



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL

EFFECTO ANTIFÚNGICO DE HONGOS ENDÓFITOS DE
***Cucumis sativus* L. Y *Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.,**
CULTIVARES CRIOLLOS DE YUCATÁN

REPOSITORIO

Que presenta:

Diego Montañez de Azcué

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable

Director de tesis:

Dr. Jairo Cristóbal Alejo

Conkal, Yucatán, México

Diciembre, 2025



TecNM



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

**EFFECTO ANTIFÚNGICO DE HONGOS ENDÓFITOS DE
Cucumis sativus L. Y *Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.,
CULTIVARES CRIOLLOS DE YUCATÁN**

REPOSITORIO

Que presenta:

Diego Montañez de Azcué

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable

Director de tesis:

Dr. Jairo Cristóbal Alejo

Conkal, Yucatán, México

Diciembre, 2025



TecNM

Conkal, Yucatán, México, a 5 de diciembre de 2025

El comité de tesis del candidato a grado: Diego Montañez de Azcué, constituido por los CC. Dr. Jairo Cristóbal Alejo, Dr. Alberto Uc Vázquez, Dr. Arturo Reyes Ramírez, Dra. Felicia Amalia Moo Koh, Dra. María Marcela Gamboa Angulo, habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: EFECTO ANTIFÚNGICO DE HONGOS ENDÓFITOS DE *Cucumis sativus* L. Y *Lagenaria siceraria* (Molina) Standl., CULTIVARES CRIOLLOS DE YUCATÁN, 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 presentada en el examen de grado correspondiente.

ATENTAMENTE



Dr. Jairo Cristóbal Alejo
Director de Tesis



Alberto Uc Vázquez
Co-director de Tesis



Dr. Arturo Reyes Ramírez
Asesor de Tesis



Dra. Felicia Amalia Moo Koh
Asesora de Tesis



Dra. María Marcela Gamboa Angulo
Asesora de Tesis

Conkal, Yucatán, México a 5 de diciembre de 2025.

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.



Diego Montañez de Azcué

Índice de contenido

I. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Generalidades de las cucurbitáceas.....	1
1.1.2 Enfermedades fúngicas.....	3
1.1.3 Uso de fungicidas químicos	10
1.1.4 Los hongos endófitos	12
1.1.5 Hongos endófitos vs hongos fitopatógenos	14
1.2 Antecedentes.....	15
1.3 Hipótesis	19
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo general.....	19
1.4.2 Objetivos específicos	19
1.5 Procedimiento experimental	20
1.6 Literatura citada.....	21
II. CAPÍTULO 2. Aislamiento de hongos endófitos en cucurbitáceas criollas de Yucatán, México.....	32
III. CAPÍTULO 3. Efecto antifúngico <i>In vitro</i> de hongos endófitos de <i>Cucumis sativus</i> y <i>Lagenaria siceraria</i> , cultivares criollos de Yucatán, México.....	34
IV. CAPÍTULO 4. Hongos endófitos como promotores de crecimiento en <i>Cucumis sativus</i> y biocontrol de cenicilla	36

Resumen

Los requerimientos altos de humedad de las cucurbitáceas las exponen a infecciones por hongos fitopatógenos, al manchar, desfigurar y pudrir los órganos, lo que causa significativas pérdidas de producción. Como alternativa sustentable para el manejo de estos organismos, se han integrado estrategias de control biológico para reducir el uso de fungicidas de síntesis química; donde se emplean organismos antagonistas que compitan, parasiten o produzcan sustancias con efectos antibióticos y que promuevan el crecimiento de las plantas. Los hongos endófitos son microorganismos simbios de plantas, diversos y abundantes en regiones tropicales, con gran potencial como agentes biocontroladores de enfermedades fúngicas. El objetivo de este trabajo fue aislar e identificar hongos endófitos de órganos de cultivos criollos de *Cucumis sativus* y *Lagenaria siceraria*, para evaluar su actividad antifúngica mediante enfrentamientos duales y pruebas de antibiosis, así como su potencial para mejorar parámetros de crecimiento vegetal. Se identificaron 22 especies con efectos antifúngicos contra *Corynespora cassicola*, *Colletotrichum truncatum* y *Fusarium equiseti*, obteniendo rangos de inhibición de 17.72–100%, 16.51–91.55% y 4.64–91.89%, respectivamente. *Aspergillus flavus*, *Lasiodiplodia pseudotheobromae* y *Trichoderma longibrachiatum* exhibieron los mayores porcentajes de inhibición contra los tres fitopatógenos. Así mismo, estas tres especies demostraron efecto antifúngico en sus filtrados, al inhibir el crecimiento micelial de *F. equiseti* hasta en un 46.46%. En plantas de pepino blanco cv. Criollo (*Cucumis sativus*), estas especies endófitas también incrementaron significativamente el peso fresco de la parte aérea, el peso seco de su raíz, su biomasa seca y floración. Este trabajo representa un primer esfuerzo por conocer la diversidad y aplicaciones de hongos endófitos en los cultivos criollos de la región.

Abstract

The high humidity requirements of cucurbits expose them to infections by phytopathogenic fungi, staining, disfiguring and rotting the plant structures, causing significant production losses. Biological control strategies have been integrated to reduce the use of chemically synthesized fungicides; using antagonist organisms that compete, parasitize, produce substances with antibiotic effects, and promote plant growth. Endophytic fungi are plant symbiont microorganisms, diverse and abundant in tropical regions, with great potential as biocontrol agents of fungal diseases. The objective of this study was isolate and identify endophytic fungi from organs of creole cultivars of *Cucumis sativus* and *Lagenaria siceraria*, to evaluate their antifungal activity through dual confrontations and antibiosis tests, as well as their potential to improve plant growth parameters. We identified 22 species with antifungal effects against *Corynespora cassiicola*, *Colletotrichum truncatum*, and *Fusarium equiseti*, obtaining inhibition ranges of 17.72–100%, 16.51–91.55%, and 4.64–91.89%, respectively. *Aspergillus flavus*, *Lasiodiplodia pseudotheobromae*, and *Trichoderma longibrachiatum* exhibited the highest percentages of inhibition against the three phytopathogens. These three species of endophytes demonstrated antifungal effect in their filtered, inhibiting the mycelium growth of *F. equiseti* by up to 46.46%. In the plants of white cucumber cv. Creole (*Cucumis sativus*), these endophytes species significantly increased the fresh weight of the aerial part, the root dry weight, the dry biomass, and the flowering. This work represents a first effort to understand the diversity and applications of endophytic fungi in creole crops in the region.

I. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

1.1.1 Generalidades de las cucurbitáceas

La familia Cucurbitaceae cuenta con una reconocida importancia cultural, principalmente en Mesoamérica. México es el posible centro de origen de varias especies domesticadas, entre ellas, las calabazas del género *Cucurbita*, el chilacayote y el chayote. Dadas sus propiedades nutricionales, éstas y otras especies son reconocidas como parte fundamental de la dieta de varias culturas. En menor medida, también se refieren aplicaciones medicinales, ornamentales, como forraje y jabón (Eguiarte *et al.*, 2018).

Se reconocen 825 especies representantes de esta familia, las cuales se distribuyen principalmente en las regiones tropicales y subtropicales, aunque también se extienden hacia algunas zonas templadas de ambos hemisferios. En México, se registran 141 taxa, de las cuales 14 son especies cultivadas. De estas, destacan: *Citrullus lanatus* (sandía), *Cucurbita argyrosperma* (calabaza o pipiana), *C. ficifolia* (chilacayote), *C. maxima* (calabaza para semilla o chihua), *C. moschata* (calabaza de castilla), *C. pepo* (calabaza o calabacín), *Cucumis sativus* (pepino), *C. melo* (melón) y *Sechium edule* (chayote). En menor proporción, también se cultivan *Benincasa hispida* (calabaza china), *Lagenaria siceraria* (calabazo o tocomate), *Luffa acutangula* (luffa), *L. aegyptiaca* (estropajo) y *Sicana odorifera* (calabaza melona o curuguá) (Hora *et al.*, 2018).

En la península de Yucatán se han citado 27 especies, de las cuales 16 reportan algún uso o manejo por parte de las comunidades rurales. Además, en esta región se presentan diversos cultivares denominados criollos (Lira, 2004). El término “criollo” es definido como un organismo que, sin ser originario de la región, se ha adaptado al entorno por selección natural o artificial; dicho organismo tiende a adquirir características distintivas con respecto a otros miembros de su misma categoría taxonómica (Gutiérrez y Fitting, 2016).

Entre las cucurbitáceas criollas de la Península de Yucatán, destaca el pepino blanco, pepino indio o *sak* pepino (*C. sativus*), de forma herbácea y rastrera; con tallos angulosos, sulcados y pubescentes; hojas anchamente ovado-cordadas a suborbiculares de hasta 13 × 15 cm, de 3–5 lóbulos redondeados u obtusos; zarcillos angulosos; flores amarillas, monoicas, de 4–7 × 3–4 mm; frutos claviformes o piriformes, blancos y lisos o con surcos longitudinales tenues; y semillas elípticas o lanceoladas, de hasta 9 × 3 mm, amarillentas o blanquecinas.

Los frutos de este cultivar son ampliamente comercializados y consumidos en la región (Lira, 2004; Contreras-Cauich *et al.*, 2022).

El cultivar criollo del calabazo (*L. siceraria*) presenta forma herbácea, postrada a ascendente; con tallos ligeramente engrosados, ramificados, angulosos, sulcados y pubescentes a tomentosos; hojas anchamente ovado-cordadas a suborbiculares, de hasta 35 × 30 cm, de 3 lóbulos; zarcillos bífidos; flores amarillas, monoicas, de 10–20 × 6–10 mm; semillas obovado-oblongas, casi rectangulares, piriformes o triangulares, de 11–21 × 4–10 mm, color café claro a café oscuro. Con respecto al fruto, este cambia de verde a color café claro o café oscuro al madurar y presenta diferentes nombres en maya dependiendo de su morfología; la cual puede ser botuliforme y constreñida en la porción media (*Chúuj*), globosa o subglobosa (*lek*), claviforme o piriforme y pequeña (*Xtuch*) o claviforme y grande (*xk'echa*). Para dichos frutos se ha documentado la manufactura de recipientes para agua o alimentos, utensilios de cocina, juguetes, instrumentos musicales o artesanías (Lira, 2004; Grimaldo-Juárez *et al.*, 2018).

En el aspecto económico, las especies de cucurbitáceas domesticadas forman parte principal de diversos sistemas agrícolas en diferentes escalas. En 2023 se sembraron en México 18,768 ha de pepino, con una producción de al menos 1.02 millones de toneladas y valor de producción de \$ 7,873,913.00. Mientras que para las calabazas de diferentes especies se cultivaron 80,525 ha, con una producción de 0.68 millones de toneladas y valor de producción de \$ 5,365,723.00 (SADER, 2024¹). Parte de su éxito en los sistemas agrícolas, radica en su establecimiento y manejo relativamente sencillo. Sin embargo, entre sus requerimientos, destacan valores elevados de humedad relativa (Cuadro 1). En los sistemas de cultivo, principalmente en aquellos con requerimientos altos de humedad, es común exceder los límites fisiológicos de la planta; ya sea por una ineficiente administración de riego o ventilación, el uso de materiales inadecuados o por hacinamiento, entre otros factores.

