	7.13±0.31 fgh
MAM1	3.89±0.25 fg	1.24±0.39 f	4.00±0.10 d	7.20±0.08 efgh
TK2	3.86±0.34 fg	0.85±0.19 f	3.97±0.06 d	7.43±0.36 defgh
CHP2	3.78±0.17 g	0.95±0.04 f	4.13±0.08d	6.72±0.07 hi
MAM3	3.70±0.15 g	1.39±0.30 f	4.20±0.09 d	6.87±0.12 ghi
MAN5	3.59±0.13 g	1.05±0.01 f	4.05±0.10 d	7.15±0.08 efgh
CONTROL	4.06±0.36 fg	2.49±0.08 e	5.17±0.11 c	7.04±0.12 fgh
CV	9.73	7.74	3.68	3.78

ALT = altura de la planta; DT= diámetro del tallo; NH = número de hojas y LR = Longitud de la raíz. CV= Coeficiente de variación. Medias con letras diferentes en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey  $P \leq 0.05$ ).



**Cuadro 9.** Efecto de los 19 aislados bacterianos en la promoción de crecimiento de plantas de *C. chinense* Jacq. a 30 días después de la germinación.

<b>Aislado</b>	<b>VR (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>PFT (g)</b>	<b>PST (g)</b>	<b>ICD</b>
MAN22	<b>0.90±0.06 a</b>	2.93±0.03 ab	<b>0.60±0.02 a</b>	<b>0.26±0.02 a</b>
TX6	<b>0.80±0.03 a</b>	2.83±0.30 ab	0.52± 0.02 b	0.20±0.02 b
DZ1	0.50±0.07 b	2.91±0.09 ab	0.43±0.04 c	0.17±0.04 bc
CHP3	0.50±0.04 b	2.60±0.16 bc	0.40±0.04 c	0.14±0.02 cd
AKL1	<b>0.96±0.06 a</b>	<b>3.23±0.11 a</b>	0.52±0.01 b	0.20±0.02 b
SAC2	<b>0.90±0.06 a</b>	2.96±0.05 ab	0.50±0.03 b	0.19±0.04 b
OXK1	0.26±0.01 bcd	2.31±0.23 cd	0.43±0.02 c	0.12±0.00 de
OXK2	<b>0.82±0.06 a</b>	2.10±0.04 de	0.40± 0.02 c	0.12±0.01 de
SAC3	0.48±0.08 b	1.81±0.19 ef	0.29±0.02 d	0.09±0.00 ef
MAM4	0.46±0.05 b	1.47±0.06 fgh	0.25±0.01 d	0.06±0.00 fg
TX7	0.36±0.07 bcd	2.34±0.06 cd	0.41±0.02 c	0.13±0.01 cde
TK1	0.45±0.04 b	1.34±0.06 fgh	0.23±0.01 d	0.06±0.00 fg
MAM2	0.49±0.06 b	1.62±0.24 fg	0.25±0.03 d	0.09±0.01 ef
SE2	0.15±0.02 d	1.18±0.07 gh	0.07±0.00 f	0.01±0.00 h
MAM1	0.14±0.01 d	1.10±0.12 h	0.07±0.01 f	0.01±0.00 h
TK2	0.14±0.01 d	1.08±0.09 h	0.06±0.01 f	0.01±0.00 h
CHP2	0.17±0.03 d	1.10±0.11 h	0.06±0.01 f	0.01±0.00 h
MAM3	0.19±0.06 cd	1.03±0.04 h	0.08±0.03 f	0.02±0.01 gh
MAN5	0.14±0.01 d	1.15±0.08 gh	0.07±0.10 f	0.01±0.00 h
CONTROL	0.43±0.31 bc	1.22±0.06 gh	0.15±0.01 e	0.05±0.01 fgh
CV	17.31	8.06	6.45	15.69

VR= Volumen radicular; PFT= Peso fresco total; PST = Peso seco total y ICD = Índice de calidad de Dickson. CV= Coeficiente de variación. Medias con letras diferentes en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey P≤ 0.05).

### **6.7 Biofertilización con *Bacillus* spp. sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de fruto *C. chinense***

El análisis de varianza sobre el crecimiento y rendimiento de *C. chinense*, asociadas con la inoculación de los aislados MAN22, TX6 y AKL1, aislados que generaron mayor Índice de Calidad Dickson en las plántulas, generaron diferencias en las variables evaluadas (Cuadro 10 y 11).

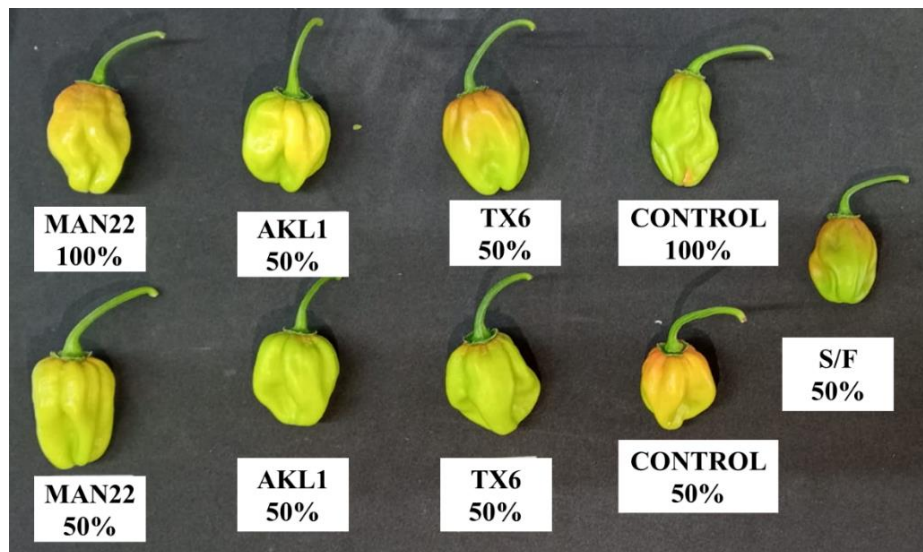
**Altura y diámetro de tallo.** Para estos parámetros de crecimiento, en la altura (AL) no hubo diferencia entre los tratamientos con la inoculación de los aislados e interacción con los niveles de fertilización y los controles con fertilización química. Sin embargo, se pudo observar que hubo diferencia con el control sin fertilización química con los aislados MAN22 y TX6 con niveles de fertilización del 50%, con incrementos del 25.77 y 21.53%, respectivamente. Para el diámetro del tallo (DT), el aislado MAN22 con la interacción de los niveles de fertilización de 100 y 50%, fueron superiores al control con el 100% de fertilización química, con incrementos de 32.23 y 27.13%, respectivamente (Cuadro 10).

Estudios con el uso de bacterias en la promoción de crecimiento vegetal han generado un mejor desarrollo en cultivos hortícolas. En cultivos como *Solanum lycopersicum* L. la inoculación con *Bacillus* sp. BEOO2 con nivel de fertilización del 50% reportaron resultados superiores al control sin fertilización, y sin diferencia con el control químico con 100% de fertilización, mismos resultados obtenidos en este estudio (Sánchez *et al.*, 2012). Por su parte, Mejía-Bautista *et al.* (2022), con la inoculación de cepas de *B. subtilis* CBMT2 en el cultivo de *C. chinense* indujo mayor altura y diámetro de tallo con valores e incrementos similares a los obtenidos en este estudio. En el estudio de Adame-García *et al.* (2021), empleando cepas de *B. simplex* JNV5 y *B. subtilis* JAG3 en la producción del cultivo de *C. chinense* obtuvo una altura máxima con 35.75 y 35.63 cm, datos inferiores a los resultados de este estudio. Se ha mostrado que la capacidad de especies de *Bacillus* de promover el crecimiento en *C. annuum* y *S. lycopersicum* L. (Luna-Martínez *et al.*, 2013; Garcia-Hernández *et al.*, 2018). Estos mecanismos de promoción de crecimiento y desarrollo vegetal en los cultivos hortícolas han sido demostrados con inoculación con cepas de *B. subtilis* que tienen la capacidad de la solubilización de fosfato y la producción de compuestos indólicos (Mejía-Bautista *et al.*,

2022), lo que de igual forma les proporciona tolerancia a los ambientes de estrés, como sequía y salinidad en las plantas (Shrivastava y Kumar, 2015).

