



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL**

RESISTENCIA SISTÉMICA INDUCIDA POR *Bacillus subtilis* EN *Solanum lycopersicum* CONTRA *Corynespora cassiicola*

TESIS

Que presenta:

Alecsis de Melchor Padrón Chan

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable

Director de tesis:

Dr. Arturo Reyes Ramírez

Conkal, Yucatán, México

Agosto, 2026



TecNM



Conkal, Yucatán, México, 21 de agosto de 2026

El comité de tesis del C: Alecsis de Melchor Padrón Chan, constituido por los CC. Dr. Arturo Reyes Ramírez, Dr. Jairo Cristóbal Alejo, Dr. René Garruña Hernández, Dr. José María Tun Suárez, Dra. María Manuela de Jesús Reyes Estébanez, Dr. Juan Carlos Camacho Chab, habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: RESISTENCIA SISTÉMICA INDUCIDA POR *Bacillus subtilis* EN *Solanum lycopersicum* CONTRA *Corynespora cassiicola*, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable, según lo establece el Capítulo 2, inciso 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentado.

ATENTAMENTE

Dr. Arturo Reyes Ramírez
Director de Tesis

Dr. Jairo Cristóbal Alejo
Asesor de Tesis

Dr. René Garruña Hernández
Asesor de Tesis

Dr. José María Tun Suárez
Asesor de Tesis

Dr. Juan Carlos Camacho Chab
Asesor de Tesis

Dra. María Manuela de Jesús
Reyes Estebanez
Asesora de Tesis



Conkal, Yucatán, México a 21 de agosto de 2026

DECLARATORIA DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de materiales y métodos, resultados y discusión de este documento, es producto del trabajo de investigación realizado durante mi estudio de posgrado y con base en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Conkal. En virtud de lo manifestado reconozco que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de lo correspondiente a dicha información son propiedad de la citada institución educativa.

Alecsis de Melchor Padrón Chan

Agradecimientos

A la SECIHTI, por otorgarme la beca número 824245 que hizo posible realizar mis estudios de doctorado.

Al Dr. Arturo Reyes Ramírez, por compartir generosamente sus conocimientos y enseñanzas en diversas técnicas y el manejo de equipos, los cuales se reflejan en los resultados plasmados en esta tesis. Agradezco profundamente la oportunidad de haber trabajado en su laboratorio, así como su paciencia, guía y orientación constante a lo largo de todo mi doctorado, que han sido fundamentales para mi formación científica y profesional.

Al Dr. José María Tun Suárez, por sus valiosos consejos durante la etapa de anteproyecto de esta tesis, por su orientación en la definición de los enfoques y estrategias iniciales de investigación, y por sus observaciones y comentarios que contribuyeron significativamente a la mejora y consolidación de esta tesis.

Al Dr. René Garruña Hernández, por su apoyo en los experimentos fisiológicos, sus valiosos consejos en las reuniones de comité y agradezco su guía y orientación durante las etapas clave de este doctorado.

Al Dr. Jairo Cristóbal Alejo, por brindarme acceso a su laboratorio e invernadero, por sus valiosos consejos durante las reuniones de comité y por su apoyo en el análisis de la severidad de la enfermedad, contribuciones que fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

A la Dra. María Manuela de Jesús Reyes Estebanez, por su apoyo antes y durante mi estancia de investigación, así como por sus valiosos consejos y la confianza brindada, que fueron fundamentales para mantener el enfoque en los objetivos planteados.

Al Dr. Juan Carlos Camacho Chab, por aceptar guiarme durante mi estancia de investigación, por su paciencia y apoyo a lo largo del proceso, y por brindarme la confianza que permitió obtener un producto valioso de la investigación realizada.

Al Dr. Eduardo Villanueva Couoh, por su constante confianza en mí, por apoyarme desde que conoció mi deseo de realizar un doctorado, por sus valiosos consejos y por facilitar el contacto con el Dr. José María Tun, lo que permitió establecer los objetivos iniciales de esta tesis.

A la Dra. Felicia Amalia Moo Koh, por su apoyo con diversos instrumentos de investigación, que fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados, y por resolver amablemente cualquier duda durante el proceso.

A mi esposa Perla Yareth Matú Yam, por su apoyo incondicional a lo largo de cada etapa de este doctorado, cuyo respaldo fue fundamental para la realización de este trabajo.

A mi familia por parte de mi esposa, por el apoyo y acompañamiento brindados durante todo el desarrollo de este doctorado.

Al Lic. Lina Arzápalo, al Dr. Rubén Andueza, al Dr. Horacio Ballina, al M.C. Gabriel Azcorra, al Dr. Ángel Sierra, al Dr. Roberto Zamora, al Biol. Diego Matú, a la Dra. Lorenza Caamal, a la M.C. Citlally Puc; y a todas las personas que me brindaron apoyo durante este proceso, ya sea a través de un consejo, la facilitación de equipos o instrumentos, revisiones, autorizaciones, o cualquier otro tipo de asistencia, la cual fue reconfortante recibir de manera oportuna en los momentos que más lo necesité.

Dedicatoria

Con especial dedicación a:

A mi amada esposa **Perla Yareth Matú Yam.**

A mi amado hijo **Alexis Eleazar Padrón Matú.**

A mi adorada madre **María Nicomedes Chan y May.**

No sé a dónde me va a llevar esto,

pero hoy,

estoy dando mi mejor esfuerzo.

A. Padrón, 2026.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Hoja de firmas	ii
Declaratoria de propiedad	iii
Agradecimientos	iv
Dedicatoria	vi
Índice de contenido	vii
Índice de tablas	xiii
Índice de figuras	xiv
Resumen	xvi
Abstract	xvii

CAPÍTULO I

Introducción general	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
1.2.1 Importancia de <i>Solanum lycopersicum</i>	2
1.2.2 Situación fitosanitaria de <i>Solanum lycopersicum</i>	3
1.2.3 El hongo <i>Corynespora cassiicola</i>	4
1.2.4 Mecanismos de patogenecidad de <i>Corynespora cassiicola</i>	5
1.2.5 Control biológico con rizobacterias	6
1.2.6 Reconocimiento planta-patógeno	7
1.2.7 Resistencia sistémica inducida de las plantas	7
1.2.8 Mecanismos de acción del género <i>Bacillus</i>	8
1.2.9 Fotosíntesis y defensa vegetal	9
1.2.10 Lipopéptidos que intervienen en la resistencia de las plantas	10
1.2.11 Lipopéptido surfactina	12
1.2.12 Actividades enzimáticas en la resistencia de las plantas	13
1.2.13 Actividad enzimática de las quitinasas	13
1.2.14 Actividad enzimática de las β -1,3 glucanasas	13

1.3 Hipótesis	15
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo general	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
1.5 Procedimiento experimental	16
1.6 Literatura citada	17
CAPÍTULO II	24
Resistencia sistémica inducida: un mecanismo extraordinario de defensa vegetal	24
2.1 Resumen	24
CAPÍTULO III	25
Actividad biosurfactante de dos cepas quitinolíticas de <i>Bacillus subtilis</i> y su antagonismo contra <i>Corynespora cassiicola</i>	25
3.1 Abstract	25
3.1 Resumen	26
CAPÍTULO IV	27
Lipopéptidos extraídos de <i>Bacillus subtilis</i> F8 presentan actividad biosurfactante e inhiben el crecimiento fúngico de <i>Corynespora cassiicola</i> y <i>Fusarium oxysporum</i>	27
4.1 Abstract	27
4.1 Resumen	28
CAPÍTULO V	29
Actividad enzimática de quitinasas y glucanasas en <i>Solanum lycopersicum</i> inoculadas con <i>Bacillus subtilis</i>	29
5.1 Resumen	29
CAPÍTULO VI	30
<i>Bacillus subtilis</i> F8 and K47 isolate stimulate content of chlorophylls and improves photosynthesis in <i>Solanum lycopersicum</i> plants	30
6.1 Abstract	30

CAPÍTULO VII	32
Defense enzyme activities and physiological parameters induced by <i>Bacillus subtilis</i> in <i>Solanum lycopersicum</i> plants against <i>Corynespora cassiicola</i>	32
7.1 Summary	32
7.1 Resumen	33
CONCLUSIONES GENERALES	35
ANEXOS GENERAL	36
Inoculación de <i>Bacillus subtilis</i> en plantas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) crecidas a cielo abierto	36

Resumen

Corynespora cassiicola es un patógeno que ocasiona importantes pérdidas en la producción de tomate, cuyo manejo se basa principalmente en el uso de agroquímicos. *Bacillus* spp. representan una alternativa sostenible para el control de enfermedades. Se evaluó el potencial de *Bacillus subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 para inducir resistencia sistémica en tomate contra *C. cassiicola*. En ambos aislados se identificaron genes de la biosíntesis de surfactina, además, de presentar capacidad de emulsión y actividad quitinolítica. En hojas desprendidas de tomate, la aplicación de esporas o metabolitos secundarios redujo los síntomas de la enfermedad por *C. cassiicola* (hasta 63.8 %). Los lipopéptidos producidos por *B. subtilis* F8 inhibieron *in vitro* el crecimiento de *C. cassiicola* (26.4 %), con halos de inhibición superiores a 3.2 mm. La concentración mínima inhibitoria fue de 2 mg mL⁻¹. En plantas sanas inoculadas con *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47, se incrementó la actividad de quitinasas y β -glucanasas (más del 36 %), y la asimilación de CO₂, la conductancia estomática y el contenido de clorofila a y b (más del 33 %). Se promovió el crecimiento vegetal, destacando *B. subtilis* F8 por mejorar el índice de calidad de Dickson más del 30 %. En plantas infectadas con *C. cassiicola*, la inoculación con ambos aislados mejoró los parámetros fisiológicos, aumentó la actividad de quitinasas y β -glucanasas (más del 34 %) y redujo la severidad de la enfermedad (hasta 58 %), confirmando la activación de la resistencia sistémica inducida. Además, se observaron incrementos en el crecimiento y el rendimiento del tomate (hasta un 42 %), todo lo anterior, comparado con el testigo sin inoculación. Estos resultados demuestran que *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 actúan como agentes de biocontrol y promotores del crecimiento vegetal, ofreciendo una estrategia sostenible para mitigar a *C. cassiicola* en el tomate y mejorar la productividad.

Abstract

Corynespora cassiicola is a pathogen that causes significant losses in tomato production, and its management is primarily based on the use of agrochemicals. *Bacillus* spp. represent a sustainable alternative for disease control. The potential of *Bacillus subtilis* F8 and *B. subtilis* K47 to induce systemic resistance in tomatoe against *C. cassiicola* was evaluated. Both isolates were found to contain surfactin biosynthesis genes and also exhibited emulsifying capacity and chitinolytic activity. In detached leaves, the application of spores or secondary metabolites reduced the symptoms of *C. cassiicola* disease (up to 63.8%). The lipopeptides produced by *B. subtilis* F8 inhibited the *in vitro* growth of *C. cassiicola* (26.4%), with inhibition zones greater than 3.2 mm. The minimum inhibitory concentration was 2 mg mL⁻¹. In healthy plants inoculated with *B. subtilis* F8 and *B. subtilis* K47, chitinase and β -glucanase activity increased (by more than 36%), as did CO₂ assimilation, stomatal conductance, and chlorophyll a and b content (by more than 33%). Plant growth was promoted, with *B. subtilis* F8 showing the most improvement in the Dickson quality index (by more than 30%). In plants infected with *C. cassiicola*, inoculation with both isolates improved physiological parameters, increased chitinase and β -glucanase activity (by more than 34%), and reduced disease severity (by up to 58%), confirming the activation of induced systemic resistance. Furthermore, increases in growth and yield (by up to 42%) were observed, all compared to the uninoculated control. These results demonstrate that *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 functions as biocontrol agents and plant growth promoters, offering a sustainable strategy to mitigate *C. cassiicola* in tomato and improve productivity.