¹SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2024. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/prensa/sistema-de-informacion-agroalimentaria-de-consulta-siacon> (consulta: febrero 2025).

Cuadro 1. Requerimiento de humedad de algunas cucurbitáceas cultivadas

Cultivo	Humedad relativa %)	Fuente
Melón	90–95	Monge-Pérez y Loría-Coto, 2019
Chayote	80–90	Román-Román y Quesada-Roldán, 2023
Sandía	74-82	Orrala <i>et al.</i> , 2019
Pepino	65–90	Meneses-Fernández y Quesada-Roldán, 2018
Calabaza	65–80	Román-Román <i>et al.</i> , 2022

El exceso de humedad tiende a desencadenar una serie de impactos negativos, como la disminución de la transpiración y la absorción de nutrientes, así como dificultades en la polinización. El efecto más notorio es el establecimiento de condiciones ambientales que tienden a favorecer, en conjunto con otros componentes, la diseminación de enfermedades (Hossain *et al.*, 2024).

1.1.2 Enfermedades fúngicas

En las plantas, las enfermedades interfieren con los procesos fisiológicos de desarrollo, crecimiento, reproducción y comprometen la supervivencia. Las especies son susceptibles a contraer enfermedades, pero las cultivadas lo son aún más, en parte, gracias a su poca diversidad genética. Éstas son ocasionadas por la exposición constante a factores bióticos y abióticos dispuestos en su entorno; entre ellos, la presencia de organismos patógenos potencialmente dañinos como virus, viroides, nematodos, bacterias y hongos (Du *et al.*, 2025).

El establecimiento de una enfermedad puede dividirse en tres etapas: la inoculación o el contacto del patógeno con un área susceptible de la planta; la incubación o el periodo de tiempo entre la llegada del patógeno y la aparición de los síntomas; y la infección o la aparición de los síntomas y signos, acompañados de la reproducción del patógeno. Los síntomas son las manifestaciones visibles de la enfermedad, mientras los signos son la evidencia directa de la presencia del patógeno, como la aparición de sus estructuras reproductivas (Obregón, 2017).

Además de la presencia de patógenos y los factores ambientales, como son la época del año, las condiciones climatológicas y las prácticas de cultivo, el reconocimiento entre patógeno y hospedero juega un papel fundamental para el establecimiento de una

enfermedad. El patógeno reconoce a su hospedero gracias a la presencia de moléculas específicas en la superficie de las células vegetales denominadas factores de reconocimiento. Esto permite al patógeno adherirse a la superficie de la planta y producir sustancias o estructuras indispensables para la infección (Masachis *et al.*, 2016).

Por su parte, la planta también debe ser capaz de reconocer al organismo infectante, a través de moléculas provenientes de las células del patógeno, conocidas como elicitores o PAMPS (patrones moleculares asociados a patógenos). Estas moléculas son captadas mediante receptores de la membrana plasmática vegetal y activan la transducción de señales en la célula, lo cual desencadena la expresión de genes que codifican proteínas involucrados con la defensa. Estas proteínas promueven la síntesis y acumulación de compuestos con actividad antimicrobiana de diversa naturaleza química (Boobalan y Girija, 2025).

El desarrollo de una enfermedad tiene lugar cuando la planta esta desprovista de los receptores bioquímicos para el reconocimiento del patógeno, por lo cual la activación de sus mecanismos de defensa no se lleva a cabo; o porque aun siendo reconocido, el patógeno cuenta con adaptaciones que neutralizan las defensas de la planta, como la síntesis de proteínas efectoras (Ramírez-Prado *et al.*, 2018).

Entre las enfermedades más importantes en la agricultura sobresalen las causadas por hongos fitopatógenos (HF), debido a la rapidez de propagación de sus infecciones, la frecuencia con la que se puede producir una reinfección y los daños causados en las plantas. Existen aproximadamente 8,000 especies de HF, los cuales representan el 65% de los agentes fitopatógenos. Los daños ocasionados por éstos varían, desde leves, hasta la muerte de tejidos (Li *et al.*, 2023).

Según su biología, los hongos pueden clasificarse en tres grupos no taxonómicos: necrótrofos, hemibiotrofos y biótrofos. Los hongos necrótrofos son descomponedores de materia orgánica, también llamados reductores o descomponedores, carentes de cualquier facultad patogénica o virulenta (DeMers, 2022). Los hemibiotrofos matan las células hospedantes desde etapas tempranas de la infección y tienden a parasitar tejidos inmaduros, viejos o dañados. Sus hifas secretan enzimas que alteran la permeabilidad de las células de la planta, provocando una rápida pérdida de agua y azúcares, así como la pérdida de control sobre sus actividades metabólicas. Posteriormente, las enzimas extracelulares fúngicas, como celulasas y pectinasas, comienzan a degradar las paredes celulares vegetales, ocasionando la maceración y consecuente muerte de células y tejidos. Las lesiones visibles de este tipo de

infecciones consisten en pudriciones de órganos, frutos y tubérculos, con la aparición de áreas acuosas, usualmente de color café, así como marchitamientos. Los hongos hemibiotrofos son parásitos facultativos, por lo que pueden sobrevivir como saprobios en el suelo, desarrollando esporas de resistencia o esclerocios (masas compactas de micelio endurecido con reservas nutricionales), para su persistencia en estado de latencia durante largos periodos de tiempo (Mazumdar *et al.*, 2021).

Muchas especies hemibiotrofas presentan un amplio rango de hospederos y son cosmopolitas. Es decir, una sola especie es capaz de infectar más de un cultivo en diferentes regiones del mundo. Por ejemplo, *Corynespora cassiicola* es capaz de parasitar 500 especies vegetales (Aguiar *et al.*, 2022); mientras que *Colletotrichum gloeosporioides* está relacionada con más de 1,000 especies de plantas (Zapata *et al.*, 2024). No obstante, también existen cepas de un mismo taxón especializadas en cuanto a hospederos, denominadas formas especiales (f. sp.). Por ejemplo, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, es específico para tomate (*Solanum lycopersicum*) (Viana *et al.*, 2024), mientras que *F. oxysporum* f. sp. *melonis*, tiene afinidad por el melón (Haegi *et al.*, 2017).

Los hongos biótrofos son parásitos obligados que obtienen sus nutrientes a partir de células vivas de una gama restringida de hospedantes, a veces, a una sola especie o variedad de planta. Por lo tanto, si las células del hospedero mueren, el hongo suele producir esporas para transmitirse a otros hospederos o entrar en estado de latencia mediante estructuras de resistencia. Este comportamiento tan especializado dificulta el cultivo de muchas especies en condiciones de laboratorio. Los hongos biótrofos son capaces de entrar a la planta a través de superficies intactas o aberturas naturales como estomas y lenticelas, produciendo hifas infectivas y enzimas que atraviesan las paredes celulares vegetales e invaginan las membranas plasmáticas para absorber nutrientes (Jaswal *et al.*, 2020).

Las plantas infectadas por hongos biótrofos exhiben síntomas de deficiencias nutricionales crónicas, observándose una menor producción de frutos y semillas, pérdida de vigor o defoliaciones, como en el caso del pepino infectado por *Pseudoperonospora cubensis* (Bommesh *et al.*, 2025). También son comunes las hiperplasias e hipertrofias, resultantes de desequilibrios hormonales en sus tejidos, como en pastos y gramíneas infectados por *Claviceps purpurea* (Ding *et al.*, 2022).

Algunas especies de HF son consideradas hemibiótrofas. Es decir, inician la infección con una etapa biótrofa, la cual modifican a necrótrofa, dependiendo de las condiciones del

entorno o su ciclo de vida. Ejemplo de este comportamiento lo presenta *Phytophthora infestans*, causante del tizón tardío del tomate y la papa (*Solanum tuberosum*) (Mazumdar *et al.*, 2021).

Casi todas las cucurbitáceas son susceptibles a las mismas enfermedades fúngicas, ocasionadas tanto por especies hemibiotrofas como por biótrofas, las cuales pueden infectar a las plantas en diferentes órganos y etapas de desarrollo. Los síntomas y signos varían dependiendo de la susceptibilidad y la edad del cultivo, así como de la prevalencia de condiciones ambientales predisponentes (Cuadro 2).

Cuadro 2. Principales enfermedades fúngicas de cucurbitáceas en regiones tropicales

Enfermedad	Patógeno	Síntomas y signos	Factores ambientales	Fuente
Oídio, cenicilla, blanquilla o mildiu polvoriento	<i>Blumeria</i> spp. <i>Erysiphe</i> <i>cichoracearum</i> <i>Sphaerotheca</i> <i>fuliginea</i>	Hojas amarillentas y con moho blanco en ambas caras. Defoliación y frutos con escaldaduras.	Alta humedad relativa Temperatura de 20– 27° C. Baja luminosidad	Yáñez Juárez <i>et al.</i> , 2014
Mildiu velloso o mildiu lanoso	<i>Pseudoperonospora</i> <i>cubensis</i>	Haz y envés de hojas con manchas pequeñas, verde pálido a amarillo brillante, angulares, delimitadas por nervaciones. Envés con moho lanoso, blanco grisáceo a púrpura.	Alta humedad relativa. Temperatura de 15– 20° C.	Obregón, 2017
Mancha foliar o tizón de fuego	<i>Corynespora</i> <i>cassiicola</i>	Hojas con manchas angulares bien definidas, amarillas que cambian a color café claro y luego a gris. El centro de la	Alta humedad relativa. Temperatura de 25– 35° C.	Caetano <i>et al.</i> , 2018

		mancha se rompe y el tejido se desprende.		
Podredumbre	<i>Pythium</i> spp. <i>Rhizoctonia solani</i>	Marchitamiento de plántulas. Podredumbre de semillas, base del hipocótilo, raíz principal y raicillas.	Suelo húmedo. Temperatura cálida.	Toporek y Keinath, 2021
Marchitez gomosa del tallo, tizón gomoso o podredumbre negra	<i>Didymella bryoniae</i> (= <i>Mycosphaella</i> <i>melonis</i>)	Tallos y peciolo con estrías verdes, que cambian a color café claro u oscuro y con exudado gomoso de color óxido o ámbar. Hojas con manchas oscuras. Presencia de picnidios en lesiones.	Clima cálido y húmedo. Exceso de lluvias.	Obregón, 2017
Podredumbre blanca o moho blanco	<i>Sclerotinia</i> <i>sclerotiorum</i>	Tallos, hojas y frutos con pudriciones, cubiertos por micelio blanco algodonoso. Aparición de estructuras oscuras y duras (esclerocios).	Humedad relativa >80%. Exceso de riego. Temperatura 15–18° C.	Obregón, 2017
Podredumbre del tallo y raíz	<i>Phytophthora</i> spp.	Hojas viejas necrosadas. Tallos y frutos en contacto	Temporadas lluviosas.	Obregón, 2017

		con el suelo con putrefacciones y micelio blanco abundante. Plántulas marchitas.	Temperatura de 11–35° C, con óptima de 28° C.	
Mancha foliar por <i>Alternaria</i>	<i>Alternaria cucumerina</i>	Hojas con machas pequeñas traslúcidas, color café claro u oscuro, rodeado de halo clorótico con crecimiento en anillos concéntricos.	Exceso de riego. Temperatura >15° C.	Obregón, 2017
Mancha foliar por <i>Cercospora</i>	<i>Cercospora citrullina</i>	Hojas viejas con manchas pequeñas, circulares, color café ocre a negro, con centro blanco y halo amarillo.	Exceso de riego. Temperatura de 25–30° C.	Obregón, 2017
Fusariosis	<i>Fusarium</i> spp.	Plantas y plántulas entera o parcialmente marchitas. Tejido vascular oscuro. Guías con estrías necróticas, con exudado color café. Pudriciones de apariencia corchosa o esponjosa, cubiertas de masas de esporas blancas o rosas.	Alta temperatura ambiente. Sequía. Suelo arenoso con pH 5–6 y bajo contenido de humedad.	Rahman <i>et al.</i> , 2021

Antracnosis	<i>Colletotrichum</i> spp.	Hojas con manchas irregulares, color café claro, café rojizo a oscuro, con halo clorótico, ligeramente hundidas y aceitosas o acuosas. Tallos con lesiones bronceadas, hundidas y alargadas. Frutos maduros con manchas irregulares y oscuras. Lesiones con masas de esporas color salmón y apariencia viscosa.	Clima húmedo y lluvioso.	Obregón, 2017
-------------	----------------------------	---	--------------------------	---------------

Las enfermedades de las cucurbitáceas, así como las de otras hortalizas y árboles frutales, reducen el rendimiento y la calidad de producción. Estas afectaciones no solo se relacionan con la muerte de las plantas de un cultivo. Las sobrevivientes tienden a ser fuente de productos con manchas, deformaciones o pudriciones, depreciándose en el mercado por ver comprometidas, tanto su estética, como sus propiedades organolépticas (Anand y Rajeshkumar, 2022).