**Rendimiento y Calidad de fruto.** Para la variable de rendimiento de *C. chinense* se observó que la interacción de la inoculación de los aislados MAN22 con un nivel de fertilización del 50 y 100% y AKL1 con 100%, se obtuvieron mejorías en comparación al control químico al 100% y control sin fertilización química, con los valores más altos en el número de frutos (NF) con 26.05, 27.50 y 30.12 frutos·planta<sup>-1</sup>, generando un aumento del 110.25, 114.11 y 138.85%, en relación al control químico al 100%, y de igual manera aumento del 80.27, 90.31 y 108.44% en relación al tratamiento S/FQ. Para el peso de frutos (PF) el aislado MAN22 con la interacción de un nivel de fertilización del 50 y 100%, fueron superiores al control químico al 100% de fertilización y al control S/FQ, generando de igual manera los valores más altos con 196.24 y 208.32 g·planta<sup>-1</sup>, generando un incremento del 121.91 y 135.57% en relación al control químico al 100% y con un incremento del 70.74 y 81.25% en relación al control S/FQ. En cuanto a las variables de calidad de fruto, se obtuvo que el aislado MAN22 con la interacción de la fertilización al 100% generó mayor calidad en comparación al control químico al 100% de fertilización y al control S/FQ; en donde el diámetro polar del fruto (DPF) y el diámetro ecuatorial de fruto (DEF) generaron los valores más altos con 39.77 y 35.98 mm, respectivamente. Estos valores representan incrementos de 6.19 y 8.14%, respectivamente en comparación al control químico al 100% de fertilización y de 11.96 y 11.15%, respectivamente comparado al tratamiento control S/FQ (Cuadro 11) (Figura 27). Estudio realizado por Gamboa-Angulo *et al.* (2020), en el cultivo de *C. annuum* con la inoculación de *B. subtilis* y *B. amiloliquefaciens* obtuvieron incrementos de 1.27 y 42.10%, respectivamente, datos muy por debajo de lo logrado en este estudio. Por su parte Mejía-Bautista *et al.* (2022), en su trabajo de investigación reportan una mejor eficiencia y rendimiento de los cultivos al realizar una fertilización química más la inoculación con una cepa de *B. subtilis* CBMT51 en *C. chinense*, logrando un incremento en el número frutos del 79.56% y con el peso fresco de frutos un incremento del 58.81%; mientras que García-Hernández *et al.* (2018) en relación a la calidad de frutos tuvo incrementos de 2.05 y 4.80% para DPF y DEF, respectivamente, datos inferiores a los de este estudio.

En otros trabajos de investigación realizados con el cultivo de *C. chinense* inoculados con cepas de *B. subtilis* JAG3 generaron un aumento del 193.18% en el peso fresco del fruto (Adame-García *et al.*, 2021). De igual manera con cepas de *B. licheniformis*, en el cultivo *C. annuum*, se ha visto la mejora en el crecimiento del cultivo y mejoras en parámetros de rendimiento, atribuyendo estas propiedades en el cultivo por la producción de metabolitos secundarios relacionados con mecanismos directos en la promoción del crecimiento de las plantas (Bolaños-Dircio *et al.*, 2021), como la producción de fitohormonas como el AIA, solubilización de fosfatos y el ACC-desaminasa, como mecanismos relacionados a las mejoras en los cultivos hortícolas (Mejía-Bautista *et al.*, 2022). Estos mecanismos reportados y que están relacionados con la promoción de crecimiento y mejora en la productividad de los cultivos hortícolas, podrían ser los mismos detectados en este estudio y que se reflejaron las mejoras en *C. chinense* Jacq.



**Figura 27.** Cosecha de *C. chinense* con inoculación de MAN22, AKL1, TX6 y CONTROL con dos nivelesde fertilización.

**Cuadro 10.** Efecto de los aislados en el crecimiento y desarrollo del cultivo de *C. chinense*

Jacq.

<b>Aislado- fertilización (%)</b>	<b>AL (cm)</b>	<b>DT (mm)</b>
MAN22 50%	<b>120.49 a</b>	<b>15.70 a</b>
TX6 50%	<b>116.43 a</b>	14.42 ab
MAN22 100%	115.70 ab	<b>16.33 a</b>
AKL1 50%	112.44 ab	14.28 ab
AKL1 100%	111.68 ab	14.80 ab
TX6 100%	101.70 ab	14.69 ab
CONTROL 100%	109.35 ab	12.35 b
CONTROL 50 %	104.73 ab	14.80 ab
S/FQ	95.80 b	14.82 ab

Al = altura; DT = diámetro de tallo y S/FQ = Sin fertilización química. Medias con letras diferentes en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\leq 0.05$ ).

**Cuadro 11.** Efecto de los aislados en el rendimiento y calidad de frutos en *C. chinense* Jacq.

<b>Aislado- fertilización (%)</b>	<b>NF</b>	<b>PF ( g·planta<sup>-1</sup>)</b>	<b>DPF (mm)</b>	<b>DEF (mm)</b>
AKL1 100 %	<b>30.12 a</b>	186.87 ab	34.07 d	30.35 d
MAN22 100 %	<b>27.50 a</b>	<b>208.32 a</b>	<b>39.77 a</b>	<b>35.98 a</b>
MAN22 50 %	<b>26.05 a</b>	<b>196.24 a</b>	37.98 abc	31.56 cd
TX6 50 %	24.17 ab	182.43 ab	36.38 cd	34.53 ab
AKL1 50 %	21.62 abc	154.18 abc	37.70 abc	32.82 bcd
TX6 100 %	19.20 abc	147.94 abc	39.39 ab	34.32 ab
CONTROL 50 %	13.40 bc	90.52 c	36.60 bcd	33.05 bc
CONTROL 100 %	12.61 c	88.43 c	37.45 abc	33.27 bc
S/F	14.45 bc	114.93 bc	35.52 cd	32.37 bcd

NF = número de frutos; PF = peso fresco de frutos; DPF = diámetro polar del fruto; DEF = diámetro ecuatorial del fruto. Medias con letras diferentes en cada columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\leq 0.05$ ).

## VII. CONCLUSIONES

Los aislados bacterianos en estudio presentaron propiedades antagónicas *in vitro* contra las dos cepas de *Fusarium* spp. y *Phytophthora* sp.

Las inoculaciones de los aislados bacterianos, redujeron la severidad de la enfermedad ocasionada por *Fusarium* spp., observando que la capacidad de biocontrol de la enfermedad está asociada con la especie bacteriana y la especie de fitopatógeno.

Los aislados presentaron propiedades bioquímicas relacionadas con las bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV), como la producción de AIA, solubilización de fosfatos, ACC-desaminasa y producción de sideróforos. En la evaluación de promoción de crecimiento en *C. chinense*, se tuvo mejora en las variables de crecimiento en el cultivo; generando plántulas de mayor calidad.

La incorporación de los aislados bacterianos con la interacción de la fertilización química pueden generar un mejor crecimiento y desarrollo de plantas de *C. chinense*. Las bacterias tienen un potencial para emplearse en el desarrollo biotecnológico de biofertilizantes, ya que favorecen el crecimiento, el desarrollo, la productividad y la sanidad del cultivo de chile habanero, así como la reducción de uso fertilizantes de síntesis química.

Los aislados bacterianos en estudio presentaron un efecto biocontrolador contra hongos fitopatógenos, pero existe una diversidad metabólica involucrada para el control biológico de fitopatógenos, a futuro es importante la detección de los genes por los cuales el antagonista ejerce su acción.

La inoculación de los aislados bacterianos en el cultivo de *C. chinense* generaron un efecto positivo para el control biológico, reduciendo las afectaciones por los hongos fitopatógenos y promoviendo el crecimiento vegetal, sin embargo, es necesario estudios de identificación molecular de los aislados y la detección del riesgo potencial con marcadores moleculares de virulencia, garantizando el uso de cepas bioseguras.