CAPÍTULO I

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

Los cultivos agrícolas están expuestos a condiciones ambientales desfavorables y al contacto con numerosos microorganismos potencialmente patógenos, lo que compromete su desempeño fisiológico y productivo (Rolly *et al.*, 2021). En este contexto, los productos sintéticos desempeñan un papel importante en el control de enfermedades para mantener la productividad de los sistemas agrícolas. No obstante, su uso intensivo y prolongado genera efectos secundarios adversos sobre la estabilidad fitosanitaria de los cultivos, la sostenibilidad de los agroecosistemas y la salud humana, además de acelerar el desarrollo de resistencia en los fitopatógenos (Dey y Ghosh, 2022).

Entre estos patógenos destaca *Corynespora cassiicola*, el agente causal de la enfermedad conocida como mancha foliar, la cual afecta a un amplio rango de especies vegetales y provoca pérdidas severas en cultivos de importancia económica como el tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Este fitopatógeno ha sido considerado de alto impacto debido a su elevada agresividad, amplia gama de hospederos y capacidad para desarrollar resistencia a fungicidas, lo que limita la eficacia del control químico convencional (Sierra *et al.*, 2023; Deng *et al.*, 2024; Peng *et al.*, 2025; Han *et al.*, 2026).

Ante este escenario, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), particularmente las pertenecientes al género *Bacillus*, representan una alternativa estratégica para el manejo de patógenos necrotróficos, ya que combinan mecanismos de antagonismo directo con la capacidad de inducir resistencia sistémica en las plantas. Este proceso involucra la activación de genes relacionados con la defensa, el incremento de la actividad de enzimas asociadas a la patogénesis y la mejora del estado fisiológico del cultivo, sin generar una presión selectiva comparable a la ejercida por los fungicidas químicos (Wang *et al.*, 2025; Wu *et al.*, 2025; Hu *et al.*, 2026).

Por lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la resistencia sistémica inducida por *Bacillus subtilis* frente a *Corynespora cassiicola* en plantas de *Solanum lycopersicum*, como una estrategia sostenible para el manejo de la enfermedad de la mancha foliar y el fortalecimiento del estado fisiológico del cultivo.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Importancia de *Solanum lycopersicum*

Solanum lycopersicum (tomate) se encuentra entre las hortalizas de mayor producción y consumo en el mundo. La producción global de tomate alcanzó los 186.1 millones de toneladas. China encabeza la producción mundial con 68.3 millones de toneladas anuales, seguida por India y Turquía (FAO, 2024). En 2023, México registró una producción de 3.6 millones de toneladas (Figura 1) y se posicionó como el principal exportador internacional de este cultivo (Figura 2), y alcanzó un valor histórico de 2.988 millones de dólares (SIAP, 2023).

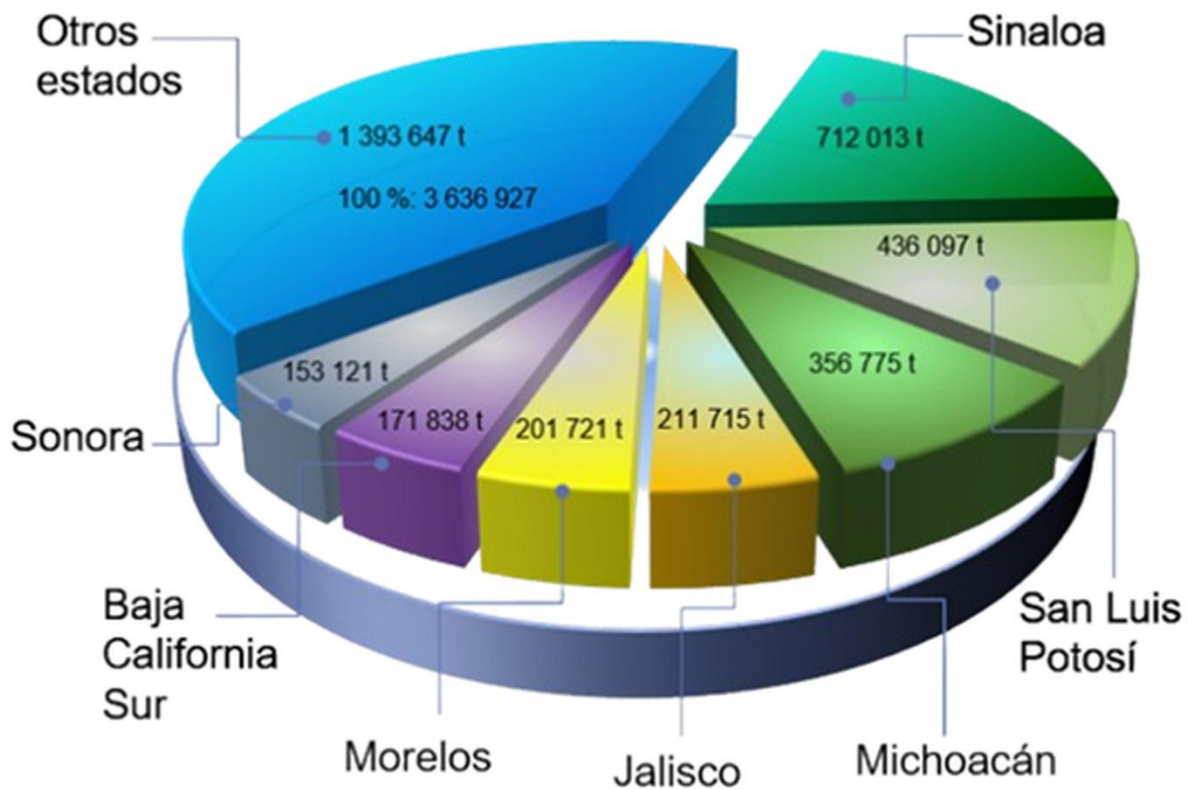


Figura 1. Principales estados productores de tomate en México. Imagen creada en PowerPoint.



Figura 2. Principales estados exportadores de tomate en México. Imagen creada con Bing IA.

1.2.2 Situación fitosanitaria de *Solanum lycopersicum*

Los agroquímicos (fungicidas y fertilizantes químicos) desempeñan un papel importante en la reducción de enfermedades y en el aumento del rendimiento del cultivo de tomate a nivel mundial. En ausencia de fungicidas, la producción de tomate podría disminuir en más del 54 %; además, los patógenos aceleran el desarrollo de resistencia a productos sintéticos cuando estos se emplean de manera continua como medidas de control químico a lo largo de los años (Tudi *et al.*, 2021; Sierra *et al.*, 2023; Han *et al.*, 2026). Por otra parte, el uso excesivo de fertilizantes químicos comerciales puede provocar la acidificación del suelo, lo que reduce los compuestos orgánicos presentes de forma natural. El uso prolongado de este tipo de fertilizantes puede incrementar las poblaciones de plagas y eliminar microorganismos benéficos del suelo (Devi *et al.*, 2022), aumentando su susceptibilidad al ataque de diversos patógenos. Los principales hongos patógenos reportados para el cultivo de tomate son: *Alternaria alternata*, *Fusarium oxysporum* y *Corynespora cassiicola* (Awu *et al.*, 2023; Dučkена *et al.*, 2024; Peng *et al.*, 2025).

1.2.3 El hongo *Corynespora cassiicola*

C. cassiicola es un Ascomiceto perteneciente a la clase Dothideomycetes y al orden Pleosporales, es responsable de la enfermedad conocida como mancha foliar que afecta a más de 530 especies de plantas y 380 géneros de plantas que se desarrollan en las zonas tropicales y subtropicales, incluyendo numerosos cultivos de importancia económica como el tomate (Figura 3) causando manchas foliares que se tornan de marrón en sus etapas iniciales (Moo *et al.*, 2022; Peng *et al.*, 2025). El hongo actúa como fitopatógeno necrotrófico, aunque puede poseer diversos estilos de vida, desde saprófito hasta endófito, la especie se considera estrictamente asexual debido a la falta de estructuras reproductivas sexuales observadas (Lopez *et al.*, 2018). *C. cassiicola* es clasificado con alto riesgo de resistencia a fungicidas (FRAC, 2019; Han *et al.*, 2026).



Figura 3. Mancha foliar por *Corynespora cassiicola* en tomate. Imagen modifica en Gemini IA.

1.2.4 Mecanismos de patogenicidad de *Corynespora cassiicola*

El conidio es la principal forma de inoculación e infección y bajo condiciones adecuadas se someten a la germinación para formar hifas y esporas que son esenciales para la agresividad y colonización fúngica. Los receptores acoplados a la proteína G perciben señales ambientales externas para regular la expresión génica y la respuesta celular subsiguiente mediante la diferenciación del apresorio y del haustorio permitiendo la penetración en la ultraestructura celular de la hoja (célula mesófila) del hospedero, provocando la degradación de la pared celular en el punto de penetración junto con la desorganización severa de la estructura celular interna, con membranas y orgánulos rotos (Figura 4), además, los cloroplastos son afectados con distorsiones de las lamelas y un apilamiento reducido de los tilacoides (Gao *et al.*, 2020).