Dichos impactos económicos se han cuantificado en 5–25% en países desarrollados y 20–50% para países en desarrollo (Farah *et al.*, 2025). *Corynespora cassiicola* disminuye hasta el 40% de los rendimientos (Edwards *et al.*, 2019); *Colletotrichum truncatum* genera mermas de hasta 80% del cultivo (Torres-Calzada *et al.*, 2018); y la marchitez por *Fusarium* spp. está asociada con pérdidas hasta por 253 millones de dólares anuales (Adedire *et al.*, 2023).

1.1.3 Uso de fungicidas químicos

Reducir las pérdidas resultantes del bajo rendimientos de un cultivo por enfermedad implica un incremento en los costos de producción, tanto para controlar las enfermedades, como para prevenir o disminuir la incidencia, reincidencia y severidad. La estrategia más difundida y empleada se ha basado en la aplicación de fungicidas de síntesis química. Por ejemplo, Obregón (2017) recomendó el uso de mancozeb, metalaxil, fluopicolide, propamocarb, clorotalonil y folpet para el tratamiento de mildiu por *P. cubensis* en pepino, calabaza y sandía. Dependiendo de su composición química, los fungicidas pueden mostrar diferente actividad en los hongos objetivo. Así, pueden inhabitar la formación del citoesqueleto, inhibir la síntesis de lípidos de membrana plasmática o afectar la respiración mitocondrial. Los fungicidas son medidas rápidas, prácticas, económicamente viables y con alta efectividad en el manejo de enfermedades para prácticamente todos los cultivos, promoviendo un uso constante y en ocasiones, excesivo e indiscriminado (Basit *et al.*, 2021).

Dicha situación resulta perjudicial desde diferentes aspectos. Al tratarse de organismos vivos, las poblaciones de HF tienen la capacidad de adaptarse a las condiciones de su ambiente, a través de mutaciones aleatorias heredables en los sitios de acción de los fungicidas. Por lo tanto, la exposición constante a cierto producto o la administración inadecuada de las dosis, puede dar lugar a cepas agresivas y resistentes. De esta forma, los ingredientes activos reducen su vida útil se dificulta y el manejo de las enfermedades (Carmona y Sautua, 2017).

El incremento del uso de fungicidas sintéticos también conlleva un impacto ambiental relacionado con su acumulación en los ecosistemas y agrosistemas, detectándose incluso en regiones lejanas al sitio de su aplicación, convirtiéndose en una de las principales fuentes de contaminación de agua superficial y subterránea (Bedmar *et al.*, 2015). Los fungicidas también contienen compuestos orgánicos volátiles tóxicos que afectan la calidad del aire (Li *et al.*, 2019). Estas sustancias se acumulan en la cadena trófica y pueden ser letales para microorganismos benéficos, invertebrados, peces, aves y mamíferos, afectando la polinización y la dispersión de semillas (Botías y Sánchez-Bayo, 2018). Pueden interferir en los ciclos biogeoquímicos, obstaculizar la formación y fertilidad del suelo, promover su salinización y erosión, disminuyendo la productividad (García-Delgado *et al.*, 2019).

La continua exposición a fungicidas también es perjudicial para la salud humana. Se han referido enfermedades neurológicas, afecciones dermatológicas, hepáticas, sanguíneas y

malformaciones congénitas causadas por exposición a pesticidas, relacionadas con un mal manejo, el consumo de alimentos contaminados o la inhalación de aire con concentraciones importantes de los mismos (Lascano *et al.*, 2019; Beyuo *et al.*, 2024). Herrera *et al.* (2015) examinaron el suelo de viviendas de una comunidad en Chiapas, cercana a cultivos con aspersiones aéreas de mancozeb, detectando elevadas concentraciones de manganeso, el cual es tóxico para humanos en altas concentraciones. Muñoz-Quezada *et al.* (2014) y Santos-Luna *et al.*, (2015) evidenciaron la presencia de fungicidas organofosforados en poblaciones de regiones rurales de Chile y Ecuador, respectivamente, relacionada con el consumo de vegetales con trazas residuales.

Para reducir las diversas afectaciones ocasionadas por los fungicidas, se propone su incorporación a un sistema integral de manejo preventivo de enfermedades. El objetivo es reducir el uso de productos químicos sintéticos en la agricultura, pero con parámetros físicos, químicos y microbiológicos restrictivos de las condiciones para el crecimiento de HF. Sharma *et al.* (2024) propusieron el control de la humedad del suelo a través de sistemas de riego eficientes, la integración de líneas de plantas morfológica y genéticamente resistentes a patógenos, la promoción de biotecnologías para la inducción de sistemas de resistencia vegetal, la implementación de sistemas de rotación y cobertura de cultivos, la solarización del suelo, la complementación del suelo con aditivos para mejorar sus propiedades físico-químicas y el uso de productos biorracionales.

Los productos biorracionales son aquellos cuyo origen es principalmente biológico, aunque también son considerados los de origen químico, con bajo impacto ambiental. Se caracterizan por su rápida degradación, compatibilidad con las relaciones ecológicas involucradas, bajo riesgo de generar resistencia en organismos patógenos, estándares de seguridad certificados y eficacia en cuanto a su uso. Estos pueden ser productos de fermentación, derivados botánicos o incluso microorganismos vivos (Khoulati, 2025). Con el uso de microorganismos vivos se apuesta por el control biológico como una de las alternativas del manejo integrado de enfermedades. El control biológico o biocontrol implica utilizar un ser vivo antagónico para disminuir la población de otro ser vivo (Stirling y Stirling, 1997). Entre los microorganismos empleados para tal fin, destacan los hongos endófitos.

1.1.4 Los hongos endófitos

Los hongos endófitos (HE) son asociaciones microbianas asintomáticas relacionadas con tejidos vegetales internos sanos, capaces de conferir beneficios, coevolucionar y alterar el estilo de vida de las plantas con las cuales cohabitan, dependiendo de las condiciones de vida de la planta en sí y de las condiciones ambientales (Liao *et al.*, 2025). Actualmente se han registrado 70 órdenes, 878 géneros y 2,771 especies en asociación con algas, musgos, helechos, coníferas y angiospermas. Destacan *Alternaria*, *Aspergillus*, *Colletotrichum*, *Fusarium*, *Penicillium*, y *Xylaria* como los géneros más citados en la literatura (Rashmi *et al.*, 2019).

La diversidad de HE varía dependiendo de la especie hospedante, la edad de la planta, el ecosistema, la ubicación geográfica y factores ambientales como la temperatura. Existen grupos de HE exclusivos de zonas tropicales, y zonas templadas; por lo tanto, la composición de especies es muy diferente entre ambas zonas. En el trópico suele haber mayor diversidad y abundancia, así como una aparente menor especificidad de hospedero, pero una mayor especificidad en cuanto al tejido colonizado (Álvarez *et al.*, 2020; Oses-Pedraza *et al.*, 2021). En las zonas tropicales, 90–100% de las hojas están colonizadas por endófitos, formando comunidades fúngicas en donde interactúan especies muy abundantes y especies poco comunes. Las hojas son el órgano en donde se han detectado mayor diversidad, aunque también están en raíces, tallos, flores, frutos y semillas (Verma *et al.*, 2022; Liao *et al.*, 2025). Nascimento *et al.* (2015) hallaron una mayor diversidad en las hojas maduras, en comparación con las hojas jóvenes de una misma planta.

La forma de transmisión de los HE entre los hospederos es principalmente horizontal, mediante esporas y fragmentación de hifas. No obstante, también se ha observado una alta frecuencia de transmisión vertical, mediante la colonización de las semillas (Panaccione *et al.*, 2014; Verma *et al.*, 2024). Durante las estaciones húmedas, una sola hoja de un árbol tropical a nivel del sotobosque puede recibir más de 15,000 propágulos fúngicos viables al día. Así, cada hoja alberga aproximadamente una docena de especies y un solo árbol puede estar relacionado hasta con 1,000 taxa de HE (Liao *et al.*, 2025).

El principal objetivo de un HE después de llegar a su hospedero, es colonizarlo. Por lo tanto, su primer obstáculo es el arsenal de defensas desplegado por las plantas ante cualquier microorganismo invasor. En respuesta, los HE producen metabolitos secundarios que contrarrestan las defensas vegetales y les permiten establecerse (Fontana *et al.*, 2021). Por lo

general, los HE son inofensivos para su planta hospedante, pero sí ejercen efectos benéficos en sus actividades fisiológicas; lo cual confiere a las plantas cuatro ventajas adaptativas principales:

- 1) Tolerancia a cambios ambientales. Los HE tienden a aumentar la biosíntesis de ciertos compuestos en condiciones de estrés significativo, como elevadas temperaturas, salinidad y sequía. Entre estas se pueden mencionar el ácido abscísico, el cual reduce la pérdida de agua como consecuencia de un incremento del cierre de estomas; y el ácido salicílico, activador de la resistencia sistémica para prevenir la pérdida de biomasa (Khan *et al.*, 2020; Basit *et al.*, 2021).
- 2) Estimulación de crecimiento. Compuestos como giberelinas, flavonoides y citoquininas, sintetizados por diversas especies de HE, fungen como promotores de crecimiento, incrementando altura, diámetro del tallo, longitud de raíz y biomasa (Candelero *et al.*, 2015; Mooh-Koh *et al.*, 2017). También participan en el aumento de la superficie foliar, mejoran la asimilación de nitrógeno (Liu *et al.*, 2016) y promueven la germinación y el crecimiento de la plántula (Ortiz-Espinoza *et al.*, 2020; Díaz-Valenzuela *et al.*, 2024).
- 3) Prevención de la depredación. Algunas especies endófitas, como *Undifilum* spp., producen alcaloides tóxicos en las semillas de leguminosas de los géneros *Astragalus*, *Oxytropis* y *Swainsona*; y en semillas de las familias Convolvulaceae y Malvaceae; lo cual se infiere disminuye el consumo de estas por herbívoros y facilita la colonización de hábitats por parte de las plantas (Panaccione *et al.*, 2014; Ortiz-Espinoza *et al.*, 2020).
- 4) Defensa frente a enfermedades. Se ha comprobado su papel en la reducción de la incidencia y severidad de enfermedades ocasionadas por diversas especies de organismos, como virus, bacterias, protistas, hongos patógenos y nematodos (Fontana *et al.*, 2021). Uno de los mecanismos de acción principales es la inducción de la resistencia de la planta hospedera, a través de la modulación de los genes vegetales relacionados con el sistema de defensa, tanto adquirido, como inducido (Busby *et al.*, 2015). Otros mecanismos relacionados con este punto se abordarán en la siguiente sección.