## VIII. REFERENCIAS

**Acosta T**, Avellaneda A, Cuervo J y Sánchez L. **2007**. Evaluación de microbiota de tomillo (*Thymus vulgaris*) como aporte al manejo agroecológico de aromáticas en invernaderos. Perspectivas del agronegocio de hierbas aromáticas culinarias y medicinales. Universidad Nacional de Colombia.

**Acuña J**, Jorquera M, Martínez O, Menezes-Blackburn D, Fernández M, Marschner P, Greiner R, and Mora M. Indole acetic acid and phytase activity produced by rhizosphere bacilli as affected by pH and metals. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **2011**, 11(3): 1-12. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162011000300001>

**Acurio Vásconez RD**, Mamarandi Mossot JD, Ojeda Shagñay AG, Tenorio Moya EM, Chiluisa-Utreras UV and Vaca Suquillo I. Evaluación de *Bacillus* spp. como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) en brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) y lechuga (*Lactuca sativa*). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, **2020**, 21(3): 1465. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol21\\_num3\\_art:1465](https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1465)

**Adame-García J.**, Murillo-Cuevas F. D. Flores-de la Rosa F. R., Velázquez-Mendoza V., López-Vázquez M., Cabrera-Mireles H. y Antonio-Vázquez E. Identificación molecular y evaluación de bacterias en el desarrollo vegetativo y producción de chile habanero. *Biotecnia*. **2021**, 23(3): 151-157. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i3.1480>

**Adesemoye AO**, Obini M and Ugoji EO. Comparison of plant growth-promotion with pseudomonas aeruginosa and *Bacillus subtilis* in three vegetables. *Brazilian Journal of Microbiology*. **2008**; 39:423-426. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822008000300003>.

**Aeron A**, Kumar S, Pandey P, and Maheshwari DK. Emerging Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agrobiolgy. En: Maheshwari, D. (eds) *Bacteria in Agrobiolgy: Crop Ecosystems*. **2011**; 1-36. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-18357-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18357-7_1)

**Aguado-Santacruz GA**, Moreno-Gómez B, Jiménez-Francisco B, García-Moya E, y Preciado-Ortiz RE. Impacto de los sideróforos microbianos y fitosidéforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis. *Revista fitotecnia mexicana*. 2012; 35(1), 9-21. <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.1.9>

**Aguirre-Medina** JF, Irizar-Garza MB, Durán-Prado A, Grageda-Cabrera OA, Peña-del Rio MA, Loredó-Ostí C y Gutiérrez Baeza. Los biofertilizantes microbianos: alternativa para la agricultura en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. **2009**; 5: 1-80

**Ahmed** E and Holmström JS. Siderophores in environmental research: roles and applications. *Microbial Biotechnology*. **2014**; 7(3): 196-208. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12117>

**Akgül** D. S. and Mirik M. Biocontrol of *Phytophthora capsici* on pepper plants by *Bacillus megaterium* strains. *Journal of Plant Pathology*. **2008**, 90: 29-34. <https://doi.org/10.4454/jpp.v90i1.588>

**Alcántara-Cortes** JS, Acero-Godoy J, Alcántara-Cortés JD and Sánchez-Mora RM. Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*. **2019**; 17(32): 109-129.

**Alexander** DB, Zuberer DA. Use of chrome azurol S reagents to evaluate siderophore production by rhizosphere bacteria. *Biology and Fertility of Soils*. **1991**; 12: 39–45. <https://doi.org/10.1007/BF00369386>

**Alfiky** A, L'Haridon F, Abou-Mansour E and Weisskopf L. Biological Control and Microbial Ecology Disease Inhibiting Effect of Strain *Bacillus subtilis* EG21 and Its Metabolites Against Potato Pathogens *Phytophthora infestans* and *Rhizoctonia solani*. *Biological Control and Microbial Ecology*, **2022**, 112:2099-2109. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-21-0530-R>

**Almoneafy** A. A., Xie G. L., Tian W. X., Xu L. H., Zhang G. Q. and Ibrahim M.. Characterization and evaluation of *Bacillus* isolates for their potential plant growth and biocontrol activities against tomato bacterial wilt. *African Journal of Biotechnology*. **2012**, 11: 7193-7201. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2963>

**Andrade-Hoyos** P, Luna-Cruz A, Osorio-Hernández E, Molina-Gayosso E, Nadia Landero-Valenzuela N y Barrales-Cureño HJ. 2019. Antagonismo De *Trichoderma* spp. vs Hongos Asociados a La Marchitez De Chile. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, **2019**, 10 (6): 1259-1272. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1326>.



**Arbeláez-Torres** G. Algunos aspectos de los hongos del genero *Fusarium* y de la especie *Fusarium oxysporum*. *Agronomía Colombiana*. **2000**; 17:11-22.

**Bahadir** P. S., Liaqat F. and Eltem R. Plant growth promoting properties of phosphate solubilizing *Bacillus* species isolated from the Aegean Region of Turkey. *Turkish Journal of Botany*. **2018**, 2(5): 183-196. <https://doi.org/10.3906/bot-1706-51>

**Batista** BD, Dourado MN, Figueredo EF, Hortencio RO, Marques JPR, Piotto FA, Bonatelli ML, Settle ML, Azevedo JL and Quecine MC. The auxin-producing *Bacillus thuringiensis* RZ2MS9 promotes the growth and modifies the root architecture of tomato (*Solanum lycopersicum* cv. Micro-Tom). *Archives of Microbiology*, **2021**; 203: 3869–3882. doi: 10.1007/s00203-021-02361-z.

**Becerra** LK, y Horna MV. Aislamiento de microorganismos productores de biosurfactantes y lipasas a partir de efluentes residuales de camales y suelos contaminados con hidrocarburos. *Scientia Agropecuaria*, **2016**, 7(1): 23-31. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.03>

**Beltrán** Pineda M. E. La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*. **2015**, 15(1): 101–113. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol15\\_num1\\_art:401](https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:401)

**Beltrán-Pineda** M. E. Bacterias solubilizadoras de fosfato con potencial biofertilizante en suelos cultivados con papa (*Solanum tuberosum*). *Agronomía*. **2014**, 22(2): 7-20.

**Ben** Mussa AB, Elferjani HS, Haroun, FA and Abdelnabi FF. Determination of available nitrate, phosphate and sulfate in soil samples. *International Journal of PharmTech Research*. **2009**; 1(3): 598-604.

**Bolaños-Dircio** A. Toribio-Jiménez J., Rodríguez-Barrera M. A., Hernández-Flores G., Toledo-Hernández E., Palemón-Alberto F. y Romero-Ramírez Y. *Bacillus licheniformis* M2-7 improves growth, development and yield of *Capsicum annuum* L. *Agrociencia*. **2021**, 55: 227242. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2415>

**Borges-Gómez** L, Cervantes-Cárdenas L, Ruiz-Novelo J, Soria-Fregoso M, Reyes-Oregel y Villanueva-Couoh E. Capsaicinoides en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) bajo diferentes condiciones de humedad y nutrición. Terra Latinoamericana. **2010**; 28(1): 35-41.

**Brady** N. and Raymond W. The Nature and Properties of Soils. 13th Edition. Prentice Hall, New Jersey, USA. **2002**.

**Cárdenas-Rodríguez** J, Yáñez-Juárez MG, López-Orona CA, Ayala-Tafoya F, López-Urquidez GA y Romero-Gómez SJ. Especies de *Phytophthora* asociadas a agua de irrigación en el Valle de Culiacán. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. **2021**; 12(3): 9473-484. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i3.2619>

**Castañeda-Ramírez** C, Fuente-Salcido NM; Pacheco-Cano, RD; Ortiz-Rodríguez T y Barboza Corona JE. Potencial de los quito-oligosacáridos generados de quitina y quitosina. Acta Universitaria. **2011**; 21(3): 14-23. <https://doi.org/10.15174/au.2011.16>

**Cedrón** JC. La Capsaicina. Revista de Química PUCP. **2013** 27(1-2): 7-8.

**Cerón Rincón** LE y Aristizábal Gutiérrez FA. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. Revista Colombiana de Biotecnología. **2012**; 19 (1): 285-295.