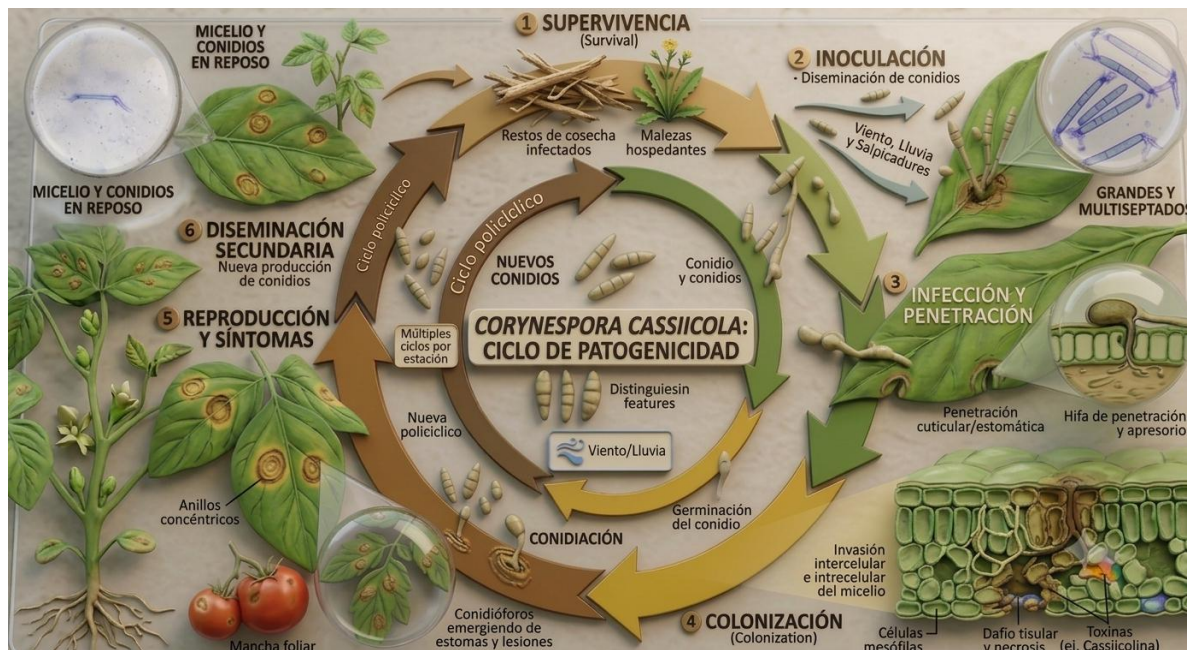


Figura 4. Ciclo de patogenicidad de *Corynespora cassiicola*. Imagen creada con Gemini IA.

La cassicolina es un efector peptídico de 27 aminoácidos responsable de la patogenicidad de *C. cassiicola*, contiene seis isoformas: Cas1, Cas2, Cas3, Cas4, Cas5 y Cas6, la agresividad patogénica se relaciona con el tipo de isoforma y es dependiente del hospedero, además, el hongo produce múltiples enzimas con actividad en la patogénesis, como la glucósido hidrolasa, la cutinasa involucradas en la degradación de la cutícula, la celulasa, pectato liasa “pectinasa”, y enzimas como la hemicelulasa, glucanasa, glucosidasa y xilanasas participan en la degradación de la pared celular, y enzimas que degradan la

citomembrana, proteasas: superfamilias: serina proteasa, metalo peptidasa, cisteína peptidasa, peptidasa aspártica, treonina peptidasa y glutámico peptidasa, lipasas que se asocian a la destrucción de los ácidos grasos de membrana, sustancias de reserva y ceras de la cutícula (inclusión celular) (Gao *et al.*, 2020).

Para controlar el avance de la actividad fúngica en las plantas los agroquímicos son ampliamente utilizados, sin embargo, su uso desmedido tiene efectos perjudiciales sobre la calidad de los agroecosistemas y la salud humana, además sus aplicaciones han propiciado en el fitopatógeno el riesgo de desarrollo progresivo de resistencia (Dey y Ghosh, 2022). *C. cassiicola* es un patógeno con alto riesgo de desarrollo de resistencia a fungicidas (Deng *et al.*, 2024; Peng *et al.*, 2025; Han *et al.*, 2026). Lo que alerta a la necesidad de generar estrategias sustentables y efectivas para controlar la enfermedad de la mancha foliar causada por *C. cassiicola* en *S. lycopersicum*.

1.2.5 Control biológico con rizobacterias

Una alternativa al uso excesivo de fungicidas y al desarrollo de resistencia es la aplicación de rizobacterias del género *Bacillus*; estas bacterias, formadoras de endosporas, presentan una alta capacidad de supervivencia bajo condiciones adversas y pueden suprimir a diversos fitopatógenos. Además, las rizobacterias pertenecientes al género *Bacillus*, conforman un grupo diverso de microorganismos asociados a las plantas, con potencial para el biocontrol al inducir mecanismos de defensa sistémica contra enfermedades causadas por hongos, sin generar efectos secundarios dañinos (Guo *et al.*, 2019; Dimkić *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2026). Los mecanismos subyacentes son elevar la expresión de genes relacionados con la resistencia, como los genes de proteínas relacionadas con la patogénesis, aumento de la actividad de las enzimas de defensa y estimulación de la fotosíntesis (Aydi *et al.*, 2017; Samaniego *et al.*, 2021; Bi *et al.*, 2025).

Por otra parte, bacterias del género *Bacillus* actúan como promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y manifiestan una respuesta activa a los exudados secretados por las raíces de las plantas modificando así su mecanismo hacia condiciones favorables involucradas en la quimiotaxis, la rápida colonización de las raíces y el metabolismo energético (Oliveira *et al.*, 2024).

Dentro de la matriz del hospedante las células bacterianas constituyen señales del huésped y autoderivadas, que actúan coordinadamente para la producción y liberación de compuestos relacionados con promoción del crecimiento de las plantas e intervienen en los mecanismos de defensa latentes de la planta hospedera. Asimismo, el microbiota de las raíces interviene en la producción de los tejidos de las raíces contra los patógenos transmitidos por el suelo mediante la producción de antibióticos y la competencia por nutrientes y espacios. La estimulación temprana de las raíces por los microorganismos benéficos tiene una expresión local en la epidermis y consecutivamente se comunica con las capas celulares internas y las partes aéreas de la planta proporcionando una defensa sistémica (Sharma *et al.*, 2022; Salwan *et al.*, 2023).

1.2.6 Reconocimiento planta-patógeno

Durante la relación planta-patógeno puede darse una interacción compatible entre un patógeno virulento y un hospedante susceptible dando origen a la enfermedad “virulencia”, o una relación incompatible, donde el hospedante es resistente y patógeno avirulento, por lo tanto, no se inicia la enfermedad “avirulencia” (Gorshkov y Tsers, 2022).

Las plantas poseen una amplia capacidad para modular su resistencia y así tolerar el estrés biótico y abiótico. Las plantas presentan dos tipos de resistencia, la resistencia sistémica adquirida (RSA) inducida por patógenos, la cual se activa después de la infección por un patógeno necrosante y confiere resistencia local ante un amplio espectro de patógenos que colonizan distintas partes de la estructura de las plantas infectadas, por otro lado, está la resistencia sistémica inducida (RSI), la cual es estimulada por microorganismos no patógenos colonizadores de la rizosfera (Salwan *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2025).

1.2.7 Resistencia sistémica inducida de las plantas

La interacción planta-microorganismo benéfico es capaz de activar respuestas de defensa de la planta para enfrentar desafíos posteriores causados por patógenos bacterianos, fúngicos y virales (Oliveira *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025). La RSI se expresa como una acción sistémica, no local y de amplio espectro que comparte similitud con el RSA pero no induce una respuesta de hipersensibilidad, ni muerte celular programada o síntomas visibles. La respuesta en forma de resistencia inducida representa la expresión de mecanismos de defensa latentes en el huésped que se manifiestan para contrarrestar un posterior ataque de patógenos (Sharma *et al.*, 2022) y otorga una mayor protección contra un amplio espectro de especies

atacantes (Oliveira *et al.*, 2024). Entre los PGPR capaces de estimular esta resistencia inducida sobresalen las rizobacterias del género *Bacillus*.

La RSI es un mecanismo de defensa activa en las plantas que se basa en una secuencia coordinada de eventos. Inicia con el reconocimiento de microorganismos benéficos mediante patrones moleculares asociados a microorganismos (PAMPs) entre los que destacan los lipopéptidos cíclicos, los cuales son detectados por receptores de reconocimiento (PRRs) en la membrana celular vegetal (Ongena *et al.*, 2007). Este reconocimiento activa la transmisión de señales de defensa y la inducción de proteínas relacionadas con la patogénesis (PR), como β -1,3-glucanasas y quitinasas, que participan en la degradación de la pared celular de los fitopatógenos (Tyagi *et al.*, 2022). Posteriormente, se activan rutas de señalización mediadas por fitohormonas como el etileno y el ácido jasmónico, lo que conduce a la expresión de genes de defensa y al aumento de la actividad de enzimas defensivas (Kumar *et al.* 2011). En conjunto, estos procesos conforman una cascada de señales que fortalece la inmunidad vegetal de manera ambientalmente sostenible.

No obstante, la eficacia de la RSI depende de la especie o cepa microbiana, así como de la interacción específica con la planta y las condiciones ambientales, lo que subraya la importancia de seleccionar microorganismos benéficos adecuados para el control de fitopatógenos (Ghosh y Panja, 2021).

En este contexto, la resistencia sistémica inducida no solo se manifiesta como un incremento en la expresión de genes de defensa, sino también como un ajuste integrado del estado fisiológico de la planta, reflejado en el aumento de la actividad de enzimas relacionadas con la patogénesis y en la optimización de procesos centrales como la fotosíntesis, lo que contribuye a una respuesta defensiva más eficiente frente a futuros ataques de fitopatógenos.

1.2.8 Mecanismos de acción del género *Bacillus*

Los aislados del género *Bacillus* son formadores de endosporas capaces de suprimir e inhibir patógenos de las plantas directamente al competir por un nicho ecológico o nutrientes. Diversas rizobacterias de este género han demostrado su efectividad contra diversos fitopatógenos, en un estudio realizado por Goswami y Deka (2020) evaluaron *in vitro* el potencial de la rizobacteria *B. altitudinis* MS16 y su eficacia en la inhibición de los fitopatógenos: *Colletotrichum gloeosporioides*, *Corynespora cassiicola*, *Fusarium*

verticillioides y *F. oxysporum* f.sp. *Pisi*, como resultado reportan que la cepa presentó una inhibición de 73 %, 69 %, 54 % y 44 % respectivamente.

De igual modo *Bacillus* actúa indirectamente, al sintetizar metabolitos secundarios (lipopéptidos), enzimas líticas (quitinasas y glucanasas) y desencadena la expresión de genes de defensa de las plantas mismas que tiene una base compleja que otorga un estado fisiológico saludable que depende de la manifestación coordinada de un conjunto de mecanismos que corresponden a la RSI (Ghosh y Panja, 2021; Bi *et al.*, 2025).

1.2.9 Fotosíntesis y defensa vegetal

Se ha documentado que *Bacillus* promueve el crecimiento vegetal y optimiza la nutrición de las plantas mediante la síntesis de fitohormonas, como el ácido indolacético (AIA), así como a través de la solubilización de nutrientes presentes en el suelo. Estos procesos contribuyen a la modulación del estado fisiológico de las plantas (Mahapatra *et al.*, 2022).

Los distintos aislados de este género exhiben una diversidad de mecanismos de acción, entre los cuales se incluyen el aumento de la disponibilidad de nutrientes mediante la solubilización del fósforo, el fortalecimiento del metabolismo energético requerido para la fotosíntesis, la fijación del nitrógeno atmosférico y la promoción de la asimilación de N, Mg y Fe, elementos esenciales para la biosíntesis de la clorofila. Asimismo, estos microorganismos contribuyen a mejorar las respuestas de las plantas frente al estrés y a la detoxificación de compuestos potencialmente perjudiciales (Timofeeva *et al.*, 2023; Khoso *et al.*, 2024).