Debido a su exitosa estrategia mutualista, se ha favorecido la manufactura e implementación de bioproductos a base de algunas especies de HE, como parte de un manejo sustentable y con amplios beneficios en la agricultura, actualmente utilizada y con resultados exitosos (Thambugala *et al.*, 2020). Gracias al amplio rango de hospederos de muchas especies, las cepas probadas en un cultivo pueden tener efectos positivos, aun siendo aisladas

de otros cultivos e incluso de plantas silvestres de diferentes taxa. Por ejemplo, *Penicillium chrysogenum*, endófito de la planta silvestre del desierto egipcio *Asclepias sinaica*, demostró promoción de crecimiento y antibiosis en maíz (*Zea mays*) (Fouda *et al.*, 2015).

Otras ventajas del uso de HE en la agricultura son sus altas tasas de reproducción; su rápido crecimiento; el que sean relativamente fáciles de cultivar y controlar; y su tendencia a atacar patógenos específicos, sin perjudicar a otros seres vivos relacionados. Además, al morir su hospedero, muchas especies endófitas cambian a un estilo de vida saprobio e incorporándose al ecosistema o al agrosistema (Thambugala *et al.*, 2020).

1.1.5 Hongos endófitos vs hongos fitopatógenos

Thambugala *et al.* (2020) demostraron la actividad de 300 especies de hongos endófitos como agentes de biocontrol fúngico, con nueve géneros como los mejor representados: *Alternaria*, *Aspergillus*, *Candida*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Pichia*, *Talaromyces*, *Trichoderma* y *Verticillium*. *Trichoderma* encabezó la lista con 25 especies.

El género *Trichoderma* está asociado a una gama de plantas silvestres y cultivadas. *Trichoderma* ha sido ampliamente utilizado en agricultura debido a su eficacia contra diversas enfermedades fúngicas que afectan cultivos de importancia comercial (Baron *et al.*, 2019). Khan *et al.* (2020) referenciaron este taxón como “el más potente agente de biocontrol usado en la actualidad”, pues provee a varias industrias de una amplia gama de compuestos antimicrobianos y promotores de crecimiento, a la vez que sus necesidades nutricionales son mínimas.

Después de *Trichoderma*, los géneros *Aspergillus* y *Penicillium* figuran como importantes agentes de biocontrol. Di Canito *et al.* (2021) reportaron seis especies endófitas de *Aspergillus* y cuatro de *Penicillium* con aplicaciones en el biocontrol de hasta 26 especies de HF de la uva (*Vitis* sp.) en su etapa postcosecha.

Los tejidos vegetales representan atractivas fuentes de nutrientes y espacio, disponibles para una gran diversidad de microorganismos, incluyendo HE y HF. Los HE tienden a presentar mayor diversidad en un microhábitat en comparación con los HF (Liao *et al.*, 2025). Muchas especies endófitas suelen ser eficientes al competir por los recursos. Esto se debe a mayores tasas de crecimiento (Khan *et al.*, 2020) y una motilidad activa más eficaz, en respuesta quimiotáctica a atrayentes vegetales, como aminoácidos y azúcares específicos.

Dichos atrayentes puede provenir de un órgano específico, como raíces, semillas o frutos y favorecer la colonización por organismos benéficos (Singh *et al.*, 2014).

Además de la competencia, el micoparasitismo también representa una importante interacción antagónica entre HE y HF. Así, los HE se vuelven parásitos de los propios patógenos, sujetándolos, penetrando sus hifas y nutriéndose de ellos a través de apresorios, llegando a detonar la lisis celular (González *et al.*, 2020).

Otro mecanismo observado en HE, coadyuvante a hacer frente a las enfermedades causadas por HF, es la antibiosis; es decir, la secreción de compuestos dirigidos a eliminar al patógeno, como metabolitos primarios, metabolitos secundarios o enzimas hidrolíticas (Khunnamwong *et al.*, 2019). Los metabolitos con efecto antifúngico suelen detonar su efecto tóxico a bajas concentraciones. También pueden promover la aparición de alteraciones morfológicas en los patógenos, como crecimientos anormales e hinchazón en las puntas de las hifas, lo cual impide la correcta nutrición y desarrollo del hongo (Terhonen *et al.*, 2016). Entre las enzimas, destacan las quitinasas, desintegradoras de las paredes celulares fúngicas, resultando en la muerte del patógeno. También figuran las proteínas detoxificantes, las cuales se unen a las toxinas de algunos HF, provocando la reducción de su virulencia (Ortiz-Espinoza *et al.*, 2020).

En condiciones de laboratorio, algunas especies de HE no pueden ser cultivadas o manifiestan efectos diferentes de los observados *in vivo*. Es importante considerar el papel bioquímico de la planta hospedante o de otros microorganismos interactuantes, para así lograr un aprovechamiento eficiente de los HE, no solo con respecto a sus efectos antifúngicos, sino a sus beneficios potenciales (Arce-Torres *et al.*, 2020).

1.2 Antecedentes

Se han realizado estudios bioprospectivos en 11 especies de cucurbitáceas cultivadas, para los cuales se han llevado a cabo aislamientos, identificaciones moleculares y evaluaciones del efecto de sus HE, encontrando la existencia de hasta 90 géneros relacionados con estas plantas. En dichos estudios se ha evaluado el antagonismo de algunas especies contra 13 taxa de HF de importancia agrícola (Huang *et al.*, 2020).

Kim *et al.* (2007) encontraron actividad antimicótica significativa en cinco cepas provenientes de la raíz de *Cucumis sativus*, una de raíz y una de hoja de *Cucurbita pepo*. Las cepas demostraron control de la enfermedad de 93–100% en pruebas *in vivo* contra *P.*

infestans en plantas de tomate. *Fusarium*, *Coniochaeta* y *Talaromyces* fueron los géneros más efectivos, destacando cepas no patógenas de *F. oxysporum*.

Tymon *et al.* (2020) registraron 617 cepas de HE de raíces de *Citrullus lanatus*, *Cucurbita pepo* y *C. maxima* × *C. moschata*. Los géneros mejor representados fueron *Fusarium*, *Epicoccum* y *Cladosporium*. Sin embargo, fueron cepas de *Dichotomopilus* sp., *Epicoccum* sp., *Microdochium* sp. y *Schizotechium* sp. las que disminuyeron significativamente el área de crecimiento del patógeno *Verticillium dahliae* en cultivos duales. Posteriormente, estas cuatro cepas endófitas fueron sometidas a pruebas *in vivo* en *C. pepo*. Las plantas infectadas con *V. dahliae* e inoculadas con los HE mostraron mayor vigor, peso fresco y peso seco en raíces, en comparación con las plantas infectadas no inoculadas. Aunque no se demostró la disminución en los síntomas de la enfermedad, sí se reportó la reducción de unidades formadoras de colonia.

En raíces y tallos de *C. lanatus* se aislaron e identificaron 347 cepas de HE, de las cuales se seleccionaron siete especies con reportes previos de actividad antifúngica: *Aureobasidium pullulans*, *Bionectria ochroleuca*, *Ceratobasidium* sp., *Epicoccum purpurascens*, *Myrothecium verrucaria*, *Trichoderma harzianum* y *T. lentiforme*. Ninguna especie de *Fusarium*, *Giberella* y *Alternaria* fue seleccionada, pero estos géneros demostraron mayor prevalencia, con 31%, 9% y 7%, respectivamente. Las especies seleccionadas se enfrentaron en cultivos duales contra los patógenos *F. oxysporum* f. sp. *melonis*, *F. oxysporum* f. sp. *niveum*, *Monosporascus cannonballus*, *Macrophomina phaseolina*, *Neocosmospora cucurbitae*, *N. keratoplastica* y *N. petroliphila*, aislados previamente de sandía, melón y calabaza. *T. harzianum* demostró las mayores tasas de inhibición, con 39.2–93.4%. En pruebas *in vivo*, *T. lentiforme* redujo a 0% las infecciones de *M. phaseolina* y *N. cucurbitae* en sandía y de *F. oxysporum* f. sp. *melonis* en melón. A su vez, se evidenció un comportamiento hiperparasitario para las especies de *Trichoderma* seleccionadas (González *et al.*, 2020).

Trichoderma erinaceum, *T. harzianum*, *T. helicum* y *T. viride* aislados de *C. melo*; así como *Aspergillus flavus*, *A. fumigatus*, *A. niger*, *A. terreus* y *Penicillium digitatum*, extraídos de *C. lanatus*, también han demostrado eficacia en la prevención de *F. oxysporum* f. sp. *melonis*, *F. oxysporum* f. sp. *niveum*, *M. phaseolina* y *N. cucurbitae*; así como mejoras en parámetros de crecimiento de estos mismos cultivos (Boughalleb-M'Hamdi *et al.*, 2018).

González *et al.* (2020) fermentaron extractos de *Epicoccum purpurascens* aislado de *C. lanatus* para evaluaciones de antibiosis. Se reportó el mayor efecto en la reducción del radio de crecimiento de *F. oxysporum* f. sp. *niveum* (de 34 mm a 18 mm) en extractos de 15 días de fermentación a 2% de concentración. Derbalah y Elkot (2011) utilizaron filtrados de HE aislados de cucurbitáceas para evaluar el biocontrol de *Sphaerotheca fuliginea* en *C. sativus*. Los filtrados de *Epicoccum nigrum*, *E. minitans* y *T. viride* mostraron alta efectividad al ser combinados con el fungicida penconazole, la cual fue menor en los tratamientos en los que solo se utilizó el fungicida.

Huang *et al.* (2020) evaluaron el potencial antifúngico de 1,044 cepas aisladas previamente (Mu *et al.*, 2010; Xue *et al.*, 2015) en raíces, tallos y hojas de las cucurbitáceas *Benincasa hispida*, *C. lanatus*, *C. melo*, *C. sativus*, *C. moschata*, *Lagenaria siceraria*, *Luffa cylindrica*, *Momordica charantia* y *Trichosanthes cucumerina*. Los géneros *Colletotrichum*, *Alternaria*, *Fusarium* y *Penicillium* fueron los más diversos. En cultivos duales, 18 cepas inhibieron más del 80% del crecimiento de los patógenos *F. oxysporum* f. sp. *cucumerinum*, *R. solani* y *Sclerotinia sclerotiorum*. Durante evaluaciones *in vivo* en *C. sativus*, 35 cepas demostraron eficacia en el control de más del 80% de los tres HF evaluados, además de efectos promotores de germinación y crecimiento.