**Chan-Chunab** N, Sauri-Duch E, Olivera Castillo L y Rivas Burgos, JI. Evaluación de la calidad en la industrialización del chile habanero (*Capsicum chinense*). Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha. **2011**; 12 (2): 222-226.

**Chang** WT, Chen ML and Wang SL. An antifungal chitinase produced by *Bacillus subtilis* using chitin waste as a carbón source. World Journal of Microbiology and Biotecnology, **2010**; 26: 945-950. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0244-7>

**Choi** KC, Young C., An SH, and Yook B. Effects of antagonistic bacteria and soil borne pathogenic fungi on growth of pasture plant seedlings. Korean Journal of Dairy Science. **1999**; 21:41-48. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13388>

**Colombo** C, Palumbo G, He J, Pinton R and Cesco S. Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes. Journal Soils Sediments. **2013**; 14(3), 538–548. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0814-z>

**Conte** SS and Walker EL. Transporters Contributing to Iron Trafficking in Plants. *Molecular Plant*. **2011**; 4(3): 464–476. <https://doi.org/10.1093/mp/ssr015>

**Cook**, RJ and Baker KF. The Nature and Practice of Biological Control of Plant Pathogens. St. Paul, Minnesota. The American Phytopathological Society. **1983**. 59(4): 499-450. <https://doi.org/10.1086/414138>

**Coop-Gamas** FY, Corona-Cruz AI, Rodríguez-Rivera R, Herrera-Rodríguez FJ. Conservación de la calidad poscosecha en Chile habanero (*Capsicum chinense* J.) mediante atmósferas modificadas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. **2011**; 12(1):80-86.

**Corrales** Ramírez LC, Arévalo Galvez ZY y Moreno Burbano, VE. Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal. *Revista NOVA*. **2014**; 12 (21): 67-79. ISSN: 1794-2470.

**Devi** NO, Tombisana Devi RK, Debbarma M, Hajong M and Thokchom S. Effect of endophytic *Bacillus* and arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) against *Fusarium* wilt of tomato caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 2022, 32:1. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00499-y>

**Di Rienzo** JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M y Robledo CW. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. **2008**.

**Dickson** A, Leaf AL and Hosner IE. Quality appraisal of white spruce and hite ine seedlings stock innurseries. *Forest Chronicle*. **1960**. 36: 10-13

**Dobrzyński** J, Jakubowska Z, Kulkova I, Kowalczyk P, Kramkowski K. Biocontrol of fungal phytopathogens by *Bacillus pumilus*. *Front Microbiol*. **2023** Jul 25(14): 1194606. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1194606>

DOF. Declaratoria General de Protección de la Denominación de Origen Chile Habanero de la Península de Yucatán. Secretaría de Gobernación. México, 31-05- 2010 [citado: 01-08-2024]; (Disponible en versión HTML) en internet: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5145315&fecha=04/06/2010#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5145315&fecha=04/06/2010#gsc.tab=0)

**Elhaissof** W, Ghoulam C, Barakat A, Zeroual Y, Bargaz A. Phosphate bacterial solubilization: A key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. *Journal of Advanced Research*. **2022** 38:13-28. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.08.014>

**Esquivel** R., Gavilanes M. and Cruz R. Importancia agrobiotecnológica de la enzima ACC desaminasa en rizobacterias, una revisión. *Revista Fitotecnia Mexicana*. **2013**, 36: 251-258. <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.3.251>

**Esquivel-Cote** R, Gavilanes-Ruiz, M, Cruz-Ortega R y Huante P. Importancia agrobiotecnológica de la enzima AC-desaminasa en rizobacterias, una revisión. *Revista Fitotecnia Mexicana*. **2013**; 36 (3): 251 – 258. ISSN 0187-7380.

**Ezziyyani**, M, Requena ME, Egea-Gilabert C and Candela ME. Biological Control of *Phytophthora* Root Rot of Pepper Using *Trichoderma harzianum* and *Streptomyces rochei* in Combination. *Journal of Phytopathology*. **2007**; 155 (6):342-349. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2007.01237.x>.

**Fang** S, Gao K, Hu W, Wang S, Chen B and Zhou, Z. Foliar and seed application of plant growth regulators affects cotton yield by altering leaf physiology and floral bud carbohydrate accumulation. *Field Crops Research*. **2019**; 231: 105-114.

**FAO**. Biopreparados para el manejo sostenible de plagas y enfermedades en la agricultura urbana y periurbana. [serie en internet] **2010** [consultado 2023 enero 28]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/as435s/as435s.pdf>

**Fernández-Herrera** E, Acosta-Ramos M, Ponce-González F y Manuel-Pinto V.. Manejo Biológico de *Phytophthora capsici* Leo., *Fusarium oxysporum* Schlechtend: Fr. y *Rhizoctonia solani* Kühn en Jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Revista Mexicana de Fitopatología*. **2007**; 25(1):35-42. ISSN 0185-3309.

**Fernández-Herrera** E, Guerrero-Ruiz JC, Rueda-Puente EO y Acosta-Ramos M. Patógenos y síntomas asociados a la marchitez del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en Texcoco, México. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*. **2013**; 15(3): 46-50.

**Gamboa-Angulo** J., Ruíz-Sánchez E., Alvarado-López C., Gutiérrez-Miceli F., Ruíz-Valdiviezo V. M. y Medina-Dzul K. Efecto de biofertilizantes microbianos en las características agronómicas de la planta y calidad del fruto del chile xcat'ik (*Capsicum annuum* L.). *Terra Latinoamericana*. **2020**, 38(4): 817-826. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.716>

**García-Hernández** J. L., Ruíz Alvarado M. C., Preciado Rangel P., Nieto-Garibay A., Murillo-Amador B., Ruiz-Espinoza F. H., Valdez Domínguez R. D. y Rueda Puente E. O. Growth and oil yield parameters of the *Capsicum annuum* var. aviculare associated to the beneficial bacterium *Bacillus amyloliquefaciens* and *Azospirillum halopraeferens* under field conditions. *Biotecnia*. **2018**, 20(2), 59-64. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v20i2.599>

**Ghazy** N and El-Nahrawy S. Siderophore production by *Bacillus subtilis* MF497446 and *Pseudomonas koreensis* MG209738 and their efficacy in controlling *Cephalosporium maydis* in maize plant. *Archives of Microbiology*. 2021; 203(3):1195-1209. doi: 10.1007/s00203-020-02113-5

**Glick** B, Penrose D and Li J. A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth promoting bacteria. *Journal of Theoretical Biology*. **1998**; 190(1): 63–68. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0532>

**Glick** BR. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*. **2014**; 169 (1): 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009>

**Glick** BR. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, **2012**; 2012: 963401. <http://dx.doi.org/10.6064/2012/963401>

**Glickmann** E, Dessaux Y. A critical examination of the specificity of the Salkowski reagent for indolic compounds produced by phytopathogenic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, **1995**, 61(2):793-6. <https://doi.org/10.1128/aem.61.2.793-796.1995>.

**González** Castro A., López Orona C. A., López Urquidez G. A., y Amarillas Bueno L. *Fusarium* spp. causando la enfermedad de marchitez vascular en cultivo de *Capsicum* spp. en Sinaloa, México. *Avances En investigación Agropecuaria*. **2023**, 27: 27-28. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.23.27.20>

**Goswami D**, Dhandhukia P, Patel P and Thakker JN. Screening of PGPR from saline desert of Kutch: Growth promotion in *Arachis hypogea* by *Bacillus licheniformis* A2. Microbiological Research. **2014**; 169: 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.07.004>

**Grobelak A**, Napora A and Kacprzak, M. Using plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to improve plant growth. Ecological Engineering. **2015**, 84: 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.019>

**Guillén-Cruz**, R., Hernández-Castillo, F.D., Gallegos-Morales, G., Rodríguez-Herrera, R., Aguilar-González, C.N., Padrón-Corral, E. y Reyes-Valdés, M.H. *Bacillus* spp. como biocontrol en un suelo infestado con *Fusarium* spp., *Rhizoctonia solani* Kühn y *Phytophthora capsici* Leonian y su efecto en el desarrollo y rendimiento del cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.). Revista Mexicana de Fitopatología. **2006**; 24(2): 105-114. ISSN: 0185-3309.