Un mecanismo fisiológico saludable por la inoculación de *Bacillus* sugiere RSI. Samaniego *et al.* (2021) señalaron que la inoculación de *Bacillus* spp. en las plantas de *Capsicum chinense* infectadas por el virus del mosaico del chile (PepGMV), mejoró el mecanismo fotosintético y los parámetros fotoquímicos y el intercambio de gases aumentaron, el rendimiento cuántico fotoquímico máximo del fotosistema II se estimuló (7.85 %) con respecto a los no inoculados, la tasa de asimilación de CO₂ se vio favorecida, y la tasa de transpiración disminuyó, lo que indica una mayor eficiencia en el uso del agua. Este efecto se reflejó en los síntomas menos severos causados por PepGMV en las plantas obtenidas a partir de semillas inoculadas con diferentes *Bacillus* spp.

Por otra parte, *Bacillus velezensis* GF267 incrementó en 37 % la capacidad antioxidante defensiva en plantas de tomate frente a la infección por *Xanthomonas perforans*, lo que contribuyó a una mayor tolerancia al estrés biótico (Kuyat *et al.*, 2019).

En conjunto, estos antecedentes indican que un aparato fotosintético funcional no es únicamente una consecuencia del buen estado sanitario de la planta, sino un componente activo de la resistencia sistémica inducida, al aportar la energía y los metabolitos necesarios para sostener una respuesta defensiva eficaz frente al estrés biótico.

1.2.10 Lipopéptidos que intervienen en la resistencia de las plantas

Se ha documentado que diferentes especies del género *Bacillus* sintetizan lipopéptidos antimicrobianos, los cuales son compuestos de bajo peso molecular con características anfifílicas, que actúan como elicitores para inducir la resistencia de las plantas (Vijay *et al.*, 2022). Entre los metabolitos secundarios, los lipopéptidos cíclicos que incluyen las familias fengicina, surfactina e iturina, son bien conocidos por su acción antimicrobiana, que implican un daño físico de la envoltura celular de los patógenos, causando permeabilidad por disrupción y formación de poros en la membrana celular y generar la lisis de la pared celular (Hussain *et al.*, 2024).

Los lipopéptidos son compuestos biológicos que presentan actividad sobre la superficie de las estructuras vegetales actuando como un biosurfactante que reduce la tensión superficial, y son amigables con el medio ambiente. La actividad se debe a que poseen en una porción de ácido graso hidrofóbico que se une a una cadena peptídica hidrofílica, la porción hidrofóbica generalmente se compone de ácidos grasos (insaturados, saturados o hidroxilados), mientras que la porción hidrofílica regularmente se compone de péptidos (mono, di o polisacáridos). Debido a que poseen fracciones hidrofóbicas e hidrofílicas dentro de una sola molécula, tienden a migrar hacia una interfaz con diferentes grados de polaridad y enlaces de hidrógeno, como una interfaz aire/agua o aceite/agua (Pilz *et al.*, 2023).

B. subtilis es conocido por producir una amplia gama de lipopéptidos a partir de grupos de genes que codifican sintetasas de péptidos no ribosómicos multimodulares (NRPS). La organización modular sistemática de NRPS permite la variedad estructural de los lipopéptidos mediante el intercambio de dominios o módulos de NRPS para crear nuevos lipopéptidos (Sreedharan *et al.*, 2023).

La mayoría de estos tienen una estructura cíclica mediada por el enlace entre un residuo peptídico C-terminal y un ácido graso β -hidroxi, un grupo hidroxilo del residuo peptídico o un aminoácido β . Los NRPS son enzimas multimodulares que reconocen, activan, modifican y vinculan los aminoácidos intermedios al péptido producto (Neubauer, *et al.*, 2020). Los NRPS poseen la capacidad de sintetizar péptidos que contienen aminoácidos inusuales, incluidos α -aminoácidos, β -aminoácidos e hidroxi y N-metil aminoácidos. La biosíntesis de péptidos no ribosómicos se da a través de la actividad de la unidad catalítica, denominada módulo. El ácido graso se puede incorporar a la cadena principal del péptido con 7 a 10 α -aminoácidos, por medio de ciclación, generalmente en el carbono C2 o C3 por grupos amino o hidroxilo. El orden de los módulos suele ser colineal con las secuencias peptídicas del producto y cada módulo está compuesto por dominios específicos que se encargan de catalizar diferentes actividades enzimáticas (Sreedharan *et al.*, 2023).

Las surfactinas, por su parte, consisten en heptapéptidos enlazados a una cadena de ácidos grasos β -hidroxi de 13 a 17 carbonos (Figura 5). En contraste, las fengicinas corresponden a decapeptidos formados por 10 aminoácidos unidos a un ácido graso β -hidroxi con longitudes de entre 12 y 19 carbonos (Xu *et al.*, 2018). Estas diferencias estructurales entre los lipopéptidos cíclicos, junto con su baja toxicidad y su amplia actividad antifúngica frente a diversos patógenos, representan factores clave para disminuir el riesgo de desarrollo de resistencia (Vijay *et al.*, 2022; Hussain *et al.*, 2024).

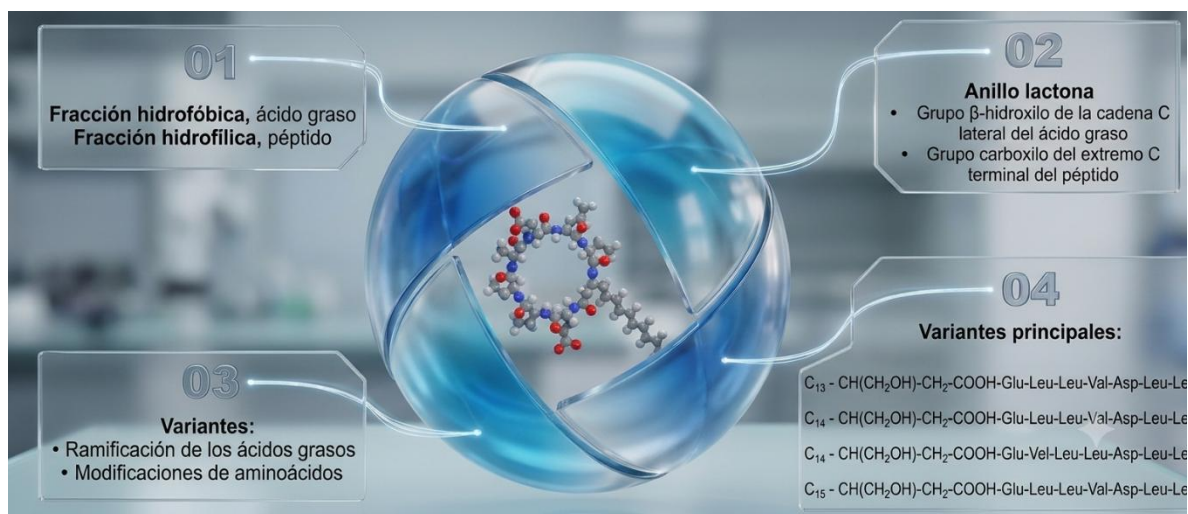


Figura 5. Estructura del lipopéptido surfactina. Imagen creada en PowerPoint y modificado en Gemini IA.

1.2.11 Lipopéptido surfactina

El lipopéptido surfactina posee propiedades antimicrobianas potenciales, además de ser el lipopéptido mejor estudiado y caracterizado (da Silva Junior *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024). La surfactina es reconocida principalmente por potenciar la actividad biológica de otros lipopéptidos (da Silva Junior *et al.*, 2023), además, diversos estudios han demostrado que también puede inducir la resistencia sistémica en las plantas, incrementando su capacidad de defensa frente a patógenos (Kumar *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024).

La familia de las surfactinas se caracteriza por su capacidad de formar biopelículas y emulsiones, lo que dificulta la adhesión y colonización de patógenos. Además, puede alterar la membrana celular de los hongos, provocando su desestabilización y muerte, y actúa como secuestrador de iones esenciales para el crecimiento y supervivencia de los fitopatógenos (Salek y Euston, 2019; Dong *et al.*, 2022). Asimismo, se ha reportado que la surfactina inhibe el crecimiento fúngico mediante la inducción de un proceso de muerte celular similar a la apoptosis, el cual está asociado con la acumulación intracelular de especies reactivas de oxígeno, la disminución del potencial de membrana mitocondrial, la activación de metacaspasas y la condensación de la cromatina (Zhang *et al.*, 2024).

Mejía *et al.* (2016) reportaron que *B. subtilis* F8 posee genes implicados en la biosíntesis de surfactinas e iturinas, mostrando antagonismo frente a los patógenos *Fusarium equiseti* y *F. solani*. Por otro lado, en *B. subtilis* JN005 se identificaron genes responsables de la síntesis de surfactina y fengicina; los lipopéptidos aislados demostraron, en pruebas *in vitro* sobre plantas de arroz, una reducción superior al 17 % de la enfermedad causada por *Magnaporthe oryzae* (Zhu *et al.*, 2023). De manera similar, en *B. pumilus* se detectó el gen de la surfactina, y la inoculación de la bacteria en semillas protegió significativamente a las plántulas de sorgo frente a la infección por *Rhizoctonia solani* (Kumar *et al.*, 2023).

1.2.12 Actividades enzimáticas en la resistencia de las plantas

La manipulación de los mecanismos endógenos de defensa vegetal representa una estrategia eficiente y ambientalmente sostenible para el control de enfermedades. La resistencia inducida por *Bacillus* está mediada por metabolitos naturales y componentes bioquímicos que activan la protección de las plantas frente a patógenos mediante procesos de señalización molecular y celular (Tsotetsi *et al.*, 2022). Entre estos mecanismos, la quitinasa y la β -1,3-glucanasa, clasificadas como enzimas relacionadas con la patogénesis, desempeñan un papel clave al degradar componentes estructurales de la pared celular de los hongos, comprometer la integridad de la membrana de los patógenos y afectar directamente sus factores de virulencia. La activación temprana y coordinada de los mecanismos de defensa bioquímicos y estructurales resulta fundamental para que las plantas restrinjan la invasión y diseminación de hongos patógenos (Marzec-Schmidt *et al.*, 2020). El aumento de actividades enzimáticas relacionadas con la defensa vegetal como las quitinasas y β -1,3 glucanasas están vinculadas con la resistencia sistémica inducida (Jangir *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2019).

1.2.13 Actividad enzimática de las quitinasas

La quitina es un tipo de carbohidrato polimérico que se encuentra abundantemente en la naturaleza y es el componente principal de la pared celular de los hongos. Las quitinasas son enzimas responsables de hidrolizar los enlaces glicosídicos de la quitina en compuestos diméricos (quitobiosa) y monoméricos de N-acetil D-glucosamina (Zhang *et al.*, 2020).

En cuanto al aumento de la actividad enzimática de la quitinasa y su relación con la defensa vegetal, Aydi *et al.* (2017) reportaron que el aumento de actividad enzimática de la quitinasa por inoculación de *Bacillus subtilis* str. SV41, redujo en un 40% los síntomas de la enfermedad causada *Fusarium oxysporum* en plantas de tomate,

1.2.14 Actividad enzimática de las β -1,3 glucanasas

El β -1,3 glucano es un componente constituyente dominante de las paredes celulares de los hongos. Los glucanos son importantes polisacáridos bioactivos responsables de los efectos beneficiosos observados en muchos hongos de interés. La (1,3)- β -glucano sintasa miembro de la familia de las glicosil transferasa, es una de las principales enzimas implicadas en su biosíntesis (Papaspýridi *et al.*, 2018).