La interacción antagónica mas frecuentemente observada ha sido la competencia (55.9%), seguida del micoparasitismo (23.9%) y la antibiosis (20.2%) (Huang *et al.*, 2020). Park *et al.* (1988) describieron un caso de interacción entre la bacteria endófita *Pseudomonas putida* y cepas no patogénicas de *F. oxysporum*, aisladas de raíces de *C. sativus*, como una alternativa de biocontrol frente al patógeno *F. oxysporum* f. sp. *cucumerinum*.

En los trabajos revisados se han hecho bioprospecciones de hojas, tallos o raíces; con excepción de Mu *et al.* (2010), quienes también tomaron aislamientos de tejidos de frutos de *C. sativus*, para los cuales se presentaron bajos porcentajes de colonización por HE. Huang *et al.* (2012) registraron la diversidad de HE de flores y frutos de *M. charantia*, la cual fue menor a la registrada en tallos, pero mayor a la observada en raíces. Los efectos de cepas aisladas de flores, frutos y semillas de cucurbitáceas no han sido reportados.

La identificación molecular de las especies de HE suele realizarse mediante la técnica de amplificación de las regiones ITS del ADN ribosomal, lo cual es comúnmente empleado para especies fúngicas (White *et al.*, 1990). Sin embargo, para la descripción de especies nuevas, también se ha recurrido a marcadores moleculares como la calmodulina (CaM), el factor de

elongación (EF1), la tubulina (TUB), la unidad grande del ARN ribosoma (LSU) y la actina (ACT) (Su *et al.*, 2016, 2017; Su y Niu, 2018).

La mayoría de los estudios en cucurbitáceas se han hecho con cultivos pertenecientes a regiones templadas y unos pocos en zonas semi-áridas. El único estudio en regiones tropicales describió la colonización endofítica de una cepa de *Pochonia chlamydosporia* en raíces de pepino y melón cultivados en Cuba, con efectos positivos en el crecimiento vegetal (Ceiro-Catasú *et al.*, 2021). Sin embargo, actualmente no se ha considerado el aislamiento de HE en cultivares tropicales, por lo que se desconoce la diversidad y sus potenciales efectos para dichos cultivos. Por lo tanto, trabajar en regiones inexploradas y con plantas hospedantes no estudiadas para incrementar el inventario de especies y de sus aplicaciones biotecnológicas, principalmente en zonas tropicales, donde la diversidad de organismos suele ser mayor. En Yucatán, se desarrolla una gran variedad de cultivares criollos de cucurbitáceas, que representan microhábitats inexplorados, con interacciones particulares y una biodiversidad que conviene estudiar.

1.3 Hipótesis

Al menos un hongo endófito aislado de cultivares criollos de cucurbitáceas interfiere en el desarrollo de hongos fitopatógenos y mejora la sanidad y el crecimiento del cultivar criollo de *Cucumis sativus*.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el potencial antifúngico de los hongos endófitos asociados con cultivares criollos de *Cucumis sativus* y *Lagenaria siceraria* de Yucatán.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Aislar e identificar hongos endófitos a partir de diferentes órganos de los cultivares criollos de *C. sativus* y *L. siceraria*.
2. Evaluar *in vitro* el efecto antagónico de los hongos endófitos aislados de *C. sativus* y *L. siceraria* contra tres hongos fitopatógenos de importancia en cucurbitáceas tropicales: *Corynespora cassicola*, *Fusarium equiseti* y *Colletotrichum truncatum*.
3. Evaluar *in vitro* el efecto antifúngico de filtrados obtenidos a partir de los hongos endófitos aislados, contra *C. cassicola*, *F. equiseti* y *C. truncatum*.
4. Evaluar *in vivo* el efecto antagónico de los hongos endófitos aislados de cucurbitáceas contra tres especies de hongos fitopatógenos, en el cultivar criollo de *C. sativus*.
5. Medir parámetros de crecimiento vegetal en el cultivar criollo de *C. sativus*, como resultado de su inoculación con hongos endófitos.

1.5 Procedimiento experimental



Figura 1. Procedimiento experimental

1.6 Literatura citada

- Adedire, D. E., T. E. Owoeye, O. M. Farinu, W. F. Ogundipe, and O. M. Adedire. 2023. Management of *Fusarium* wilt disease of maize (*Zea mays* L.) with selected antimycotic plant extracts and inhibitory *Bacillus* strains. *Curr. Microbiol.* 80: 204. DOI: 10.1007/s00284-023-03302-3
- Aguiar, F. M., G. E. Vallad, S. Timilsina, J. S. Veloso, M. E. N. Fonseca, L. S. Boiteux, and A. Reis. 2022. Phylogenetic network analysis of South and North American *Corynespora cassiicola* isolates from tomato, cucumber, and novel hosts. *Eur. J. Plant. Pathol.* DOI: 10.1007/s10658-022-02505-x
- Álvarez, M. I., J. C. Cárdenas, and L. F. García. 2020. Endophytic fungal community associated with Colombian biodiversity. *In: Choudhary, G. (ed), Endophytes: Biology and Biotechnology.* Springer, pp. 85–102. DOI: 10.1007/978-3-030-53506-3_5
- Anand, G., and K. C. Rajeshkumar. 2022. Challenges and threats posed by plant pathogenic fungi on agricultural productivity and economy. *In: Rajpal, V. R., I. Singh, and S. S. Navi, (eds), Fungal diversity, ecology and control management.* Fungal Biology. Springer, Singapur, pp: 483–493. DOI: 10.1007/978-981-16-8877-5_23
- Arce-Torres, L. F., I. Gómez-Díaz, M. Monge-Artavia, y J. Prado-Cordero. 2020. Metabolitos secundarios con actividad medicinal extraídos de hongos provenientes de Centroamérica. *Tecnol. Marcha* 33(3): 1–12. DOI: 10.18845/tm.v33i3.4416
- Baron, N. C., E. C. Rigobelo, and D. C. Zied. 2019. Filamentous fungi in biological control: current status and future perspectives. *Chil. J. Agric. Res.* 79: 307–315. DOI: 10.4067/s0718-58392019000200307
- Basit, A., S. T. Shah, I. Ullah, I. Ullah, and H. I. Mohamed. 2021. Microbial bioactive compounds produced by endophytes (bacteria and fungi) and their uses in plant health. *In: Mohamed, H. I., H. E. El-Beltagi, and K. A. Abd-Elsalam (eds), Plant growth-promoting microbes for sustainable biotic and abiotic stress management.* Springer, pp. 285–318. DOI: 10.1007/978-3-030-66587-6_11
- Bedmar, F., V. Gianelli, H. Angelini, y L. Viglianchino. 2015. Riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo El Cardalito, Argentina.

- Rev. Investig. Agropecu. 41: 70–82. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86436966013>
- Beyuo, J., L. N. A. Sackey, C. Yeboah, P. Y. Kayoung, and D. Koudadje. 2024. The implications of pesticide residue in food crops on human health: a critical review. *Discover Agriculture* 44279: 00141. DOI: 10.1007/s44279-024-00141-z
- Boobalan, S., and S. Girija, 2025. Elicitors-induced enhancement of alkaloid and flavonoid production in callus cultures of *Aerva lanata* (L.) Juss. Ex-Schult: an assessment of anticancer and toxicity properties. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 162: 57. DOI: 10.1007/s11240-025-03169-1
- Bommesh, J. C., M. Pitchaimuthu, D. C. Manjunathagowda, S. Maragal, and A. N. Ramesh. 2025. Unveiling the downy mildew disease (*Pseudoperonospora cubensis* Berk. & Curt.) resistance response in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Indian Phytopathol.* 78:00825. DOI: 10.1007/s42360-025-00825-6
- Botías, C. y F. Sánchez-Bayo. 2018. Papel de los plaguicidas en la pérdida de polinizadores. *Ecosistemas* 27: 34–41. DOI: 10.7818/ECOS.1314
- Boughalleb-M'Hamdi, N., I. Ben Salem, and M. M'Hamdi. 2018. Evaluation of the efficiency of *Trichoderma*, *Penicillium*, and *Aspergillus* species as biological control agents against four soil-borne fungi of melon and watermelon. *Egypt. J. Biol. Pest Control* 28: 25. DOI: 10.1186/s41938-017-0010-3
- Busby, P. E., M. Ridout, and G. Newcombe. 2015. Fungal endophytes: modifiers of plant disease. *Plant Mol. Biol.* 90: 645–655. DOI: 10.1007/s11103-015-0412-0
- Caetano, A. de O., R. L. C. Diniz, N. M. Lemes, A. R. Rietjens, and M. L. Lima. 2018. Symptomatology, hosts, and pathogenicity of *Corynespora cassiicola*. *Rev. Agric. Neotrop.* 5: 48–53. DOI: 10.32404/rean.v5i2.1410
- Candelero, D. J., A. J. Cristóbal, R. A. Reyes, S. J. M. Tun, A. M. M. Gamboa, y S. E. Ruíz. 2015. *Trichoderma* spp. promotoras del crecimiento en plántulas de *Capsicum chinense* Jacq. y antagónicas contra *Meloidogyne incognita*. *PHYTON* 84: 113–119. Disponible en: <http://www.scielo.org.ar/pdf/phyton/v84n1/v84n1a16.pdf>
- Carmona, M. y F. Sautua. 2017. La problemática de la resistencia de hongos fungicidas. Causas y efectos en cultivos extensivos. *Agronomía y Ambiente* 37. Disponible en: <http://agronomiayambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/60/59>

- Ceiro-Catasú, W. G., J. Arévalo-Ortega, y L. Hidalgo-Díaz. 2021. Colonización endofítica del hongo nematófago *Pochonia chlamydosporia* en cultivos de Solanaceae y Cucurbitaceae. *Agronomía Mesoamericana* 32(3): 779–789. DOI: 10.15517/am.v32i3.45506
- Contreras-Cauich, M.F., G. López-Tolentino, F. Rojas-Serrano, G. A. Muñoz-Osorio, E. E. Marín-Collí, E. Castillo-López, y J.A. Jiménez-Chi. 2022. Eficacia de la fertilización orgánica en el desarrollo del pepino (*Cucumis sativus*) en campo abierto. *Rev. Int. Investig. Innov. Tecnol.* 4(3): 1–10. https://riiit.com.mx/apps/site/files_v2450/pepino_yuc._4_riiit_may-jun_2022_v1.pdf (Consulta: abril 2025)
- DeMers, M. 2022 *Alternaria alternata* as endophyte and pathogen. *Microbiology* 168:1–15. DOI: 10.1099/mic.0.001153
- Derbalah, A. S. and G. A. Elkot. 2011. Cultural filtrates of certain microbial isolates as an alternative to powdery mildew chemical control in cucumbers. *J. Pestic. Sci.* 36: 402–406. DOI: 10.1584/jpestics.G11-23
- Di Canito, A., M. A. Mateo-Vargas, M. Mazziere, J. Cantoral, R. Foschino, G. Cordero-Bueso, and I. Vigentini. 2021. The role of yeasts as biocontrol agents for pathogenic fungi on postharvest grapes: a review. *Foods* 10: 1650. DOI: 10.3390/foods1007165
- Díaz-Valenzuela, C., C. Deramond-Gálvez, Á. Machuca, y D. Chávez. 2024. Actividad promotora del crecimiento vegetal de cuatro hongos endófitos aislados desde *Araucaria araucana*. *Siembra* 11(2): e6802. DOI: 10.29166/siembra.v11i2.6802
- Ding, M., Z. Wang, Q. Fan, H. Liao, K. Liu, M. Li, Z. Ma, H. Yu, and Y. Wang. 2022. First report of *Claviceps purpurea* causing ergot disease on wheat (*Triticum aestivum*) in southwestern China. *J. Plant Pathol.* 104:1593–1594. DOI: 10.1007/s42161-022-01227-7
- Du, Y., X. Han, and K. Tsuda. 2025. Microbiome-mediated plant disease resistance: recent advances and future directions. *J. Gen. Plant. Pathol.* 91: 1–17. DOI: 10.1007/s10327-024-01204-1
- Edwards M., J. P., P. A. Paul, L. Amorim, L. H. C. P. Da Silva, F. V. Siqueri, E.P. Borges, and R. S. Balardin. 2019. Effect of target spot on soybean yield and factors affecting this relationship. *Plant Pathol.* 68:107–115. DOI: 10.1111/ppa.12944