**Gupta S** and Pandey S. ACC Deaminase Producing Bacteria With Multifarious Plant Growth Promoting Traits Alleviates Salinity Stress in French Bean (*Phaseolus vulgaris*) Plants. Frontiers in Microbiology, **2019**, 10: 1506. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01506>

**Gutiérrez-Mañero FJ**, Ramos-Solano B, Probanza A, Mehouchi J, Tadeo FR and Talon M. The plant-growth-promoting rhizobacteria *Bacillus pumilus* and *Bacillus licheniformis* produce high amounts of physiologically active gibberellins. Physiologia Plantarum. **2001**; 111(2): 206–211. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2001.1110211.x>

**Haas D** and Défago G. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. Nature Reviews Microbiology. **2005**; 3, 307–319 <https://doi.org/10.1038/nrmicro1129>

**Hariprasad P**, Navya HM, Chandra nayaka, S and Niranjana SR. Advantage of using PSIRB over PSRB and IRB to improve plant health of tomato. Biological Control. **2009**; 50(3): 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.04.002>

**He Z.** and Zhang H. Applied anure and nu-trient chemistry for sustainable agriculture and environment. Springer, New York, USA. **2014**. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8807-6>

**Hernández-Castillo** F. D., Lira-Saldivar R. H., Gallegos-Morales G., Hernández-Suárez M., y Solis-Gaona S. Biocontrol de la marchitez del chile con tres especies de *Bacillus* y su efecto en el crecimiento y rendimiento. *Phyton* (Buenos Aires). **2014**, 83(1), 49-55.

**Hernández-Huerta** J., Tamez-Guerra P., Gomez-Flores R., Delgado-Gardea M. C. E., Robles-Hernández L., Gonzalez-Franco A.C., Infante-Ramirez R. Pepper growth promotion and biocontrol against *Xanthomonas euvesicatoria* by *Bacillus cereus* and *Bacillus thuringiensis* formulations. *PeerJ*. **2023**, 24(11): e14633. d <https://doi.org/10.7717/peerj.14633>

**Herrera-Parra** E, Bacab-Pérez IM, Cristóbal-Alejo J, Tun- Suárez JM, y Ruiz-Sánchez E. Patogenicidad de *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. y *Alternaria alternata* (Fries) Keissler en *Thevetia peruviana* (Pers.) K. Schum. y su control *in vitro*. *Fitosanidad*. **2011**, 15: 231-236.

**Holguín** G, Bashan Y, Puente E, Carrillo A, Bethlenfalvay G, Rojas A, Vázquez P, Toledo G, Bacilio JM, Glick BR., González de Bashan L, Lebsky V, Moreno M, y Hernández J. Promoción del crecimiento en plantas por bacterias de la rizosfera. *Agricultura Técnica en México*. **2003**; 29(2): 201-211. ISSN 0568-2517

**Hong** C, Richarson, PA and Kong P. Pathogenicity to ornamental plants of some existing species and new taxa of *Phyophthora* from irrigation water. *Plant Disease Journal*. **2008**; 92(8): 1201-1207. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-8-1201>.

**Hoyos-Carvajal** L, Duque G y Orduz S. Antagonismo *in vitro* de *Trichoderma* spp. sobre el aislamiento de *Sclerotinia* spp. y *Rhizoctonia* spp. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. **2008**; 2(1):76-86. <https://doi.org/10.17584/rcch.2008v2i1.1175>

**Hu** QP and Xu JG. A simple double-layered chrome azurol S agar (SD-CASA) plate assay to optimize the production of siderophores by a potential biocontrol agent *Bacillus*. *African Journal of Microbiology Research*, **2011**, 5: 4321-4327. DOI:10.5897/AJMR11.238

**Huertas** A, Espejo F and Rojas C. Estructura tridimensional de la Citoquinina N-Benzil 9 (2 Tetrahidropirany) adenine utilizando el método de resonancia magnética nuclear *Universitas Scientiarum*. **2004**; 9(1): 24-35. ISSN 0122-7483

**Iqbal** O., Syed R. N., Rajput N. A., Wang Y., Lodhi A. M., Khan R., Jibril S. M., Atiq M. and Li C. Antagonistic activity of two *Bacillus* strains against *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* (FOC-1) causing *Fusarium* wilt and growth promotion activity of chili plant. *Frontiers Microbiology*. **2024**, 15:1388439. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1388439>

**Juárez-Becerra** GP, Sosa-Morales ME y López-Malo A. Hongos fitopatógenos de alta importancia económica descripción y métodos de control. *Temas Selectos de Ingeniería de alimentos*. **2010**; 4(2):14-23.

**Judelson** HS and Ah-Fong AMV. Exchanges at the Plant-Oomycete Interface That Influence Disease. *Plant Physiol*. **2019**; 179(4):1198-1211. <https://doi.org/10.1104/pp.18.00979>

**Kang** DS, Min KJ, Kwakl AM, Lee SY and Kang HW. Defense response and suppression of *Phytophthora* blight disease of pepper by water extract from spent mushroom substrate of *Lentinula edodes*. *Journal of Plant Pathology*. **2017**; 33(3):264-275. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.02.2017.0030>

**Kashyap** AS, Manzar N, Rajawat MVS, Kesharwani AK, Singh RP, Dubey SC, Pattanayak D, Dhar S, Lal SK and Singh D. Screening and Biocontrol Potential of Rhizobacteria Native to Gangetic Plains and Hilly Regions to Induce Systemic Resistance and Promote Plant Growth in Chilli against Bacterial Wilt Disease. *Plants (Basel)*. **2021**; 10(10): 2125. doi: 10.3390/plants10102125.

**Khalil** MR, Fierro-Coronado RA, Peñuelas-Rubio O, Villa-Lerma AG, Plascencia-Jatomea R, Félix-Gastélum R and Maldonado-Mendoza IE. Rhizospheric bacteria as potential biocontrol agents against *Fusarium* wilt and crown and root rot diseases in tomato Saudi *Journal of Biological Sciences*, **2021**, 28: 7460–7471. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.043>

**Khan** N, Martínez-Hidalgo P, Ice TA, Maymon M, Humm EA, Nejat N, Sanders ER, Kaplan D and Hirsch AM. Antifungal Activity of *Bacillus* Species Against *Fusarium* and Analysis of the Potential Mechanisms Used in Biocontrol. *Frontiers in Microbiology*. **2018**, 9:2363. doi: 10.3389/fmicb.2018.02363



**Kim D**, Cook RJ and Weller DM. *Bacillus* sp. L324-92 for Biological Control of Three Root Diseases of Wheat Grown with Reduced Tillage. *Phytopathology*. **1997**; 87(5): 551-558. <https://doi.org/10.1094/PHTO.1997.87.5.551>

**Kim PI**, Ryu J, Kim YH, Chi YT. Production of Biosurfactant Lipopeptides Iturin A, Fengycin, and Surfactin A from *Bacillus subtilis* CMB32 for Control of *Colletotrichum gloeosporioides*. *Journal of Microbiology and Biotechnology*; **2010**, 20(1):138-45. doi: 10.4014/jmb.0905.05007

**Kloepper JW**, Schroth MN and Miller TD. Efectos of colonization by plant growth-promoting rhizobacteria on potato plant development and yield. *Ecology and Epidemiology*. **1989**; 70(11):1078-1082.

**Laborde JA** y Pozo O. Presente y pasado del Chile en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. México. **1984**.