Guo *et al.* (2019) reportaron que *Bacillus amyloliquefaciens* BA13 ejerce un efecto significativo en el control del virus del rizado amarillo de la hoja del tomate (TYLCV), al disminuir la incidencia de la infección, la severidad de la enfermedad y la acumulación viral

en el tejido foliar de plantas de tomate. Asimismo, el tratamiento con *B. amyloliquefaciens* BA13 incrementó la actividad de las enzimas β -1,3-glucanasa y quitinasa en las hojas, alcanzando una eficiencia de control entre 48 y 52 %. Adicionalmente, se observó una mejora significativa en el desarrollo del sistema radicular y en la biomasa aérea del tomate, con incrementos superiores al 46 % tras la aplicación de BA13.

En la última década el estudio del control de fitopatógenos a través PGPR ha ido en aumento, sin embargo, debido a la aparición de modificaciones genéticas y resistencia en los patógenos existe la necesidad de continuar con la búsqueda de nuevos aislados bacterianos, con potencial antifúngico para disminuir el daño causado por los hongos fitopatógenos entre los que destaca como uno de los más resistentes *Corynespora cassicola* agente causal de la enfermedad conocida como mancha foliar en el tomate (Deng *et al.*, 2024, Peng *et al.*, 2025).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio es determinar la resistencia sistémica inducida por *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 en *S. lycopersicum* en el control de la enfermedad mancha foliar causada por *C. cassicola*.

1.3 Hipótesis

La inoculación de *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 en *Solanum lycopersicum* var. Pony express induce la resistencia sistémica contra *Corynespora cassiicola*, lo que se manifiesta en una mayor actividad de las enzimas de defensa, como las glucanasas y quitinasas, y en la menor severidad de la enfermedad mancha foliar. Asimismo, la inducción de este mecanismo de defensa se asocia con mejoras en el estado fisiológico de las plantas, reflejadas en el incremento de la tasa de asimilación neta de CO₂ y el contenido de pigmentos fotosintéticos.

1.4 Objetivos

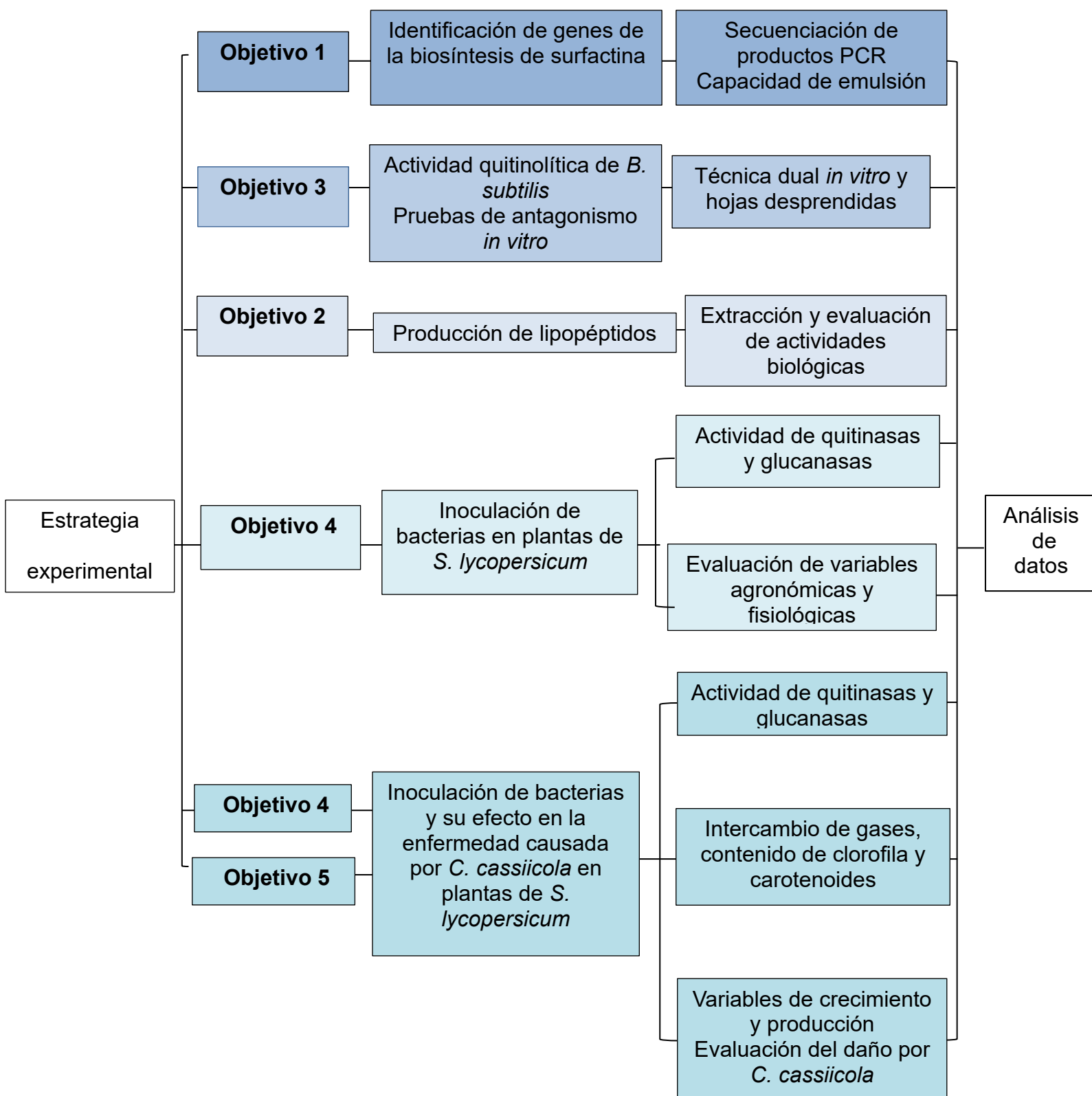
1.4.1 Objetivo general

Evaluar la resistencia sistémica inducida por *B. subtilis* en *S. lycopersicum* var. Pony express para el control de la enfermedad mancha foliar causada por *C. cassiicola*.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar en *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 la presencia de genes relacionados con la biosíntesis de surfactina.
2. Determinar en *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 la actividad quitinolítica y el antagonismo contra *C. cassiicola*
3. Evaluar en *B. subtilis* F8 la producción de lipopéptidos y su actividad antifúngica contra *C. cassiicola*.
4. Determinar el efecto de la inoculación de *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 en la actividad enzimática de las quitinasas y glucanasas, el crecimiento y el intercambio de gases en plantas de *S. lycopersicum*.
5. Evaluar el efecto de la inoculación de *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 sobre la actividad de quitinasas y glucanasas, así como sobre el mecanismo fotosintético, en plantas de *S. lycopersicum* infectadas con *C. cassiicola*.
6. Estimar la severidad de la enfermedad causada por *C. cassiicola* en la producción de plantas de *S. lycopersicum* inoculadas con *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47.

1.5 Procedimiento experimental



1.6 Literatura citada

- Awu JE, Nyaku ST, Amissah JN, Okorley BA, Agyapong PJA, Doku FE, Nkansah GO. 2023. Grafting for sustainable management of *Fusarium* wilt disease in tomato production in Ghana. *Journal of Agriculture and Food Research* 14: 100710. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100710>.
- Aydi RBAC, Stedel C, Garagounis C, Nefzi A, Jabnoun H, Papadopoulou K, Daami M. 2017. Involvement of lipopeptide antibiotics and chitinase genes and induction of host defense in suppression of *Fusarium* wilt by endophytic *Bacillus* spp. in tomato. *Crop Protection* 99: 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.05.008>.
- Bi Q, Lu F, Wu J, Liu X, Han X, Zhao J. 2025. The control effect and induced disease resistance mechanism of *Bacillus tequilensis* on wheat powdery mildew. *Biological Control* 201: 105698. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2025.105698>.
- da Silva Junior AL, Borges AV, da Silva HAO, Leite ICHL, Alves KS, de Medeiros LS, de Abreu LM. 2023. Lipopeptide-enriched extracts of *Bacillus velezensis* B157 for controlling tomato early blight. *Crop Protection* 172: 106317. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106317>.
- Deng Y, Wang T, Zhang LL, Wang J, Qi Z, Ji M. 2024. Overexpression of the CcCYP51A and CcCYP51B genes confer *Corynespora cassiicola* resistance to prochloraz. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 205: 106132. <https://doi.org/10.1016/J.PESTBP.2024.106132>.
- Devi PI, Manjula M, Bhavani RV. 2022. Agrochemicals, environment, and human health. *Annual Review of Environment and Resources* 47: 399-421. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120920-111015>.
- Dey M, Ghosh S. 2022. Arbuscular mycorrhizae in plant immunity and crop pathogen control. *Rhizosphere* 22: 100524. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100524>.
- Dimkić I, Janakiev T, Petrović M, Degrassi G, Fira D. 2022. Plant-associated *Bacillus* and *Pseudomonas* antimicrobial activities in plant disease suppression via biological control mechanisms - A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 117: 101754. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101754>.

- Dong L, Wang P, Zhao W, Su Z, Zhang X, Lu X, Li S, Ma P, Guo Q. 2022. Surfactin and fengycin contribute differentially to the biological activity of *Bacillus subtilis* NCD-2 against cotton Verticillium wilt. *Biological Control* 174: 104999. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104999>.
- Dučkena L, Bessadat N, Bataillé N, Hamon B, Koppel M, Loit K, Rasiukevičiūtė N, Bimšteine G, Simoneau P. 2024. Haplotype diversity and phylogeny within *Alternaria alternata* and *A. arborescens* species complexes from tomatoes. *Fungal Biology* 128 (8): 2250-2265. <https://doi.org/10.1016/J.FUNBIO.2024.10.002>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2024. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (recuperado febrero 2025).
- FRAC (Fungicide Resistance Action Committee). 2019. Fungicide resistance action committee. [Consultado 9 diciembre 2025]. Disponible en: <https://www.frac.info/docs/default-source/publications/pathogen-risk/frac-pathogen-list-2019.pdf>.
- Gao S, Zeng R, Xu L, Song Z, Gao P, Dai F. 2020. Genome sequence and spore germination-associated transcriptome analysis of *Corynespora cassiicola* from cucumber. *BMC Microbiology* 20:199. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-01873-w>.
- Ghosh SK, Panja A. 2021. Different mechanisms of signaling pathways for plant protection from diseases by fungi. In: Jogaiah S. (ed.), *Biocontrol Agents and Secondary Metabolites*. Woodhead Publishing, Sawston, UK pp: 591-630. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822919-4.00026-0>.
- Gorshkov V, Tsers I. 2022. Plant susceptible responses: the underestimated side of plant-pathogen interactions. *Biological Reviews* 97 (1): 45-66. <https://doi.org/10.1111/BRV.12789>.
- Goswami M, Deka S. 2020. Isolation of a novel rhizobacteria having multiple plant growth promoting traits and antifungal activity against certain phytopathogens. *Microbiological Research* 240: 126516. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126516>.