- Eguiarte, L. E., H. S. Hernández-Rosales, J. Barrera-Redondo, G. Castellanos-Morales, L. M. Paredes-Torres, G. Sánchez-de la Vega, K. Y. Ruiz-Mondragón, A. Vázquez-Lobo, S. Montes-Hernández, E. Aguirre-Planter, V. Souza, y R. Lira S. 2018. Domesticación, diversidad y recursos genéticos y genómicos de México: El caso de las calabazas. *Rev. Esp. Cienc. Quím. Biol.* 21: 85–101. DOI: 10.22201/fesz.23958723e.2018.0.159
- Farah, A. A., M. A. Mohamed, O. S. H. Musse, and B. A. Nor. 2025. The multifaceted impact of climate change on agricultural productivity: a systematic literature review of SCOPUS-indexed studies (2015–2024). *Discov Sustain* 6: 397. DOI: 10.1007/s43621-025-01229-2
- Fontana, D. C., S. de Paula, A. Galón Torres, V. H. Moura de Souza, S. F. Pascholati, D. Schmidt, and D. Dourado Neto. 2021. Endophytic fungi: Biological control and induced resistance to phytopathogens and abiotic stresses. *Pathogens* 10: 570. DOI: 10.3390/pathogens10050570
- Fouda, A. H., S. E. D. Hassan, A. M. Eid, and E. E. D. Ewais. 2015. Biotechnological applications of fungal endophytes associated with medicinal plant *Asclepias sinaica* (Bioss.). *Ann. Agric. Sci.* 60: 95–104. DOI: 10.1016/j.aoas.2015.04.001
- García-Delgado, C., V. Barba-Vicente, J. M. Marín-Benito, J. Mariano-Igual, M. J. Sánchez-Martín, and M. S. Rodríguez-Cruz. 2019. Influence of different agricultural management practices on soil microbial community over dissipation time of two herbicides. *Sci. Total Environ.* 646: 1478–1488.
- González, V., E. Armijos, and A. Garcés-Claver. 2020. Fungal endophytes as biocontrol agents against the main soil-borne diseases of melon and watermelon in Spain. *Agronomy* 10: 820. DOI: 10.3390/agronomy10060820
- Grimaldo-Juárez, O., A. M. Suárez-Hernández, C. Ceceña-Durán, y D. González-Mendoza. 2018. Diversidad morfológica de semilla y fruto de diez colectas mexicanas de *Lagenaria siceraria*. *Agronomía Mesoamericana* 29(1): 66–81. DOI: 10.15517/ma.v29i1.28205
- Gutiérrez E., L. and E. Fitting. 2016. The red de semillas libres: contesting biohegemony in Colombia. *J. Agrar. Change* 16. DOI: 0.1111/joac.12161

- Haegi, A., S. De Felice, M. Scotton, L. Luongo, and A. Belisario. 2017. *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*–melon interaction: Effect of grafting combination on pathogen gene expression. *Eur. J. of Plant Pathol.* 149: 1–15. DOI: 10.1007/s10658-017-1225-6
- Herrera C., G. Franco, H. Barrientos, y M. A. Rodríguez. 2015. La contaminación por manganeso en comunidades expuestas a fungicidas etilenbisditiocarbamatos en el Soconusco (Chiapas, México). *Hig. Sanid. Ambient* 15: 1315–1318. Disponible en: [https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc559118a50fffb_Hig.Sanid_.Ambient.15.\(2\).1315-1318.\(2015\).pdf](https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc559118a50fffb_Hig.Sanid_.Ambient.15.(2).1315-1318.(2015).pdf)
- Hora, R. C., J. Camargo, J. e A.C. Buzanini. 2018. Cucurbitáceas e outras. In: Brandao, F., Freitas, P.S.L., Berian, L.O.S., e Goto, R. (eds), *Hortaliças-fruto*, Maringá, EDUEM, 2018, pp. 71–111. DOI: 10.7476/9786586383010.0005.
- Hossain, M. M., F. Sultana, M. and M. Mostafa. 2024. Plant disease dynamics in a changing climate: impacts, molecular mechanisms, and climate-informed strategies for sustainable management. *Discov Agric* 2, 132 DOI: 10.1007/s44279-024-00144-w.
- Huang, J. H., M. M. Xiang, and Z. D. Jiang. 2012. Endophytic fungi of bitter melon (*Momordica charantia*) in Guangdong Province, China. *Gt. Lakes Entomol.* 45: 19–28. DOI: 10.4236/as.2015.66060
- Huang, L.Q., Y. C. Niu, L. Su, H. Deng, and H. Lyu. 2020. The potential of endophytic fungi isolated from cucurbit plants for biocontrol of soilborne fungal diseases of cucumber. *Microbiol. Res.* 23. DOI: 10.1016/j.micres.2019.126369
- Jaswal, R., K. Kiran, S. Rajarammohan, H. Dubey, P. K. Singh, Y. Sharma, R. Deshmukh, H. Sonah, N. Gupta, and T. R. Sharma. 2020. Effector biology of biotrophic plant fungal pathogens: Current advances and future prospects. *Microbiol. Res.* 241:126567. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126567
- Khan, R. A. A., S. Najeeb, S. Hussain, B. Xie, and Y. Li. 2020. Bioactive secondary metabolites from *Trichoderma* spp. against phytopathogenic fungi. *Microorganisms* 8: 817. DOI: 10.3390/microorganisms8060817
- Khoulati, A., S. Ouahhoud, M. Taibi, S. Ezrari, S. Mamri, O. Merah, A. Hakkou, M. Addi, and E. Saalaoui. 2025. Harnessing biostimulants for sustainable agriculture: innovations, challenges, and future directions. *Discover Agriculture* 44279: 00177. DOI: 10.1007/s44279-025-00177-9

- Khunnamwong, P., N. Lertwattanasakul, S. Jindamorakot, N. Suwannarach, K. Matsui, and S. Limtong. 2019. Evaluation of antagonistic activity and mechanisms of endophytic yeasts against pathogenic fungi causing economic crop diseases. *Folia Microbiol. (Praha)* 65: 573–590. DOI: 10.1007/s12223-019-00764-6
- Kim, C. K., J. K. Eo, and A. H. Eom. 2013. Diversity and seasonal variation of endophytic fungi isolated from three conifers in Mt. Taehwa, Korea. *Mycobiology* 41: 82–85. DOI: 10.5941/myco.2013.41.2.82
- Kim, H. Y., G. J. Choi, H. B. Lee, S. W. Lee, H. K. Lim, K. S. Jang, S. W. Son, S. O. Lee, K. Y. Cho, N. D. Sung, and J. C. Kim. 2007. Some fungal endophytes from vegetable crops and their anti-oomycete activities against tomato late blight. *Lett. Appl. Microbiol.* 44: 332–337. DOI: 10.1111/j.1472-765X.2006.02093.x
- Lascano, C. I., V. Sotomayor, A. Ferrari, y A. Venturino. 2009. Alteraciones del desarrollo embrionario, poliaminas y estrés oxidativo inducidos por plaguicidas organofosforados en *Rhinella arenarum*. *Acta Toxicol. Argent.* 17: 8–19.
- Li, P., L. Tedersoo, T. W. Crowther, X. Liu, J. Zhang, Y. Liu, J. Wang, Y. Wang, X. Liu, T. Zhang, and C. Liu. 2023. Global diversity and biogeography of potential phytopathogenic fungi in a changing world. *Nature Communications* 14: 6212. DOI: 10.1038/s41467-023-42142-4
- Li, R., W. Chen, A. Xiu, H. Zhao, X. Zhang, S. Zhang, and D. Q. Tong, 2019. A comprehensive inventory of agricultural atmospheric particulate matters (PM10 and PM2.5) and gaseous pollutants (VOCs, SO₂, NH₃, CO, NO_x and HC) emissions in China. *Ecol. Indic.* 107: 105609. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105609
- Liao, C., M. Doilom, R. Jeewon, K. D. Hyde, I. S. Manawasinghe, K. W. T. Chethana, A. Balasuriya, S. A. D. Thakshila, M. Luo, A. Mapook, Z. H. Htet, V. Koodalugodaarachchi, N. Wijekoon, R. K. Saxena, I. C. Senanayake, N. D. Kularathnage, A. F. Alrefaei, and W. Dong. 2025. Challenges and update on fungal endophytes: classification, definition, diversity, ecology, evolution and functions. *Fungal Divers.* 13225: 00550. DOI: 10.1007/s13225-025-00550-5
- Lira S., R. 2004. Cucurbitaceae de la Península de Yucatán. *Etnoflora Yucatanense* 22. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, México. 312 p.

- Liu, X., G. Dou, and Y. Ma. 2016. Potential of endophytes from medicinal plants for biocontrol and plant growth promotion. *J. Gen. Plant Pathol.* 82: 165–173. DOI:10.1007/s10327-016-0648-9
- Masachis, S., D. Segorbe, D. Turrà, M. León-Ruiz, U. Furst, M. Ghalid, G. Leonard, M.S. López-Berges, T.A. Richards, G. Felix, and A. Di Pietro. 2016. A fungal pathogen secretes plant alkalizing peptides to increase infection. *Nat Microbiol* 1: 16043. DOI: 10.1038/nmicrobiol.2016.43
- Mazumdar, P., P. Singh, D. Kethiravan, I. Ramathani, and N. Ramakrishnan. 2021. Late blight in tomato: insights into the pathogenesis of the aggressive pathogen *Phytophthora infestans* and future research priorities. *Planta* 253(119). DOI: 10.1007/s00425-021-03636-x
- Meneses-Fernández, C., y G. Quesada-Roldán. 2018. Crecimiento y rendimiento del pepino holandés en ambiente protegido y con sustratos orgánicos alternativos. *Agronomía Mesoamericana* 29(2): 28738. DOI: 10.15517/ma.v29i2.28738
- Monge-Pérez, J. E., y M. Loría-Coto. 2019. Melón (*Cucumis melo* L.) cultivado bajo invernadero: correlaciones entre variables. *Tecnol. Marcha* 32(1): 1–12. DOI: 10.8845/tm.v32.i1.4124
- Mooh-Koh., F. A., J. Cristóbal-Alejo, A. Reyes-Ramírez, J. M. Tun Suárez, y M. Gamboa-Angulo. 2017. Identificación molecular de aislados de *Trichoderma* spp. y su actividad promotora en *Solanum lycopersicum* L. *Investigación y Ciencia* 25: 5–11. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/674/67452917001/html/>
- Mu, L., Y. Niu, and H. Deng. 2010. The endophytic mycobiota in summer growing cucumber in Beijing. *Mycosystema* 29: 214–221. DOI: 10.13346/j.mycosystema.2010.02.021
- Muñoz-Quezada, M. T., B. Lucero, V. Iglesias, y M. P. Muñoz. 2014. Vías de exposición a plaguicidas en escolares de la Provincia de Talca, Chile. *Gaceta Sanitaria* 28: 190–195.
- Nascimento, T. L., Y. Oki, D. M. M. Lima, J. S. Almeida-Cortez, G. W. Fernandes, and C. M. Souza-Motta. 2015. Biodiversity of endophytic fungi in different leaf ages of *Calotropis procera* and their antimicrobial activity. *Fungal Ecol.* 14:79–86. DOI: 10.1016/j.funeco.2014.10.00
- Obregón, V. 2017. Guía para la identificación de las enfermedades de las Cucurbitáceas. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Bella Vista, Argentina. 35 p.