**Lavenus J**, Goh T, Ianto Roberts I, Guyomarc'h S, Lucas M, De Smet I, Fukaki H, Beeckman T, Bennett M and Laplaze L. Lateral root development in Arabidopsis: fifty shades of auxin. *Trends in Plant Science*. **2013**; 18(8): 450-458. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.04.006>

**Leibfried A**, To JP, Busch W, Stehling S, Kehle A, Demar M, Kieber JJ, Lohmann JU. WUSCHEL controls meristem function by direct regulation of cytokinin-inducible response regulators. *Nature*. **2005**; 438(7071):1172-1175. <https://doi.org/10.1038/nature04270>

**Li Q**, Yan N, Miao X, Zhan Y and Chen C. The potential of novel bacterial isolates from healthy ginseng for the control of ginseng root rot disease (*Fusarium oxysporum*). *PLOS ONE*, **2022**, 17(11): e0277191. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277191>

**Li Y**, Feng X, Wang X, Zheng L and Liu H. Inhibitory effects of *Bacillus licheniformis* BL06 on *Phytophthora capsici* in pepper by multiple modes of action. *Biological Control*, **2020**, 144: 104210. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104210>

**Liu Z**, Li YC, Zhang S, Fu Y, Fan X, Patel JS and Zhang M. Characterization of phosphate-solubilizing bacteria isolated from calcareous soils. *Applied Soil Ecology*, **2015**, 96: 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.003>

**López-Arcos** M, Poot Matu JE y Mijangos Cortez MA. Respuesta del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) al suministro de abono orgánico en Tabasco, México. Revista Científica UDO Agrícola. **2012**. 12 (2): 307-312.

**López-Benítez**, A., Gayosso-Barragán, O., Ramírez-Meraz, M., Marroquín-Morales, J. A. y Vizcarra- López, M. Reaction of inbred lines of habanero hot pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) to inoculation of *Fusarium oxysporum*. *Agro Productividad*. **2022**, 15(9): 43-49. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i9.2081>

**López-Bucio** J., Cuevas J. C., Cantero E. V. Becerra, C. V., Rodríguez R. F. y Rodríguez L. I. 2013. *Bacillus megaterium* modifica la arquitectura de la raíz de *Arabidopsis* independientemente de auxinas y etileno. Revista Biológicas. **2013** 11: 1-8.

**López-Pérez** JP y Boronat-Gil R. Aspectos básicos de la fijación de nitrógeno atmosférico por parte de bacterias. Estudio en el laboratorio de educación secundaria. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias. **2016**; 13 (1): 203-209. [http://dx.doi.org/10.25267/Rev\\_Eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2016.v13.i1.15](http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2016.v13.i1.15)

**Loyd** AL, Benson DM and Ivors KL. *Phytophthora* populations in nursery irrigation water in relationship to pathogenicity and infection frequency of *Rhododendron* and *Pieris*. Plant Disease Journal. **2014**; 98(9):1213-1220. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-13-1157-RE>.

**Lumsden** RD, García ER, LewisJA and Frías TG. Supresión of damping off caused by *Pythium* spp., in soil from the indogenous Mexican chinampa agricultural system. Soil biology and biochemistry. **1987**; 19:501-508. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90091-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90091-5)

**Luna** Martínez L, Martínez Peniche RA, Hernández Iturriaga M, Arvizu Medrano SM y Pacheco Aguilar JR. Caracterización de rizobacterias aisladas de tomate y su efecto en el crecimiento de tomate y pimiento. Revista Fitotecnia Mexicana, **2013**, 36 (1): 63-69.

**Luna-Fletes** J. A., Cruz-Crespo E., Can-Chulim A., Chan-Cupul W., Luna-Esquivel G., García-Paredes, J. D. y Mancilla-Villa O. R. (2021). Producción de plántulas de chile habanero con fertilización orgánica y biológica. Terra Latinoamericana. **2021** 39: 1-13. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.988>

**Ma LJ**, Geiser DM, Proctor RH, Rooney AP, O'Donnell K, Trail F, Gardiner DM, Manners JM and Kazan K. *Fusarium* Pathogenomics. Annual Review of Microbiology. **2013**; 67:399-416. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-092412-155650>

**Martínez-Ruiz FE**, Cervantes-Díaz L, Aíl-Catzím CE, Hernández-Montiel LG, Sánchez CL y Rueda-Puente EO. Hongos Fitopatógenos Asociados Al Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) En La Zona Árida Del Noroeste De México: La Importancia De Su Diagnóstico. European Scientific Journal. **2016**; 12(18): 232-256. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n18p232>

**Mayer, AM**. Determinación de ácido indolacético por la reacción de Salkowsky. Naturaleza. **1958**. 162, 1670-1671.

**Mehta S** and Nautiyal CS. An efficient method for qualitative screening of phosphate-solubilizing bacteria. Current Microbiology. **2001**; 43(1): 51-56. <https://doi.org/10.1007/s002840010259>.

**Mejía-Bautista MA**, Cristóbal-Alejo J, Pacheco-Aguilar JR y Reyes-Ramírez A. *Bacillus* spp. en el Crecimiento y Rendimiento de *Capsicum chinense* Jacq. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. **2022**; 13(1): 115-126. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2664>

**Mejía-Bautista MA**, Reyes-Ramírez A, Cristobal-Alejo J, Tun-Suárez JM, Borges-Gómez LC y Pacheco-Aguilar JR. *Bacillus* spp. en el Control de la Marchitez Causada por *Fusarium* spp. en *Capsicum chinense*. Revista Mexicana de Fitopatología. **2016**; 34(3): 208-222. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1603-1>

**Mejía-Bautista, MA**, Cristóbal-Alejo J, Tun-Suárez, JM y Reyes-Ramírez, A. Actividad *in vitro* de *Bacillus* spp. en la inhibición de crecimiento micelial de *Fusarium equiseti* y *Fusarium solani* aislado de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Agrociencia. **2016**; 50(8): 1123-1135. ISSN: 2521-9766.

**Mendoza ZC**. **1996**. Enfermedades fungosas de hortalizas. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 85 p.

**Misra S** and Chauhan PS. ACC deaminase-producing rhizosphere competent *Bacillus* spp. mitigate salt stress and promote *Zea mays* growth by modulating ethylene metabolism. 3 Biotech, **2020**; 10(3):119. doi: 10.1007/s13205-020-2104-y

**Mixquitilla-Casbis G** y Villegas-Torres OG. Importancia de los fosfatos y fosfitos en la nutrición de cultivos. Acta agrícola y pecuaria. **2016**; 2(3): 55-61.

**Montoya-Martínez AC**, Figueroa-Brambila KM, Escalante-Beltrán A, López-Montoya ND, Valenzuela-Ruíz V, Parra-Cota; FI, Estrada Alvarado MI and De los Santos-Villalobos S. Biological Control Mechanisms of *Bacillus cabrialesii* subsp. tritici TSO2T against *Fusarium languescens*, the Causal Agent of Wilt in Jalapeño Peppers. Horticulturae. **2023**, 9: 964. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9090964>

**Morán-Bañuelos**, Sara H., Aguilar-Rincón, Víctor H., Corona-Torres, Tarsicio y Zavaleta-Mejía, Emma. (2010). Resistencia a *Phytophthora capsici* Leo. de chiles nativos del sur de Puebla, México. Revista fitotecnia mexicana. **2010**, 33: 21-26.

**Oberson A**, Frossard E, Bühlmann C, Mayer J, Mäder P and Lüscher A. Nitrogen fixation and transfer in grass-clover leys under organic and conventional cropping systems. Plant Soil. **2013**; 371: 237–255. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1666-4>

**Orozco-Mosqueda MC**, Glick BR and Santoyo G. ACC deaminase in plant growth-promoting bacteria (PGPB): An efficient mechanism to counter salt stress in crops. Microbiological Research, **2020**; 235: 126439. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126439>

**Patten C.** and Glick B. R. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. Applied and Environmental Microbiology. **2002**, 68: 3795–3801. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002>

**Patten CL** and Glick BR. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. Canadian Journal of Microbiology. **1996**; 42:207–220. doi: 10.1139/m96-032

**Pedraza LA**, López CA y Uribe-Vélez D. Mecanismos de acción de *Bacillus* spp. (Bacillaceae) contra microorganismos fitopatógenos durante su interacción con plantas. Acta Biologica Colombiana, **2020**; 25(1): 112-125. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n1.75045>

**Penrose DM** and Glick BR. Methods for isolating and characterizing ACC deaminase containing plant growth-promoting rhizobacteria. *Physiologia Plantarum*, 2003; 18: 10-15. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00086.x>

