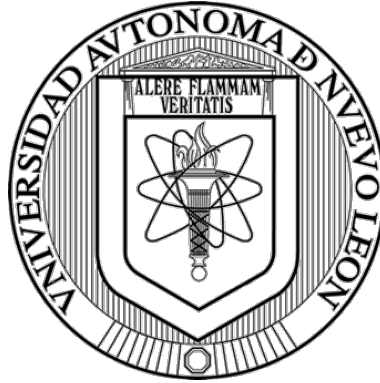


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



CARACTERIZACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD DE MICROMICETOS EN
SUELOS DE HUERTAS DE AGUACATE DE DOS MUNICIPIOS
DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.

Por

M.C. RAÚL ASael RODRÍGUEZ VILLARREAL

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN
EN MICROBIOLOGÍA

2025

CARACTERIZACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD DE MICROMICETOS EN
SUELOS DE HUERTAS DE AGUACATE DE DOS MUNICIPIOS
DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.

Comité de Tesis



Dr. Efrén Ricardo Robledo Leal
Presidente



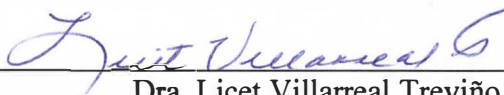
Dra. Violeta Arlinda Rodríguez Castro
Secretario



Dr. Eduardo Franco Frías
Vocal 1



Dra. María Porfiria Barrón González
Vocal 2



Dra. Licet Villarreal Treviño
Vocal 3



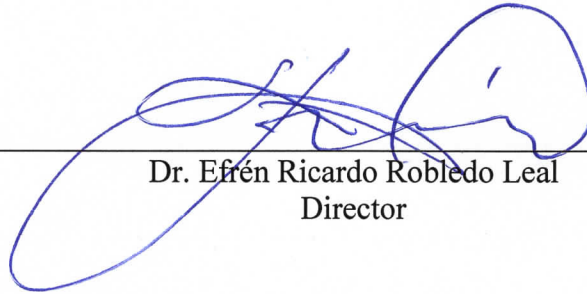
Dra. Katriushka Arévalo Niño
Subdirectora de Posgrado



DIRECCIÓN
DE POSGRADO

CARACTERIZACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD DE MICROMICETOS EN
SUELOS DE HUERTAS DE AGUACATE DE DOS MUNICIPIOS
DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.

Dirección de Tesis

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and flourishes, positioned above a horizontal line.

Dr. Efrén Ricardo Robledo Leal
Director

DERECHOS RESERVADOS©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta Tesis está protegido, el uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material contenido que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo mencionando al autor o autores.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi director de tesis, el Dr. Efrén Robledo, por su ayuda y su paciencia conmigo durante todo el proceso del doctorado.

Agradezco también a mis compañeros de laboratorio, de la facultad, la preparatoria y la secundaria que también se han reportado conmigo y me han expresado sus buenos deseos. Les agradezco a todos.

Se agradece al CONAHCYT por el apoyo brindado para realizar los estudios y tesis de doctorado bajo la beca no CVU 553426.

Al Posgrado de la Facultad de Ciencias Biológicas, por haberme aceptado dentro de su alumnado, y por haberme permitido este logro.

DEDICATORIA

Durante el proceso de este trabajo, tuve mucho apoyo por parte de varios de mis seres queridos. Sin embargo, este logro se lo quiero dedicar a unos cuantos.

A mis padres y hermanos, por animarme (muy a su manera) para lograr este objetivo. Los quiero mucho.

A mis amigos, que han sido muy buenos amigos y que también me animaban a culminar del Doctorado. Muchas gracias.

ÍNDICE

	Páginas
Índice de tablas -----	i
Índice de figuras -----	ii
Resumen -----	iii
Abstract -----	iv
Introducción -----	1
Antecedentes -----	3
El aguacate en México -----	3
Los micromicetos en los cultivos agrícolas -----	4
Diversidad microbiana en suelos agrícolas -----	5
Investigaciones previas en micromicetos asociados con aguacate -----	6
Beneficios potenciales de los hongos micromicetos para las plantas ---	7
Casos documentados de uso de micromicetos y otros organismos en la agricultura -----	9
Microbiología del suelo en Nuevo León -----	10
Justificación -----	13
Hipótesis -----	14
Objetivo del trabajo -----	15

Material y métodos -----	16
Área de estudio -----	16
Huertas de estudio -----	16
Aislamiento de micromicetos -----	18
Caracterización morfológica de micromicetos -----	18
Identificación a nivel de género -----	19
Diversidad de morfotipos y géneros -----	20
Análisis estadísticos -----	21
Resultados -----	22
Discusión -----	30
Conclusiones -----	34
Perspectivas -----	35
Bibliografía -----	36