- Orrala Borbor, N. A., L. Herrera Isla, y C. E. Balmaseda Espinosa. 2019. Técnicas de cultivo de sandía injertada, efectos en rendimiento y calidad del fruto. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 10(8): 1837–1850. DOI: 10.29312/remexca.v10i8.1118
- Ortiz-Espinoza, E., F. Villegas-Rodríguez, H. M. Ramírez-Tobías, L. E. Hernández-Arteaga, y J. Marín-Sánchez. 2020. La inoculación con hongos endófitos entomopatógenos en semilla genera una respuesta fisiológica y promueve el crecimiento vegetal en plantas de chile poblano en invernadero. *Nova Scientia* 12(25). DOI: 10.21640/ns.v12i25.2586
- Oses-Pedraza, R., V. Hernández, L. Campos, J. Becerra, D. Irribarren-Riquelme, P. Lavín, and J. Rodríguez. 2021. Advances in research on biodiversity and bioprospecting of endophytic fungi in Chile. *In: Choudhary, G. (ed), Neotropical Endophytic Fungi.* Springer. pp: 63–84. DOI: 10.1007/978-3-030-53506-3_4
- Panaccione, D. G., W. T. Beaulieu, and D. Cook. 2014. Bioactive alkaloids in vertically transmitted fungal endophytes. *Funct. Ecol.* 28: 299–314. DOI: 10.1111/1365-2435.12076
- Park, C. S., T. C. Paulitz, R. Baker. 1988. Biocontrol of *Fusarium* wilt of cucumber resulting from interactions between *Pseudomonas putida* and nonpathogenic isolates of *Fusarium oxysporum*. *Phytopathol.* 78: 190–194. DOI: 10.1094/Phyto-78-190.
- Rahman, M. Z., K. Ahmad, Y. Siddiqui, N. Saad, T. G. Hun, E. M. Hata, O. Rashed, and M. I. Hossain. 2021. First report of *Fusarium equiseti* causing fruit rot disease of watermelon in Malaysia. *Plant Disease* 106: 326. DOI: 10.1094/PDIS-05-21-1027-PDN
- Ramírez-Prado, J. S., A. A. Abulfaraj, N. Rayapuram, M. Benhamed, and H. Hirt. 2018. Plant immunity: from signaling to epigenetic control of defense. *Trends in Plant Sci.* 23: 833–844. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.06.004
- Rashmi, M., J. S. Kushveer, V. V. Sarma. 2019. A worldwide list of endophytic fungi with notes on ecology and diversity. *Mycosphere* 10: 789–1079. DOI: 10.5943/mycosphere/10/1/19
- Román-Román, L. F., y G. Quesada-Roldán. 2023. Guía para proyecto de cultivo de chayote. *Agroproyectos.* Mayo 16. <https://agroproyectos.org/guia-proyecto-cultivo-de-chayote/> (Consulta: marzo 2025).

- Román-Román, L. F., F. Ayala-Tafoya, J.M. Parra-Delgado, T. Díaz-Valdés, C.A. López-Orona, y T.J. Velázquez-Alcaraz. 2022. Producción de calabacita con y sin polinización manual en condiciones de casa malla. *Rev. Fitotec. Mex.* 45(2): 165–172. DOI: 10.35196/rfm.2022.2.165
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2024. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/prensa/sistema-de-informacion-agroalimentaria-de-consulta-siacon> (Consulta: febrero 2022).
- Santos-Luna, J., M. Segura-Osorio, D. Sanmartín-Galván, J. Pérez-Rodríguez, and S. Falconi-Peláez. 2015. Efectos de los fungicidas organofosforados y carbamatos en la salud de los escolares. *Revista Ciencia UNEMI* 8: 62–67. DOI: 10.29076/issn.2528-7737vol8iss16.2015pp62-67p
- Sharma, P., P. Sharma, and N. Thakur. 2024. Sustainable farming practices and soil health: a pathway to achieving SDGs and future prospects. *Discov Sustain* 5: 250. DOI: 10.1007/s43621-024-00447-4
- Singh, H. B. 2014. Management of plant pathogens with microorganisms. *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.* 80: 443–454. DOI: 10.16943/ptinsa/2014/v80i2/55120
- Stirling, M., and G. Stirling. 1997. Disease management: Biological control. *In*: Brown, J. and H. Ogle (eds). *Plant Pathogens and Plant Diseases*. Rockvale Publications. Amidale, Australia. pp: 427–439.
- Su, L., and Y. Niu. 2018. Multilocus phylogenetic analysis of *Talaromyces* species isolated from cucurbit plants in China and description of two new species, *T. cucurbitiradicus* and *T. endophyticus*. *Mycologia* 110: 375–386. DOI: 10.1080/00275514.2018.1432221
- Su, L., H. Deng, and Y. Niu. 2016. *Phialemoniopsis endophytica* sp. nov., a new species of endophytic fungi from *Luffa cylindrica* in Henan, China. *Mycol. Prog.* 15: 48–54. DOI: 10.1007/s11557-016-1189-5
- Su, L., H. Deng, and Y. Niu. 2017. Phylogenetic analysis of *Plectosphaerella* species based on multi-locus DNA sequences and description of *P. sinensis* sp. nov. *Mycol. Prog.* 16: 823–829. DOI: 10.1007/s11557-017-1319-8

- Terhonen, E., N. Sipari, and F. O. Asiegbu. 2016. Inhibition of phytopathogens by fungal root endophytes of Norway spruce. *Biol. Control.* 99: 53–63. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2016.04.006
- Thambugala, K. M., D. A. Daranagama, A. J. L. Phillips, S. D. Kannangara, and I. Promputtha. 2020 Fungi vs. fungi in biocontrol: an overview of fungal antagonists applied Against fungal plant pathogens. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 10: 604923. DOI: 10.3389/fcimb.2020.604923
- Toporek, S. M., and A. P. Keinath. 2021. A diagnostic guide for *Pythium* damping-off and root and stem rot of cucurbits. *Plant Health Prog.* 22: 415–418. DOI: 10.1094/PHP-02-21-0042-FI
- Torres-Calzada, C., R. Tapia-Tussell, I. Higuera-Ciapara, E. Huchin-Poot, R. Martin-Mex, A. Nexticapan-Garcez, and D. Perez-Brito. 2018. Characterization of *Colletotrichum truncatum* from papaya, pepper and physic nut based on phylogeny, morphology and pathogenicity. *Plant Pathology* 67: 821–830. DOI: 10.1111/ppa.12800
- Tymon, L. S., P. Morgan, B. Gundersen, and D. A. Inglis. 2020. Potential of endophytic fungi collected from *Cucurbita pepo* roots grown under three different agricultural mulches as antagonistic endophytes to *Verticillium dahliae* in western Washington. *Microbiol. Res.* 240. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126535
- Verma, S., R. Sharma, and A. K. Singh. 2022. Methods used for the study of endophytic fungi: a review on isolation and identification. *Arch. Microbiol.* 203: 03283. DOI: 10.1007/s00203-022-03283-0
- Verma, S., R. Sharma, and A. K. Singh. 2024. Microbial inheritance through seed: a clouded area needs to be clarified. *Arch. Microbiol.* 00203: 04225. DOI: 10.1007/s00203-024-04225-8
- Viana, G. C., L. O. Médiçi, M. S. Vidal, and J. I. Baldani. 2024. *Bacillus* endophytic strains control *Fusarium* wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Race 3 strains. *Braz. J. Microbiol.* 55: 4019–4034. DOI: 10.1007/s42770-024-01539-z
- White, T. J., T. D. Burns, S. B. Lee, and J. W. Taylor. 1990. Amplification and directsequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR protocols: a guide to methods and applications.* Res. Gate 18: 315–322. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/262687766_Amplification_and_Direct_Sequencing_of_Fungal_Ribosomal_RNA_Genes_for_Phylogenetics

- Xue, Q., Y. Niu, and H. Deng. 2015. Diversity of endophytic fungi in common cucurbit plants. *Mycosystema* 34: 196–203. DOI: 10.13346/j.mycosystema.140030
- Yáñez Juárez, M. G., F. Ayala Tafoya, L. Partida Ruvalcaba, T. de J. Velázquez Alcaráz, T. P. Godoy Angulo, y T. Díaz Valdéz. 2014. Efecto de bicarbonatos en el control de cenicilla (*Oidium* sp.) en pepino (*Cucumis sativus* L.). *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 5: 991–1000. DOI: 10.29312/remexca.v5i6.884
- Zapata, M., E., Rodríguez-Serrano, J. F. Castro, C., Santelices, J. Carrasco-Fernández, U. Damm, and G. Palfner. 2024. Novel species and records of *Colletotrichum* associated with native woody plants in south-central Chile. *Mycological Progress* 23(18). DOI: 10.1007/s11557-024-01956-2
- Zhao, J., Y. Mou, T. Shan, Y. Lin, L. Zhou, M. Wang, and J. Wang. 2010. Antimicrobial metabolites from the endophytic fungus *Pichia guilliermondii* isolated from *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. *Molecules* 15: 7961–7970. DOI: 10.3390/molecules15117961

II. CAPÍTULO 2

Publicado en Revista Scientia Fungorum

Montañez-De Azcué, D., y J. Cristóbal-Alejo. 2024. Aislamiento de hongos endófitos en cucurbitáceas criollas de Yucatán, México. Scientia Fungorum 55. <https://scientiafungorum.org.mx/index.php/micologia/article/view/1436>

Aislamiento de hongos endófitos en cucurbitáceas criollas de Yucatán, México

Isolation of endophytic fungi from creole cucurbits in Yucatan, Mexico

Diego Montañez de Azcué, Jairo Cristóbal-Alejo*

Laboratorio de Fitopatología, Tecnológico Nacional de México Campus Conkal, Avenida Tecnológico s/n Conkal, Yucatán, 97345, México.

*Correspondencia: jairo.ca@conkal.tecnm.mx, orcid.org/0000-0001-9354-1129

Correspondencia primer autor: DD21800321@conkal.tecnm.mx

Resumen

Antecedentes: Los hongos endófitos son microorganismos simbioses de plantas, diversos y abundantes en regiones tropicales. Sin embargo, los estudios en cucurbitáceas se han limitado a regiones templadas y semiáridas.