**Persello-Cartieaux F**, David P, Sarrobert C, Thibaud MC, Achouak W, Robaglia C, Nussaume L. Utilization of mutants to analyze the interaction between *Arabidopsis thaliana* and its naturally root-associated *Pseudomonas*. *Planta*. **2001**; 212(2): 190-198. doi: <https://doi.org/10.1007/s004250000384>

Pino Binimelis AI., Albarracín L, Parra N, Toledo JR, Villena J, y Quilodrán-Vega SR. (2023). Evaluación de la Sinergia de la Actividad Antimicrobiana de Cepas de Bacterias Lácticas Contra Patógenos. *Ciencia Veterinaria*. 2023. 25(1): 1–22. <https://doi.org/10.19137/cienvet202325101>

**Pizarro S**, Ronco AM y Gotteland M.  $\beta$ -glucanos: ¿qué tipos existen y adecuados son sus beneficios en la salud?  $\beta$ -glucanos: ¿qué tipos existen y cuáles son sus beneficios para la salud?. *Revista chilena de nutrición*. 2014; 41 (4), 439-446. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182014000400014>

**Pradhan N.** and Sukla LB. Solubilization of inorganic phosphates by fungi isolated from agriculture soil. *African Journal Biotechnology*. **2005**; 5(10): 850-854. <https://doi.org/10.5897/AJB2006.000-5050>

**Qureshi MA**, Ahmad ZA, Akhtar N, Iqbal A, Mujeeb F and Shakir, MA. Role of phosphate solubilizing bacteria (PSB) in enhancing P availability and promoting cotton growth. *The Journal Animal Plant Science*. **2012**; 22(1): 204-210. ISSN: 1018-7081.

**Radzki W**, Gutierrez Mañero FJ, Algar E, Lucas García JA, García-Villaraco A and Ramos Solano B. Bacterial siderophores efficiently provide iron to iron-starved tomato plants in hydroponics culture. *Antonie Van Leeuwenhoek*. **2013**; 104(3): 321-330. <https://doi.org/10.1007/s10482-013-9954-9>

**Ratnaningsih HR**, Noviana Z, Dewi TK, Loekito S, Wiyono S, Gafur A and Antonius S. IAA and ACC deaminase producing-bacteria isolated from the rhizosphere of pineapple

plants grown under different abiotic and biotic stresses. *Heliyon*. **2023**; 9(6): e16306.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16306>

**Rivera-Jiménez** MN. Marchitez del chile poblano (*Capsicum annuum* L.): identificación molecular del agente causal, detección en semillas, histopatología y alternativas de control. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México. **2009**.  
[http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/1302/Rivera\\_Jimenez\\_MN\\_DC\\_Produccion\\_Semillas\\_2009.pdf?sequence=1](http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/1302/Rivera_Jimenez_MN_DC_Produccion_Semillas_2009.pdf?sequence=1)

**Robles-Yerena** L, Santos Gerardo Leyva-Mir SG, Armando Cruz-Gómez A, Camacho-Tapia M, Nieto-Ángel D y Tovar-Pedraza JM. *Fusarium oxysporum* Schldl. y *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. causantes de la marchitez de plántulas de *Pinus* spp. en vivero Revista Mexicana de Ciencias Forestales. **2016**; 7(36): 25-36. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i36.57>

**Rodríguez-Guzmán** MP. Biodiversidad de los hongos fitopatógenos del suelo de México. Acta Zoológica Mexicana. **2001**; 1: 53-78.

**Ross** JJ, Symons GM, Abas L, Reid JB, and Luschnig C. Hormone distribution and transport. Plant hormone signalling. **2018**; 24: 257-291.  
<https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0250>

**Royse** DJ and Ries SM. The influence of fungi isolated from peach twigs on the pathogenicity of *Cytospora cincta*. *Phytopathology*. **1978**; 68(2): 603-607. <https://doi.org/10.1094/Phyto-68-603>

**Rubio-Tinajero** S, Osorio-Hernández E, Estrada-Drouaillet B, Silva-Espinosa, JH Tomás, Rodríguez-Mejía, ML y Nava-Juárez RA. *In vitro* antagonist biocontrol of *Fusarium oxysporum* and *Dickeya chrysanthemi*. *Revista mexicana de fitopatología*, 2021, 39(3): 515-528. Epub 13 de diciembre de 2021. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2104-1>

**Sadfi** N, Chérif M, Fliss I, Boudabbous A and Antoun H. Evaluation of bacterial isolates from salty soils and *Bacillus thuringiensis* strains for the biocontrol of *Fusarium* dry rot of potato tubers. *Journal of Plant Pathology*. **2001**; 83 (2): 101-108.

**Salazar-Henao** JE, Vélez-Bermúdez IC and Schmidt W. The regulation and plasticity of root hair patterning and morphogenesis. *Development*. **2016**; 143(11): 1848-58. <https://doi.org/10.1242/dev.132845>

**Samaniego** JA, Ulloa M y Herrera T. Hongos del suelo antagonistas de *Phymatotrichum omnivorum*. *Revista Mexicana de Fitopatología*. **1989**; 7(1): 86-95. ISSN 0185-3309

**Sánchez** López D. B., Gómez-Vargas R. M., Garrido Rubiano M. F. y Bonilla Buitrago R. R. Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. **2012**, 3(7): 1401-1415.

**Sánchez-Carrillo** R y Guerra-Ramírez P. *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. **2022**; 13 (4): 715-725. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i4.2799>

**Santi** C, Bogusz D and Franche C. Biological nitrogen fixation in non-legume plants. *Annals of Botany*. **2013**; 111(5): 743–767. <https://doi.org/10.1093/aob/mct048>

**Sarti** GC. Metabolitos con actividad antifúngica producidos por el Género *Bacillus*. *Terra Mundus*. 2019; 5(1), 40-51.

**Sayed**, R. Z., Badgajar, M. D., Sonawane, H. M., Mhaske, M. M. and Chincholkar, S. B. Production of microbial iron chelators (Siderophores) by *Pseudomonas fluorescent*. *Indian Journal of Biotechnology*. **2005**; 4: 484-490.

**Schwanemann** T, Otto M, Wierckx N and Wynands B.). *Pseudomonas* as Versatile Aromatics Cell Factory. *Biotechnology Journal*. **2020**; 15(11): 1900569. <https://doi.org/10.1002/biot.201900569>

**Sessitsch** J, Howieson X, Perret H, Antoun H and Martínez-Romero E. Advances in Rhizobium Research. *Critical Reviews in Plant Sciences*. **2002**; 21(4): 323- 378. <https://doi.org/10.1080/0735-260291044278>

**Shen** H, Thomas R, Penfold J and Fragneto G. Destruction and solubilization of supported phospholipid bilayers on silica by the biosurfactant surfactin. *Langmuir*. **2010**; 26 (10), 7334-7342. <https://doi.org/10.1021/la904212x>

**Shin J. H., Park B.S., Kim H.Y., Lee K.H. and Kim K.S.** Antagonistic and Plant Growth-Promoting Effects of *Bacillus velezensis* BS1 Isolated from Rhizosphere Soil in a Pepper Field. *Plant Pathol J.* **2021**, 37(3): 307-314. <https://doi.org/10.5423/PPJ.NT.03.2021.0053>

**Shin SH, Lim Y, Lee SE, Yang NW and Rhee JH.** CAS agar diffusion assay for the measurement of siderophores in biological fluids. *Journal of Microbiological Methods*, 2001, 44(1): 89-95. doi: 10.1016/s0167-7012(00)00229-3.

**Shoda M.** Bacterial Control of Plant Diseases. *Journal of Biosciencie and Bioengineering.* **2000**; 89(6):515-521. [https://doi.org/10.1016/s1389-1723\(00\)80049-3](https://doi.org/10.1016/s1389-1723(00)80049-3)

**Shrivastava P and Kumar R.** Soil Salinity: A serious environmental issue and Plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviationr, *Saudi Journal of Biological Sciences.* **2015**, 22(2): 123-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>

**SIAP.** Anuario estadístico de producción agrícola. SIAP [serie en internet] 2021 [consultado 2023 enero 23]. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

**Silvester R.** Fijación biológica de nitrógeno por leguminosas: aspectos agronómicos relacionados con su nodulación con *Rhizobium*. *Suelos Ecuatoriales.* **1983**; 13(2):28-35.