- Guo Q, Li Y, Lou Y, Shi M, Jiang Y, Zhou J, Sun Y, Xuen Q, Lai H. 2019. *Bacillus amyloliquefaciens* Ba13 induces plant systemic resistance and improves rhizosphere microecology against tomato yellow leaf curl virus disease. *Applied Soil Ecology* 137: 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.01.015>.
- Han J, Zhu J, Li J, Ma D, Mu W, Dong H, Liu F. 2026. Dual mutations containing E198A in β -tubulin eliminate the negative cross-resistance between carbendazim and diethofencarb in *Corynespora cassiicola*. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 216: 106715. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106715>.
- Hu Y, Yang X, Wu H, Li Q, Xiao G, Wu F, Li F, He Z, Lin X, Ding T. 2026. Biocontrol of tobacco bacterial wilt by *Bacillus velezensis* Y19: insights into chemotaxis, competition and antagonism. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 103140. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2026.103140>.
- Hussain S, Tai B, Ali M, Jahan I, Sakina S, Wang G, Zhang X, Yin Y, Xing F. 2024. Antifungal potential of lipopeptides produced by the *Bacillus siamensis* Sh420 strain against *Fusarium graminearum*. *Microbiology Spectrum* 12 (4): <https://doi.org/10.1128/spectrum.04008-23>.
- Jangir M, Pathak R, Sharma S, Sharma S. 2018. Biocontrol mechanisms of *Bacillus* sp., isolated from tomato rhizosphere, against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Biological Control* 123: 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.04.018>.
- Khoso MA, Wagan S, Alam I, Hussain A, Ali Q, Saha S, Poudel TR, Manghwar H, Liu F. 2024. Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: current perspective. *Plant Stress* 11: 100341. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100341>.
- Kumar H, Kawai T, Akira S. 2011. Pathogen recognition by the innate immune system. *International Reviews of Immunology* 30: 16-34. <https://doi.org/10.3109/08830185.2010.529976>.
- Kumar K, Pal G, Verma A, Kumar D, Shukla P, Verma SK. 2023. Seed vectored bacterial endophyte *Bacillus pumilus* protect sorghum (*Sorghum bicolor* L.) seedlings from a

- fungal pathogen *Rhizoctonia solani*. Biological Control 183: 105249. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105249>.
- Kuyat A, de Carvalho Pontes N, de Almeida Halfeld-Vieira B. 2019. *Bacillus velezensis* GF267 as a multi-site antagonist for the control of tomato bacterial spot. Biological Control 137: 104013. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104013>.
- Lopez D, Ribeiro S, Label P, Fumanal B, Venisse JS, Kohler A, de Oliveira RR, Labutti K, Lipzen A, Lail K, Bauer D, Ohm RA, Barry KW, Spatafora J, Grigoriev IV, Martin FM, Pujade-Renaud V. 2018. Genome-wide analysis of *Corynespora cassiicola* leaf fall disease putative effectors. Front Microbiology 9: 276.
- Mahapatra S, Yadav R, Ramakrishna W. 2022. *Bacillus subtilis* impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde. Journal of Applied Microbiology 132 (5): 3543-3562. <https://doi.org/10.1111/jam.15480>.
- Marzec-Schmidt K, Hura K, Plažek A. 2020. Rapid increases in β -1,3-glucanase and chitinase activities are markers of resistance to *Microdochium nivale* in grasses of the *Lolium-Festuca* complex. Biologia Plantarum 64: 710-716. <https://doi.org/10.32615/BP.2020.088>.
- Mejía MA, Cristóbal J, Tun JM, Reyes A. 2016. Actividad in vitro de *Bacillus* spp. en la inhibición del crecimiento micelial de *Fusarium equiseti* y *Fusarium solani* aislados de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Agrociencia 50: 1123–1135.
- Moo FA, Cristóbal J, Tun JM, Medina IL, Arjona AA, Gamboa MM. 2022. Activity of aqueous extracts from native plants of the Yucatan Peninsula against fungal pathogens of tomato *in vitro* and from croton chichenensis against *Corynespora cassiicola* on tomato. Plants 11: 2821. <https://doi.org/10.3390/plants11212821>.
- Neubauer D, Jaśkiewicz M, Bauer M, Gołacki K, Kamysz W. 2020. Ultrashort cationic lipopeptides-effect of N-terminal amino acid and fatty acid type on antimicrobial activity and hemolysis. Molecules 25 (2): <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25020257>.
- Oliveira EM, Vieira V, Costa C, Silva R. 2024. Unlocking plant defenses: Harnessing the power of beneficial microorganisms for induced systemic resistance in vegetables –

- A systematic review. *Biological Control* 188: 105428. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2023.105428>.
- Ongena M, Jourdan E, Adam A, Paquot M, Brans A, Joris B, Arpigny JL, Thonart P. 2007. Surfactin and fengycin lipopeptides of *Bacillus subtilis* as elicitors of induced systemic resistance in plants. *Environmental Microbiology* 9: 1084-90. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01202.x>. PMID: 17359279.
- Papaspyridi LM, Zerva A, Topakas E. 2018. Biocatalytic synthesis of fungal β -Glucans. *Catalysts* 8 (7): 274-278. <https://doi.org/10.3390/CATAL8070274>.
- Peng Q, Hao X, Liu C, Li X, Lu X, Liu X. 2025. Unveiling the resistance risk and resistance mechanism of florylpicoxamid in *Corynespora cassiicola* from cucumber. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 208: 106228. <https://doi.org/10.1016/J.PESTBP.2024.106228>.
- Pilz M, Cavelius P, Qoura F, Awad D, Brück T. 2023. Lipopeptides development in cosmetics and pharmaceutical applications: A comprehensive review. *Biotechnology Advances* 67: 108210. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2023.108210>.
- Rolly NK, Mun BG, Yun BW. 2021. Insights into the transcriptional regulation of branching hormonal signaling pathways genes under drought stress in *Arabidopsis*. *Genes* 12 (2): 298. <https://doi.org/10.3390/GENES12020298>.
- Sałek K, Euston SR. 2019. Sustainable microbial biosurfactants and bioemulsifiers for commercial exploitation. *Process Biochemistry* 85: 143-155. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.06.027>.
- Salwan R, Sharma M, Sharma A, Sharma V. 2023. Insights into plant beneficial microorganism-triggered induced systemic resistance. *Plant Stress* 7: 100140. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2023.100140>.
- Samaniego BY, Garruña R, Tun JM, Moreno OA, Reyes A, Valle RE, Ail CE, Toscano L. 2021. Healthy photosynthetic mechanism suggests rsi elicited by *Bacillus* spp. in *Capsicum chinense* plants infected with PepGMV. *Pathogens* 10 (4): 455. <https://doi.org/10.3390/pathogens10040455>.

- Sharma S, Kumar P, Singh A. 2022. Systemic acquired resistance vs induced systemic resistance: A Review. *Agricultural Reviews* 1: 2411. <https://doi.org/10.18805/ag.R-2411>
- SIAP (Servicio de información agroalimentaria y pesquera). 2023. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Consultado: febrero 2025).
- Sierra E, Sandoya G, Lee S, Vallad G, Hutton S. 2023. Need for disease resistance breeding against *Corynespora cassiicola* in crops. *Frontiers in Agronomy* 5: 1275906. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1275906>.
- Sreedharan SM, Rishi N, Singh R. 2023. Microbial lipopeptides: Properties, mechanics and engineering for novel lipopeptides. *Microbiological Research* 271: 127363. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2023.127363>.
- Timofeeva AM, Galyamova MR, Sedykh SE. 2023. Plant growth-promoting soil bacteria: nitrogen fixation, phosphate solubilization, siderophore production, and other biological activities. *Plants* 12 (24): 4074. <https://doi.org/10.3390/plants12244074>.
- Tsotetsi T, Nephali L, Malebe M, Tugizimana F. 2022. *Bacillus* for plant growth promotion and stress resilience: what have we learned? *Plants* 11 (19): 2482. <https://doi.org/10.3390/plants11192482>.
- Tudi M, Ruan HD, Wang L, Lyu J, Sadler R, Connell D, Chu C, Phung DT. 2021. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (3): 1112. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>.
- Tyagi P, Singh A, Gupta A, Prasad M, Ranjan R. 2022. Mechanism and function of salicylate in plant toward biotic stress tolerance. En: Aftab T, Naeem M (eds.). *Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture*. Academic Press, pp. 131–164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91005-7.00018-7>.
- Vijay K, Hassan S, Govarthanan M, Kavitha T. 2022. Biosurfactant lipopeptides and polyketide biosynthetic gene in rhizobacterium *Achromobacter kerstersii* to induce systemic resistance in tomatoes. *Rhizosphere* 23: 100558. <https://doi.org/10.1016/J.RHISPH.2022.100558>.

- Wang Q, Qiu Y, Wang S, Gou Y, Hou H, Su T, Zou L, Huang J. 2025. Effective control of southern blight and root rot of *Aconitum carmichaelii* Debeaux by endophytic *Bacillus velezensis* YN-2-6S. *Biological Control* 201: 105690. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2024.105690>.
- Wu Y, She Z, Zhang X, Sun L, Chen X, Guo J, Ma X, Gu L, Wang D, Chen H, Zeng F, Wu S, Zhao Y. 2025. Self-assembled micellar photosensitizers for combating bacterial infections and activating systemic acquired resistance. *Nano Today* 61: 102627. <https://doi.org/10.1016/J.NANTOD.2024.102627>.
- Xu BH, Lu YQ, Ye ZW, Zheng QW, Wei T, Lin JF, Guo LQ. 2018. Genomics-guided discovery and structure identification of cyclic lipopeptides from *Bacillus siamensis* JFL15. *PLoS ONE* 13 (8): e0202893. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202893>.
- Zhang A, Mo X, Zhou N, Wang Y, Wei G, Hao Z, Chen K. 2020. Identification of chitinolytic enzymes in chitinolytic bacter *meiyuanensis* and mechanism of efficiently hydrolyzing chitin to n-acetyl glucosamine. *Frontiers in Microbiology* 11: 572053. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.572053/BIBTEX>.
- Zhang S, Lou T, Wu S, Liu S, Pan H, Yang J, Su Y, Hu W, Xiang W, Pan S, Sun L. 2024. *Bacillus velezensis* GX1 and its potential for the control of lily bulb rot. *Biological Control* 198: 105616. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105616>.
- Zhu H, Wu S, Tang S, Xu J, He Y, Ren Z, Liu E. 2023. Isolation, identification and characterization of biopotential cyclic lipopeptides from *Bacillus subtilis* strain JN005 and its antifungal activity against rice pathogen *Magnaporthe oryzae*. *Biological Control* 182: 105241. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105241>.

CAPÍTULO II.