Objetivo: Aislar hongos endófitos asociados a cucurbitáceas criollas de Yucatán.

Métodos: Se aislaron y purificaron, mediante diferentes medios de cultivo, hongos endófitos de hojas, tallos, raíces, flores y semillas de pepino blanco (*Cucumis sativus*) y calabazo (*Lagenaria siceraria*).

Resultados y conclusiones: Se obtuvieron 319 aislamientos e identificaron 16 géneros, con *Aspergillus* como el principalmente encontrado. Se registró por primera vez la presencia de hongos endófitos en cucurbitáceas criollas tropicales. Se recomienda probar los efectos antagónicos y promotores de crecimiento de las cepas aisladas.

Palabras clave: *Cucumis sativus*, *Lagenaria siceraria*, medios de cultivo, regiones tropicales.

Abstract

Background: Endophytic fungi are symbiotic microorganisms of plants. They are diverse and abundant in tropical regions. However, the studies in cucurbits have been limited to temperate and semi-arid regions.

Objective: To isolate endophytic fungi associated with creole cucurbits from Yucatan.

Methods: Endophytic fungi were isolated and purified, using different growth media, from leaves, stems, roots, flowers, and seeds of white cucumber (*Cucumis sativus*) and calabash (*Lagenaria siceraria*).

Results and conclusions: 319 isolates were obtained and 16 genera were identified, with *Aspergillus* as the main one found. The presence of endophytic fungi in tropical creole cucurbits was recorded for the first time. It is recommended to test the antagonistic and growth-promoting effects of the isolated strains.

Keywords: *Cucumis sativus*, *Lagenaria siceraria*, growth media, tropical regions.

III. CAPÍTULO 3

Publicado en Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios

Montañez-De Azcué, D., J. Cristóbal-Alejo, A. Uc-Vázquez, F. A. Moo-Koh, y J. M. Tun-Suárez. 2024. Efecto antifúngico *in vitro* de hongos endófitos de cucurbitáceas criollas de Yucatán. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 11 (2): e3992. DOI: 10.19136/era.a11n2.3992

Efecto antifúngico *in vitro* de hongos endófitos de cucurbitáceas criollas de Yucatán

***In vitro* antifungal effect of endophytic fungi of creole cucurbits of Yucatan**

Diego Montañez-De Azcué¹ (<https://orcid.org/0000-0002-4671-379X>), Jairo Cristóbal-Alejo^{1*} (<https://orcid.org/0000-0001-9354-1129>), Alberto Uc-Vázquez² (<https://orcid.org/0000-0002-9317-4952>), Felicia Amalia Moo-Koh¹ (<https://orcid.org/0000-0002-9346-1783>), José María Tun-Suárez¹ (<https://orcid.org/0000-0003-3325-8430>)

¹Tecnológico Nacional de México/Campus Conkal. Avenida Tecnológico s/n, CP. 97345. Conkal, Yucatán, México.

² Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco AC, Unidad Sureste. Km 5.5 Carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto s/n. CP. 97302 Sierra Papacal, Mérida, Yucatán, México.

*Autor de correspondencia: jairio.ca@conkal.tecnm.mx

Correspondencia primer autor: DD21800321@conkal.tecnm.mx

RESUMEN. Los hongos endófitos son microorganismos simbiotes de plantas, diversos y abundantes en regiones tropicales, con gran potencial como agentes biocontroladores de enfermedades fúngicas agrícolas. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la actividad antifúngica *in vitro* de los hongos endófitos asociados con cultivares criollos de *Cucumis sativus* y *Lagenaria siceraria* de Yucatán. Las cepas endófitas fueron aisladas e identificadas de diferentes órganos de las plantas, para posteriormente ser sometidas a enfrentamientos duales y pruebas de antibiosis. Se identificaron 20 especies de hongos endófitos con efectos

antifúngicos contra *Corynespora cassicola*, *Colletotrichum truncatum* y *Fusarium equiseti*, obteniendo rangos de inhibición de 17.72–100%, 16.51–91.55% y 4.64–91.89%, respectivamente. *Aspergillus flavus*, *Lasiodiplodia pseudotheobromae* y *Trichoderma longibrachiatum* exhibieron los mayores porcentajes de inhibición contra los tres fitopatógenos. Así mismo, estas tres especies de endófitos demostraron un efecto antibiótico en sus extractos, al inhibir principalmente el crecimiento de *F. equiseti* hasta en un 46.46%. La cepa de *L. pseudotheobromae* tiene características que le confieren un potencial como agente antifúngico, por lo que se deberán seguir explorando sus aplicaciones y condiciones de crecimiento. Este trabajo representa un primer esfuerzo por conocer la diversidad de hongos endófitos en los cultivos criollos de la región.

Palabras clave: Antibiosis, *Cucumis sativus*, cultivos duales, hongos fitopatógenos, *Lagenaria siceraria*.

ABSTRACT. Endophytic fungi are plant symbiont microorganisms, diverse and abundant in tropical regions, with great potential as biocontrol agents of agricultural fungal diseases. The objective of the present work was to evaluate in vitro antifungal activity of endophytic fungi associated with creole cultivars of *Cucumis sativus* and *Lagenaria siceraria* from Yucatán. The endophytic strains were isolated and identified from different organs, to be subjected to dual confrontations and antibiotic tests. Twenty species with antifungal effects against *Corynespora cassicola*, *Colletotrichum truncatum* and *Fusarium equiseti* were identified, obtaining inhibition ranges of 17.72–100%, 16.51–91.55% and 4.64–91.89%, respectively. *Aspergillus flavus*, *Lasiodiplodia pseudotheobromae* and *Trichoderma longibrachiatum* exhibited the highest percentages of inhibition against the three phytopathogens. Likewise, these three species of endophytes demonstrated an antibiotic effect in their extracts, mainly inhibiting the growth of *F. equiseti* by up to 46.46%. The *L. pseudotheobromae* strain has characteristics that give it potential as an antifungal agent, so its applications and growth conditions should continue to be explored. This work represents a first effort to understand the diversity of endophytic fungi in native crops in the region.

Key words: Antibiosis, *Cucumis sativus*, dual cultivation, *Lagenaria siceraria*, phytopathogenic fungi.

VI. CAPÍTULO 4

Artículo en preparación para su envío a la revista Mexican Journal of Biotechnology

Endophytic fungi as growth promoters and design of a severity scale for powdery mildew in *Cucumis sativus*

Hongos endófitos como promotores de crecimiento y diseño de una escala de severidad de cenicilla en *Cucumis sativus*

Diego Montañez-De Azcué¹ (<https://orcid.org/0000-0002-4671-379X>), Felicia Amalia Moo-Koh^{1*} (<https://orcid.org/0000-0002-9346-1783>), Alberto Uc-Vázquez² (<https://orcid.org/0000-0002-9317-4952>), Arturo Reyes-Ramírez¹ (<https://orcid.org/0000-0003-2348-5146>), María Marcela Gamboa-Angulo³ (<https://orcid.org/0000-0002-0618-0335>), Jairo Cristóbal-Alejo¹ (<https://orcid.org/0000-0001-9354-1129>)

¹Laboratorio de Fitopatología, Tecnológico Nacional de México/Campus Conkal. Avenida Tecnológico s/n, CP. 97345. Conkal, Yucatán, México.

²Laboratorio de Biotecnología vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco AC, Unidad Sureste. Km 5.5 Carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto s/n. CP. 97302. Sierra Papacal, Mérida, Yucatán, México.

³Unidad de Biotecnología, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 No. 130 entre 32 y 34 Chuburná de Hidalgo CP. 97205. Mérida, Yucatán, México

*Corresponding autor

E-mail address: felicia.mk@conkal.tecnm.mx (Felicia Moo Koh)

Correspondencia primer autor: DD21800321@conkal.tecnm.mx

ABSTRACT

Endophytic fungi are microorganisms that live inside plant tissues without causing symptoms to the host but they provide adaptive advantages such as growth stimulation and disease tolerance. The potential of four endophytic fungi strains as growth promoters and as biocontrol agents for downy powdery mildew in the creole cultivar *Cucumis sativus* from Yucatan, Mexico, was evaluated. Concentrations of 1×10^6 spores of endophytic strains of *Aspergillus flavus* (HE15), *Lasiodiplodia pseudotheobromae* (HE22), and *Trichoderma longibrachiatum* (HE36) and *T. asperellum* (Ta13-17) were inoculated into *C. sativus* plants under protected conditions. The plants were monitored daily for a period of two months. Its growth variables were measured, and a severity scale was designed and validated in relation to the surface of the leaves infected with downy powdery mildew. All strains significantly increased the fresh weight of the aerial part of the plant (56.3–58.41 g), the dry weight of the root (0.47–0.88 g), the dry biomass (9–10.5 g) and the flowering rate (32–45.2). Both *Trichoderma* spp. increased the root length (29.6–33.4 cm), and only *T. asperellum* showed the lowest (34%) downy powdery mildew infection. The evaluated strains showed potential as growth promoters in *C. sativus*, although most did not reduce the severity of powdery mildew. It is recommended to explore different cultivation methodologies, inoculation techniques, combined treatments, and field trials against other phytopathogens.

Key words: *Aspergillus*, *Lasiodiplodia*, phytopathogenic fungi, severity scale, *Trichoderma*.

RESUMEN

Los hongos endófitos son microorganismos que habitan dentro de los tejidos vegetales sin ocasionar infecciones a la planta hospedera; por el contrario, brindan ventajas adaptativas como la estimulación del crecimiento y la tolerancia contra fitopatógenos. El potencial de tres cepas de hongos endófitos se evaluó como promotores de crecimiento y agentes de biocontrol de cenicienta en el cultivar criollo de Yucatán, México, *Cucumis sativus*. Concentraciones de 1×10^6 esporas de cepas endófitas de *Aspergillus flavus* (HE15), *Lasiodiplodia pseudotheobromae* (HE22) y *Trichoderma longibrachiatum* (HE36) fueron inoculadas en plantas de *C. sativus* en condiciones protegidas. También se incluyó la cepa endófito *T. asperellum* (Ta13-17) como testigo positivo. Las plantas fueron monitoreadas

diariamente durante cuatro meses, se midieron sus variables de crecimiento y se diseñó y validó una escala de severidad con respecto a la superficie de las hojas infectadas con cenicilla. Las tres cepas endófitas incrementaron significativamente el peso fresco de la parte aérea de la planta (56.3–58.41 g), el peso seco de la raíz (0.47–0.88 g), la biomasa en seco (9–10.5 g) y la tasa de floración (32–45.2) en *C. sativus*. Las cepas de *Trichoderma* spp. aumentaron la longitud de la raíz (29.6–33.4 cm), pero solo *T. asperellum* disminuyó (34%) la infección por cenicilla. Las cepas evaluadas demostraron potencial como promotoras de crecimiento en *C. sativus*, aunque la mayoría no redujo la severidad de la cenicilla. Se recomienda explorar diferentes metodologías de cultivo, inoculación, tratamientos combinados y pruebas en campo contra otros fitopatógenos.

Palabras clave: *Aspergillus*, escala de severidad, hongos fitopatógenos, *Lasioidiplodia*, *Trichoderma*.