ÍNDICE DE TABLAS

	Páginas
Tabla 1. Información de huertas de aguacate de las que se obtuvieron muestras de suelo para el aislamiento de micromicetos -----	17
Tabla 2. Número de aislamientos/morfotipos de géneros y grupos de hongos con características comunes en huertas de aguacate del estado de Nuevo León -----	22
Tabla 3. Distribución de morfotipos y género y grupos de micromicetos aislados de suelos de huertas de aguacate e índices obtenidos en cada huerta analizada -----	24
Tabla 4. Distribución de géneros y grupos de micromicetos aislados de las cinco huertas y los índices obtenidos por cada municipio -----	25
Tabla 5. Prueba de t de Hutcheson ($p=0.05$) entre los índices de diversidad de Shannon-Wiener para géneros y grupos definidos de las huertas muestreadas -----	27

ÍNDICE DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1. Línea diagonal de árboles que empiezan en una esquina y atraviesan el terreno. Sobre la diagonal, se indican los árboles donde se muestreará tejido vegetal y suelo. Autor: Rodríguez-Guerra, R. -----	18
Figura 2. Las muestras de suelo se conseguirán a partir de la distancia media entre el tronco del árbol de aguacate y el borde de su copa. Sitio donde se tomará la muestra de suelo en los árboles seleccionados de los cultivos de aguacate. Autor: Rodríguez-Guerra, R. -----	18
Figura 3. Muestra de morfotipos aislados de la muestra uno de Aramberri (MA-1). Vista frontal (filas 1, 3 y 5) y por el inverso (filas 2, 4 y 6) de las colonias. -----	21
Figura 4. Distribución de géneros y grupos en huertas muestreadas de los municipios de Aramberri (A) y Bustamante (B). -----	26

RESUMEN

México es el primer productor y exportador mundial de aguacate (*Persea americana* Miller). Existen pocos estudios sobre los microorganismos del suelo asociados a este cultivo, los cuales son importantes para establecer el papel que pueden jugar en el sistema de producción y su uso en diferentes áreas de interés. En esta investigación se determinó la biodiversidad de micromicetos cultivables en el suelo de cinco huertas de aguacate localizadas en dos municipios del estado de Nuevo León. Los aislamientos obtenidos se agruparon en morfotipos y se identificaron a nivel de género o se agruparon por características morfológicas comunes. Se determinaron los índices de diversidad de Shannon-Wiener, Simpson y Margalef para morfotipos y géneros y grupos de micromicetos con características comunes en cada huerto, y se realizó la prueba de Hutcheson ($p = 0.05$) para determinar diferencias significativas entre el índice de diversidad de Shannon-Wiener de géneros y micromicetos con características comunes entre huertos. Se obtuvieron un total de 518 aislamientos y se clasificaron en 291 morfotipos que se agruparon en 44 géneros y 7 grupos con características comunes. La prueba de Hutcheson demostró que el índice de Shannon-Wiener de los géneros y grupos de un mismo huerto es diferente del de los demás. El grupo de micelio estéril fue el más abundante en cuatro de los cinco huertos. Se identificaron géneros reportados como fitopatógenos (*Fusarium*, *Verticillium*), entomopatógenos (*Beauveria*, *Paecilomyces*, *Metarhizium*) y micoparásitos (*Trichoderma*, *Gliocladium*). Además, en esta investigación se reportan 28 nuevos géneros asociados al suelo de los huertos de aguacate.

ABSTRACT

Mexico is the world's leading producer and exporter of avocado (*Persea americana* Miller). There are few studies on soil microorganisms associated with this crop, which are important to establish the role they can play in the production system and their use in different areas of interest. In this re-search, the biodiversity of cultivable micromycetes in the soil of five avocado orchards located in two municipalities of the state of Nuevo León was determined. The isolates obtained were grouped into morphotypes and identified to genus level or grouped by common morphological characteristics. Shannon-Wiener, Simpson, and Margalef diversity indices were determined for morphotypes, and genera and groups of micromycetes with common characteristics in each orchard, and Hutcheson's test ($p = 0.05$) was performed to determine significant differences between Shannon-Wiener diversity index of genera and micromycetes with common characteristics between orchards. A total of 518 isolates were obtained and classified into 291 morphotypes that were grouped into 44 genera and 7 groups with common characteristics. Hutcheson's test showed that the Shannon-Wiener index of genera and groups of a single orchard is different from the others. The sterile mycelium group was the most abundant in four of the five orchards. Genera reported as phytopathogens (*Fusarium*, *Verticillium*), entomopathogens (*Beauveria*, *Paecilomyces*, *Metarhizium*) and mycoparasites (*Trichoderma*, *Gliocladium*) were identified. In addition, 28 new genera associated with avocado orchard soil are reported in this research.