Resistencia sistémica inducida: un mecanismo extraordinario de defensa vegetal

Alecsis de Melchor Padrón-Chan y Arturo Reyes-Ramírez

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Conkal, Av. Tecnológico S/N,
97345, Conkal, Yucatán, México.

alecsis.padron@itconkal.edu.mx

**Publicado como artículo de divulgación en la revista: Desde el herbario CICY (2024)
16: 230-234.**

2.1 Resumen

Las plantas son severamente afectadas por enfermedades causadas por diversos patógenos. Los fungicidas sintéticos son importantes en el control de las enfermedades, sin embargo, su uso intensivo tiene efectos perjudiciales sobre el medio ambiente, la sostenibilidad del ecosistema y la salud humana. No obstante, en aquellas interacciones entre planta y microorganismos benéficos, las plantas pueden generar respuestas inmunitarias e inducir un sistema de defensa sistémica para aminorar el ataque de patógenos. Este trabajo aborda el mecanismo de la resistencia sistémica inducida, los principales factores implicados en su proceso, así como los principales componentes involucrados en la defensa vegetal.

Palabras clave: biocontrol, rizobacterias, genes de defensa, enzimas, fitopatógenos.

CAPÍTULO III.

Actividad biosurfactante de dos cepas quitinolíticas de *Bacillus subtilis* y su antagonismo contra *Corynespora cassiicola*

Alecsis de Melchor Padrón-Chan¹✉, Jairo Cristobal Alejo¹✉ and Arturo Reyes Ramirez^{1*}✉

¹Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Conkal, Av. Tecnológico S/N, 97345, Conkal, Yucatán, México.

*Correspondence: Arturo Reyes Ramírez, arturo.rr@conkal.tecnm.mx

Publicado como artículo científico en Biotecnia (2025) 27: e2362.
<https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27.2362>.

3.1 Abstract

Corynespora cassiicola causes losses in tomato production and agrochemicals are used to control it. Rhizobacteria, such as *Bacillus* spp. they represent an alternative to chemical products. The effect of *Bacillus subtilis* F8 and K47 against *C. cassiicola* was evaluated, mycelial and fungal growth was determined and the percentage of inhibition was calculated. Damage by the pathogen was evaluated in detached leaves inoculated with spores or cell-free filtrate. In *B. subtilis*, the presence of genes for surfactin biosynthesis, its emulsifying capacity and chitinolytic activity were determined. *B. subtilis* F8 and K47 reduced the mycelial growth of *C. cassiicola* 5.6 cm and 5.5 cm and the fungal growth by 79.4 % and 75.6 %, with an inhibition percentage of 69.1 % and 72.9 % respectively. On detached leaves, the application of spores or filtrates reduced disease symptoms by up to 63.8 %. Genes related to surfactin biosynthesis were detected in both strains, with an emulsifying capacity of 21.15 and 21.48 % and a chitinolytic activity of 0.165 $\mu\text{M mg}^{-1}$ and 0.367 $\mu\text{M mg}^{-1}$ respectively. *B. subtilis* F8 and K47 present promising potential as an alternative in the control of *C. cassiicola* in tomato crops.

Keywords: Biocontrol, inhibition, detached leaves, surfactin, chitinase.

3.1 Resumen

Corynespora cassiicola causa pérdidas en la producción de tomate y su principal control son los agroquímicos. Rizobacterias como *Bacillus* spp. representan una alternativa a los productos químicos. Se evaluó el efecto de *Bacillus subtilis* F8 y K47 contra *C. cassiicola*, se determinó el crecimiento micelial y fúngico, además, se calculó el porcentaje de inhibición. En hojas desprendidas inoculadas con esporas o filtrado libre de células se evaluó el daño por el patógeno. En *B. subtilis* se determinó la presencia de genes para la biosíntesis de surfactina, su capacidad emulsionante y actividad quitinolítica. *B. subtilis* F8 y K47 redujeron el crecimiento micelial de *C. cassicola* 5.6 cm y 5.5 cm y el crecimiento fúngico un 79.4 % y 75.6 %, con un porcentaje de inhibición de 69.1 % y 72.9 % respectivamente. En hojas desprendidas, la aplicación de esporas o filtrados redujo los síntomas de la enfermedad hasta en un 63.8 %. En ambas cepas se identificaron genes relacionados con la biosíntesis de surfactina, con capacidad de emulsión de 21.15 % y 21.48 % y una actividad quitinolítica de 0.165 $\mu\text{M mg}^{-1}$ y 0.367 $\mu\text{M mg}^{-1}$ respectivamente. *B. subtilis* F8 y K47 presentan potencial prometedor como alternativa en el control de *C. cassicola* en cultivos de tomate.

Palabras clave: Biocontrol, inhibición, hojas desprendidas, surfactina, quitinasa

CAPÍTULO IV.

Lipopeptidos extraídos de *Bacillus subtilis* F8 presentan actividad biosurfactante e inhiben el crecimiento fúngico de *Corynespora cassiicola* y *Fusarium oxysporum*

Alecsis de Melchor Padrón Chan¹✉, Arturo Reyes Ramírez¹✉, Juan Carlos Camacho Chab^{2*}✉, Benjamín Otto Ortega Morales²✉

¹Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Conkal, Av. Tecnológico S/N, 97345, Conkal, Yucatán, México.

²Universidad Autónoma de Campeche/ Centro de Investigación en Microbiología Ambiental y Biotecnología (CIMAB), Av. Agustín Melgar S/N entre calle 20 y Juan de la Barrera, Col. Buenavista, 24039, San Francisco Campeche, Campeche, México.

*Autor para correspondencia: Juan Carlos Camacho Chab, juanccam@uacam.mx

Publicado como artículo científico en Biotecnia (2025) 27: e2631.

<https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27.2631>.

4.1 Abstract

Lipopeptides are amphiphilic metabolites that can protect plants by suppressing the growth of phytopathogens or by inducing systemic resistance. In this study, the production of lipopeptides by the bacterium *Bacillus subtilis* F8, isolated from Yucatan soils, was evaluated. The lipopeptide were extracted using tangential flow filtration and acid precipitation. The yield of the lipopeptides was estimated, and the biosurfactant activity was determined by the drop collapse method. The antifungal activity of the lipopeptides against the phytopathogens *Corynespora cassiicola* and *Fusarium oxysporum* was evaluated. Lipopeptide treatments affected mycelial growth and fungal inhibition. A yield of 0.06 mg·mL⁻¹ was obtained. The lipopeptides and cell-free filtrate exhibited biosurfactant activity in mineral oil and pure soybean oil. The lipopeptides of *B. subtilis* F8 inhibited the growth of *C. cassiicola* and *F. oxysporum* by 26.4 % and 29.1 %, respectively, with an inhibition zone greater than 3.2 ± 0.13 mm and an inhibition percentage greater than 26 %. Minimal fungicidal concentration of the lipopeptides against *C. cassiicola* and *F. oxysporum* was determined to be 2 mg mL⁻¹ and 0.5 mg mL⁻¹, respectively. The lipopeptides of *B. subtilis* F8 represent a promising alternative to

chemical fungicides for the suppression of the phytopathogens *C. cassiicola* and *F. oxysporum*.

Keywords: Biosurfactant, *Corynespora cassiicola*, *Fusarium oxysporum*, drop collapse, lipopeptides.

4.1 Resumen

Los lipopéptidos son metabolitos anfifílicos que pueden brindar protección a las plantas al suprimir el crecimiento de fitopatógenos o al inducir a una resistencia sistémica. En esta investigación la bacteria identificada como *Bacillus subtilis* F8, aislada de suelos en Yucatán, fue evaluada por su producción de lipopéptidos. Los lipopéptidos fueron extraídos mediante filtración tangencial y precipitación ácida. El rendimiento de los lipopéptidos fue estimado, y se determinó la actividad biosurfactante por el método de gota colapsada. La actividad antifúngica de los lipopéptidos se evaluó contra los fitopatógenos *Corynespora cassiicola* y *Fusarium oxysporum*. Los tratamientos con lipopéptidos afectaron el crecimiento micelial y la inhibición de los hongos. Se obtuvo un rendimiento de $0.06 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$. Los lipopéptidos y el filtrado libre de células presentaron actividad biosurfactante en aceite mineral y aceite puro de soya. Los lipopéptidos de *B. subtilis* F8 inhibieron el crecimiento de *C. cassiicola* y *F. oxysporum* en un 26.4 % y 29.1 % respectivamente, con un halo de inhibición mayor a $3.2 \pm 0.13 \text{ mm}$ y un porcentaje de inhibición mayor al 26 %. Se determinó que la concentración mínima inhibitoria de los lipopéptidos frente a *C. cassiicola* y *F. oxysporum* es de 2 mg mL^{-1} y 0.5 mg mL^{-1} , respectivamente. Los lipopéptidos de *B. subtilis* F8 representan una alternativa prometedora frente a los fungicidas químicos para suprimir los fitopatógenos *C. cassiicola* y *F. oxysporum*.

Palabras clave: Biosurfactante, *Corynespora cassiicola*, *Fusarium oxysporum*, gota colapsada, lipopéptidos.

CAPÍTULO V.

ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE QUITINASAS Y GLUCANASAS EN *Solanum lycopersicum* INOCULADAS CON *Bacillus subtilis*

Alecsis de Melchor Padrón Chan y Arturo Reyes Ramírez

Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Conkal, Av. Tecnológico S/N,
97345, Conkal, Yucatán, México. alecsis.padron@itconkal.edu.mx

Publicado como capítulo en el libro: Suelos Sanos y Resilientes para el Desarrollo Sostenible (2025) 473-477. ISBN 978-607-26878-0-6.

5.1 RESUMEN

Los factores bióticos y abióticos inciden directamente sobre la producción de plantas comercialmente importantes como el tomate (*Solanum lycopersicum*). Los productos de origen sintético son ampliamente utilizados para mantener una producción agrícola saludable. Las rizobacterias aisladas de los suelos representan una alternativa a los productos sintéticos. En plantas de *S. lycopersicum* se inoculó *B. subtilis* F8 y K47 obtenido de suelos nativos de la península de Yucatán y se evaluó la actividad enzimática de las quitinasas y β -glucanasas. Se utilizó un diseño totalmente al azar, los resultados fueron sometidos a un ANDEVA y comparación de medias con Tukey, ($p \leq 0.05$). La actividad enzimática aumentó a los tres días después del trasplante con la inoculación de *B. subtilis* F8 un 36 % y 44 %, con *B. subtilis* K47 un 57 % y 55 % para quitinasas y β -glucanasas, respectivamente. *B. subtilis* F8 y K47 aumentan las actividades enzimáticas β -glucanasas y quitinasas en plantas de *S. lycopersicum*, representando potencial prometedor en la defensa vegetal del cultivo.

Palabras clave: *enzimas; resistencia sistémica inducida; rizobacterias; suel*

CAPÍTULO VI

***Bacillus subtilis* F8 and K47 isolate stimulate content of chlorophylls and improves photosynthesis in *Solanum lycopersicum* plants**

Alecsis de Melchor Padrón Chan¹, René Garruña Hernández², José María Tun Suarez¹,
Juan Carlos Camacho Chab³, Arturo Reyes Ramírez^{1*},

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico S/N, 97345, Conkal, Yucatán, México.

² SECIHTI-Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico S/N, 97345, Conkal, Yucatán, México.

³ Universidad Autónoma de Campeche/ Centro de Investigación en Microbiología Ambiental y Biotecnología (CIMAB), Av. Agustín Melgar S/N entre calle 20 y Juan de la Barrera, Col. Buenavista, 24039, San Francisco Campeche, Campeche, México.