**Smyth, TJP., Perfumo A, McClean S, Marchant R and Banat IM.** Isolation and Analysis of Lipopeptides and High Molecular Weight Biosurfactants. In *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*; Timmis, K.N., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; Northern Ireland, UK, **2010**, pp. 3689–3703. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-77587-4\\_290](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77587-4_290)

**Soria M, Trejo A, Tun, J y Terán R.** Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). SEP. DGETA. ITA-2. **2002**. Conkal, Yucatán, México.

**Sosa-Pech M, Ruiz-Sánchez E, Tun-Suárez JM, Pinzón-López LL y Reyes-Ramírez A.** Germinación, crecimiento y producción de glucanasas en *Capsicum chinense* Jacq. Inoculadas con *Bacillus* spp. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, **2019**; 6(16):137-143. <https://doi.org/10.19136/era.a6n16.1801>



- Soto-Plancarte** A, Rodríguez-Alvarado G, Fernández-Pavía YL, Pedraza-Santos ME, López-Pérez L, Díaz-Celaya M y Fernández-Pavía SP. Protocolos de aislamiento y diagnóstico de *Phytophthora* spp. enfoque aplicado a la investigación. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. **2017**; 8(8): 1867-1880. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.708>
- Souto** GI, Correa OS, Montecchia, MS, Kerber, NL, Pucheu, NL, Bachur M and García AF. Genetic and functional characterization of a *Bacillus* sp. strain excreting surfactin and antifungal metabolites partially identified as iturin-like compounds. Journal of Applied Microbiology. **2004**; 97(6): 1247–1256. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2004.02408.x>
- Stein** T. *Bacillus subtilis* antibiotics: structure, syntheses and specific functions. Molecular Microbiology. **2005**; 56, 845-857. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2005.04587.x>
- Suksiri** S, Laipasu P, Soyong K and Poaim S. Isolation and Identification of *Phytophthora* sp. and *Pythium* sp. from Durian Orchard in Chumphon Province, Thailand. International Journal of Agricultural Technology. **2018**; 14(3): 389-402. ISSN 2630-0192
- Sultana** S, Alam S and Karim MM. Screening of siderophore-producing salt-tolerant rhizobacteria suitable for supporting plant growth in saline soils with iron limitation. Journal of Agriculture and Food Research, **2021**; 4: 100150. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100150>
- Tapia** C y Amaro J. Género *Fusarium*. Revista Chilena Infectol. **2014**; 31 (1): 85-86. <https://doi.org/10.4067/S0716-10182014000100012>
- Ticconi** CA, Delatorre CA and Abel S. Attenuation of phosphate starvation responses by phosphite in Arabidopsis. Plant Physiology. **2001**; 127 (3): 963-972.
- Trigos** A, Ramirez K y Salinas A. Presencia de hongos fitopatógenos en frutas y hortalizas y su relación en la seguridad alimentaria. Revista Mexicana de Micología. **2008**; 28: 125-129.
- Tucuch** C. Alcantar G, Ordaz V, Santizo J, y Larque A. Producción y calidad de chile habanero (*capsicum chinense* Jacq.) con diferentes relaciones de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> /NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y tamaño de partículas de sustratos. Tierra latinoamericana. **2012**; 30 (1):9-15.

**Vásquez** López A, Tlapal Bolaños B, Yáñez Morales MJ, Pérez Pacheco R y Quintos Escalante M. Etiología de la marchitez del “chile de agua” (*Capsicum annuum* L) en Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*. **2009**; 32 (2): 127 – 134.

**Vásquez** V y Pérez MH. Dosis y épocas de aplicación de ácido giberélico en la floración y cosecha del mango "Ataulfo". *Revista Fitotecnia Mexicana*. **2006**; 29(3): 197-202.

**Velásquez-Valle** R, Medina-Aguilar MM y Luna-Ruiz JJ. Sintomatología y Géneros de Patógenos Asociados con las Pudriciones de la Raíz del Chile (*Capsicum annuum* L.) en el Norte-Centro de México. *Revista Mexicana de Fitopatología*. **2001**; 19(2): 175-181. ISSN 0185 3309

**Vernner** R y Martín HJ. **2009**. Aislamiento y selección de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal en cultivo uchuva (*Physalis peruviana* L.) con capacidad antagónica frente a *Fusarium* sp. Tesis de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia.

**Villarreal-Delgado** MF, Villa-Rodríguez, ED, Cira-Chávez LA, Estrada-Alvarado MI, Parra-Cota FI y Santos-Villalobos S. El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola. *Revista mexicana de fitopatología*. **2018**; 36(1): 95-130. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5>

**Wakchaure** GC, Minhas PS, Meena KK, Singh NP, Hegade PM and Sorty AM. Growth, bulb yield, water productivity and quality of onion (*Allium cepa* L.) as affected by deficit irrigation regimes and exogenous application of plant bio-regulators. *Agricultural Water Management*. **2018**; 199: 1-10.

**Wang** W, Wu Z, He Y, Huang Y, Li X and Ye BC. Plant growth promotion and alleviation of salinity stress in *Capsicum annuum* L. by *Bacillus* isolated from saline soil in Xinjiang. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **2018**; 164: 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.070>

**Wang** Y, Zhang G, Huang Y, Guo M, Song J, Zhang T, Long Y, Wang B and Liu H (2022) A Potential Biofertilizer—Siderophilic Bacteria Isolated From the Rhizosphere of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. *Front. Microbiol.* **2022**, 13: 870413. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.870413>

**Weisburg** WG, Barns SM, Pelletier DA and Lane DJ. 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. *Journal of Bacteriology*. **1991**; 173(2): 697-703. <https://doi.org/10.1128/jb.173.2.697-703.1991>

**Wong** WS, Tan SN, Ge L, Chen X. and Yong, JWH. The Importance of Phytohormones and Microbes in Biofertilizers. *Sustainable Development and Biodiversity*. **2015**; 12(2): 105-158. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24654-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24654-3_6)

**Xie** G, Su B and Cui Z. Isolation and identification of N<sub>2</sub>-fixing strains of *Bacillus* in rice rhizosphere of the Yangtze River Valley. *Wei Sheng Wu Xue Bao*. **1998**; 38 (6):480-483.

**Yu** X., Ai C., Xin L. and Zhou G. The siderophore-producing bacterium, *Bacillus subtilis* CAS15, has a biocontrol effect on *Fusarium* wilt and promotes the growth of pepper. *European Journal of Soil Biology*. **2011**, 2: 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.11.001>

**Zhang** J, Huang X, Hou Y, Xia X, Zhu Z, Huang A, Feng S, Li P, Shi L and Dong P. Isolation and Screening of Antagonistic Endophytes against *Phytophthora infestans* and Preliminary Exploration on Anti-oomycete Mechanism of *Bacillus velezensis* 6-5. *Plants*. **2023**, 12(4): 909. <https://doi.org/10.3390/plants12040909>

## IX. ANEXOS.



**Anexo 1.** Semillas de *Capsicum chinense* var. naranjo criollo.



**Anexo 2.** Obtención de plántulas de *Capsicum chinense* para ensayos de patogenicidad de *Fusarium* spp.



**Anexo 3.** Hidratación de granos de mijo con jugo V8



**Anexo 4.** Preparación de granos de mijo para ensayos de patogenicidad





**Anexo 5.** Establecimiento de granos de mijo infectados con *Fusarium* spp. para ensayos de patogenicidad.



**Anexo 6.** Establecimiento de ensayo de biocontrol de *Fusarium* spp. en *Capsicum chinense*



**Anexo 7** Evaluación de *Capsicum chinense* en la promoción de crecimiento vegetal.



**Anexo 8.** Preparación de plántulas de *Capsicum chinense* para ensayos de biofertilización.





**Anexo 9.** Transplante de *Capsicum chinense* en cielo abierto



**Anexo 10.** Establecimiento de *Zea mays* como barreras para el manejo integral de plagas.





**Anexo 11.** Cosecha de *Capsicum chinense* inoculados con aislados bacterianos