*Corresponding author (arturo.rr@conkal.tecnm.mx).

Review in progress for submission

6.1 ABSTRACT

Solanum lycopersicum (tomato) is one commercially important vegetables cultivated worldwide. Agrochemicals (pesticides and chemical fertilizers) play a critical role in the tomato production. *Bacillus* offers a sustainable alternative to synthetic agrochemicals. The understanding the photosynthetic mechanisms in the soil-plant-microbe interaction allows for efficient inoculants. Therefore, the objective of this research was to evaluate the physiological parameters of tomato plants inoculated with *Bacillus subtilis*. Tomato plants were inoculated with *B. subtilis* F8 and *B. subtilis* K47, and gas exchange, content of chlorophylls and carotenoids, and plant growth variables were evaluated. Plants inoculated with *B. subtilis* F8 and *B. subtilis* K47 increased the CO₂ assimilation rate by 54% and 40%, the stomatal conductance by 55% and 43%, the content of chlorophyll a by 43% and 57%, the content chlorophyll b by 26% and 53%; likewise, plants inoculated with *B. subtilis* F8 and *B. subtilis* K47 increased total carotenoid content by 23% and 43% respectively, compared to non-inoculated plants. Inoculation with *B. subtilis* F8 and *B. subtilis* K47 increased the plant height by 10 % and 13.8 %, and the plant total dry mass by 25 % and 15.3 %, respectively, compared to non-inoculated plants. However, only plants inoculated with

the *B. subtilis* F8 showed significant increases in the Dickson quality index compared to the other treatments (*B. subtilis* K47 and control). *B. subtilis* F8 and *B. subtilis* K47 therefore positively influenced the performance of the photosynthetic mechanism in tomato plants and could be used in sustainable agriculture programs.

Key words: *Bacillus subtilis*, CO₂ assimilation rate, content of carotenoids, content of chlorophylls, *Solanum lycopersicum*.

CAPÍTULO VII.

Defense enzyme activities and physiological parameters induced by *Bacillus subtilis* in *Solanum lycopersicum* plants against *Corynespora cassiicola*

[Actividades enzimáticas de defensa y parámetros fisiológicos inducidos por *Bacillus subtilis* en plantas de *Solanum lycopersicum* contra *Corynespora cassiicola*]

Alecsis de Melchor Padrón-Chan¹, René Garruña-Hernández^{1,2}, Jairo Cristóbal-Alejo¹,
María Manuela Reyes-Estebanez³, Arturo Reyes-Ramírez^{1*}

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, Avenida Tecnológico s/n, C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Tel. 01 (999) 9-12-41-30 Ext. 121.

² SECIHTI-Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico S/N, 97345, Conkal, Yucatán, México.

³ Universidad Autónoma de Campeche, Centro de Investigación en Microbiología Ambiental y Biotecnología. Av. Agustín Melgar s/n entre Juan de la Barrera y Calle 20, Colonia Buena vista, Campeche, Camp., México CP 24039, Mexico

*Corresponding author: arturo.rr@conkal.tecnm.mx.

Review in progress for submission

7.1 SUMMARY

Background: Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production is severely affected by *Corynespora cassiicola*, the causal agent of leaf spot disease. **Objective:** This study evaluated the ability of *Bacillus subtilis* isolates F8 and K47 to induce systemic resistance (ISR) and enhance physiological performance, growth, and yield in infected plants. **Methodology:** A naturally occurring leaf spot disease was identified and monitored throughout the experiment. Plant physiological parameters (gas exchange, chlorophylls, carotenoids), defense-related enzymes (chitinase and β -1,3-glucanase), disease severity, growth, and yield were assessed. Data were analyzed using a completely randomized design with 12 plants per treatment and subjected to ANOVA, Tukey's test, and epidemiological analyses. **Results:** *C. cassiicola* was identified as the causal organism responsible for leaf spot disease in Pony Express tomato plants. Inoculation with *B. subtilis* F8 and K47 significantly increased CO₂ assimilation (64% and 85%), stomatal conductance (33% and

69%), and water use efficiency (16% and 38%). Chlorophyll a content increased by 23.6% and 30.4%, chlorophyll b by 70% and 87%, and total chlorophyll content by 75% and 91%. Chitinase activity increased by 37% and 61%, while β -1,3-glucanase activity increased by 34% and 74%, indicating effective ISR activation. AUDPC was reduced by 58% and 63%, while final disease severity (Y_{final}) decreased to 45.9% and 37.9%, respectively. Disease control efficiency reached 49.5% and 58.4%. Additionally, yield per plant increased by 63% and 42% compared with non-inoculated plants. **Implications:** These findings highlight the importance of considering both physiological performance and defense responses when evaluating induced systemic resistance for sustainable disease management strategies in tomato production systems. **Conclusion:** Both isolates functioned as biocontrol agents and plant growth promoters, offering a sustainable and eco-friendly strategy to mitigate leaf spot disease and improve tomato productivity under biotic stress.

Keywords Biological control, Induced systemic resistance, photosynthesis.

7.1 RESUMEN

Antecedentes: La producción de tomate es afectada por *Corynespora cassiicola*, agente causal de la enfermedad de la mancha foliar. **Objetivo:** Este estudio evaluó la capacidad de los aislados F8 y K47 de *Bacillus subtilis* para inducir resistencia sistémica (RSI) y mejorar el desempeño fisiológico, el crecimiento y el rendimiento en plantas infectadas. **Metodología:** Se identificó una enfermedad de mancha foliar de origen natural y se monitoreó durante todo el experimento. Se evaluaron parámetros fisiológicos de la planta (intercambio de gases, clorofilas, carotenoides), enzimas relacionadas con la defensa (quitinasa y β -1,3-glucanasa), severidad de la enfermedad, crecimiento y rendimiento. Con un diseño completamente aleatorio con 12 plantas por tratamiento, los datos se sometieron a ANOVA, prueba de Tukey y análisis epidemiológicos. **Resultados:** Se identificó a *C. cassiicola* como el organismo causal de la mancha foliar. La inoculación con *B. subtilis* F8 y K47 aumentó significativamente la asimilación de CO₂ (64% y 85%), la conductancia estomática (33% y 69%), la eficiencia del uso del agua (16% y 38%), el contenido de clorofila a (23,6% y 30,4%), el contenido de clorofila b (70% y 87%) y el contenido total de clorofila (75% y 91%). La actividad de quitinasa aumentó en un 37% y un 61%, mientras que la actividad de β -1,3-glucanasa aumentó en un 34% y un 74%, lo que indica una activación efectiva de ISR. El AUDPC se redujo en un 58% y un 63%, la severidad final de la enfermedad (Y_{final}) se redujo a un 45,9% y un 37,9%, y la eficiencia del control de la

enfermedad alcanzó un 49,5% y un 58,4%, respectivamente. El rendimiento por planta aumentó en un 63% y un 42% en comparación con las plantas no inoculadas. **Implicación:** Se resalta la importancia de considerar el desempeño fisiológico y las respuestas de defensa al evaluar la RSI, para el desarrollo de estrategias sostenibles de manejo de enfermedades en la producción de tomate. **Conclusión:** Ambos aislados actuaron como agentes de biocontrol y promotores del crecimiento vegetal, ofreciendo una estrategia sostenible y ecológica para mitigar la enfermedad de la mancha foliar y mejorar la productividad del tomate bajo estrés biótico.

Palabras clave. Control biológico, resistencia sistémica inducida, fotosíntesis.

VIII. CONCLUSIONES GENERALES

Bacillus subtilis F8 y *B. subtilis* K47 presentan un alto potencial como agentes de biocontrol y promotores del crecimiento en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*). Ambos aislados mostraron actividad quitinolítica y producción de surfactantes, lo que les permitió inhibir *in vitro* el crecimiento micelial de *Corynespora cassiicola* y reducir significativamente el daño en hojas infectadas. Los lipopéptidos extraídos de *B. subtilis* F8 exhibieron actividad biosurfactante y una concentración mínima inhibitoria de $2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ frente a *C. cassiicola*, evidenciando su capacidad antifúngica directa. Además, la inoculación con *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 potenció las actividades enzimáticas de quitinasas y β -glucanasas en plantas de tomate, indicando la activación de mecanismos de resistencia sistémica inducida y contribuyendo a reducir la severidad de la enfermedad causada por *C. cassiicola*. Se observó también una mejora significativa en los parámetros fisiológicos de las plantas, incluyendo la fotosíntesis, la conductancia estomática y el contenido de clorofila, lo que se tradujo en un crecimiento vegetativo superior, mayor acumulación de biomasa e incremento en la producción de frutos. Los resultados confirman que *B. subtilis* F8 y K47 actúan como agentes de biocontrol eficaces al inducir la resistencia sistémica contra *C. cassiicola*; además, promueven el crecimiento y mejoran la salud fisiológica de las plantas de tomate, consolidándolas como alternativas para programas de agricultura sustentable.

IX. ANEXO GENERAL

Inoculación de *Bacillus subtilis* en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) crecidas a cielo abierto

Alecsis de Melchor Padrón-Chan*, Arturo Reyes-Ramírez

Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Conkal, Av. Tecnológico S/N,
97345, Conkal, Yucatán, México.

*Correspondencia: alecsis.padron@itconkal.edu.mx

**Publicado como artículo de difusión en Ciencia & Tecnología ITESCAM-Calkíni
2025; 4 (S4): 36, ISSN 2992-7692.**

Resumen. El tomate es una hortaliza de alto valor económico a nivel mundial. Para su crecimiento y desarrollo, se emplean comúnmente fertilizantes químicos; sin embargo, *Bacillus subtilis* representa una alternativa biológica prometedora, aunque su aplicación en cultivos de tomate a cielo abierto aún es limitada. En este estudio se evaluó el efecto de la inoculación de *B. subtilis* sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate cultivadas a cielo abierto. Se utilizaron plántulas de 25 días de edad, trasplantadas en campo abierto. Los tratamientos consistieron en la inoculación con *B. subtilis* F8 y *B. subtilis* K47 (DO = 0.8; 1 mL por planta), aplicados al momento del trasplante y nuevamente 15 días después. Se incluyó un grupo testigo sin inoculación. A los 42 días posteriores al trasplante se evaluaron variables de crecimiento y desarrollo. Se empleó un diseño completamente al azar, y los datos fueron analizados mediante ANDEVA y prueba de comparación de medias de Duncan ($p \leq 0.05$). Las plantas inoculadas con *B. subtilis* F8 mostraron un incremento significativo en altura y diámetro basal (31.3 % y 19.7 %, respectivamente) en comparación con el testigo. No se detectaron diferencias significativas en el coeficiente de esbeltez (altura/diámetro basal), ni en el número de flores entre tratamientos. No obstante, las plantas tratadas con *B. subtilis* F8 produjeron hasta cuatro veces más frutos que las del grupo testigo. Se concluye que la inoculación con *B. subtilis* F8 constituye una alternativa prometedora para mejorar el crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate en condiciones de campo abierto, contribuyendo al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles.

Palabras clave: crecimiento, floración, producción.