INTRODUCCIÓN

México se ha consolidado como el mayor productor y exportador de aguacate (*Persea americana*) a nivel mundial, siendo este cultivo fundamental para su economía agrícola. La creciente demanda de aguacate, reconocido por sus beneficios nutricionales, ha llevado a un aumento significativo en su producción, beneficiando a miles de familias rurales y generando divisas importantes para el país.

Sin embargo, este crecimiento enfrenta desafíos, especialmente en términos de problemas fitosanitarios que amenazan la salud del cultivo. Diversas especies de hongos y oomicetos, como *Phytophthora cinnamomi* y *Fusarium oxysporum*, son responsables de enfermedades que pueden provocar la pudrición de raíces, afectando drásticamente los rendimientos y la calidad de los frutos. Además, el aguacate es susceptible a otras enfermedades que pueden comprometer la producción, como los canchales en los troncos y daños en los frutos. La identificación y gestión de estas amenazas son cruciales para asegurar la sostenibilidad de la producción de aguacate en México.

En este contexto, la diversidad de hongos y oomicetos en el suelo es esencial. La microbiología del suelo juega un papel fundamental en la salud del ecosistema agrícola, influyendo en la disponibilidad de nutrientes y la resistencia a patógenos. Aunque los estudios metagenómicos han documentado hasta 4,500 unidades taxonómicas en la rizosfera del aguacate, la mayoría de los estudios anteriores se han centrado en un número limitado de géneros de micromicetos. Hasta la fecha, solo 25 géneros fúngicos han sido identificados en suelos de huertos de aguacate mediante técnicas de cultivo, lo que indica una discrepancia entre la diversidad potencial y la identificada.

El estado de Nuevo León, en el noreste de México, presenta un escenario único para el cultivo de aguacate, aunque solo representa una pequeña proporción de la superficie cultivada en el país, con aproximadamente 677 hectáreas. A pesar de la notable diversidad morfológica y genética de aguacates en la región, existe una falta crítica de información

sobre la diversidad de hongos micorrícicos cultivables en este estado, lo que limita nuestra comprensión de su papel en la salud del suelo y en la producción de aguacate.

Identificar y caracterizar la biodiversidad microbiana en suelos de huertos de aguacate en Nuevo León contribuirá no solo a la comprensión científica de estos ecosistemas, sino también a mejorar las prácticas agrícolas. Conocer los micromicetos predominantes en los huertos permitirá implementar estrategias de manejo que promuevan su diversidad y funcionalidad, beneficiando así la sostenibilidad de la producción de aguacate en la región.

En esta investigación se determinó la diversidad de morfotipos y géneros de micromicetos cultivables presentes en suelos de huertas de aguacate del estado de Nuevo León, México, y la similitud en la composición de hongos entre huertas analizadas, y se discute el posible papel que desempeñan en el sistema de producción de aguacate los principales micromicetos identificados.

ANTECEDENTES

El aguacate en México

El aguacate es originario de Mesoamérica y ha sido cultivado en México desde tiempos precolombinos. En el siglo XX, México comenzó a exportar aguacate, especialmente a Estados Unidos, consolidándose como el mayor productor mundial. La inversión en tecnología, acceso a certificaciones internacionales y la calidad del producto han sido clave para su expansión (FAO, 2020). México tiene excelentes condiciones para cultivar aguacate, especialmente en Michoacán, Jalisco y Nayarit, donde el clima templado y los suelos fértiles permiten producción anual. Michoacán produce más del 80% del aguacate del país (SENASICA, 2017). La variedad Hass es la más cultivada, representando más del 95% de la producción, debido a su sabor, textura y resistencia para el transporte. Otras variedades como el Fuerte y el Bacon se consumen principalmente a nivel local (Vega, 2019).

En la actualidad, México es el mayor exportador mundial, con Estados Unidos como principal destino, consumiendo más del 70% de las exportaciones. Otros mercados clave incluyen Canadá, Japón, España y los Países Bajos. El aumento de la demanda en Asia y Europa ha llevado a México a diversificar sus mercados (FAO, 2020). La industria del aguacate es crucial para la economía mexicana, representando el 1% del PIB agrícola y generando miles de empleos en áreas rurales, especialmente en Michoacán. Sin embargo, la expansión del cultivo ha causado problemas ambientales, como la deforestación y el uso intensivo de agua (SENASICA, 2017).

Los productores están adoptando prácticas sostenibles, como el riego por goteo y el uso de drones para monitorear los cultivos. Las certificaciones de comercio justo y producción orgánica también han abierto nuevas oportunidades de mercado (Torres, 2022). Además, la deforestación causada por la expansión de los huertos de aguacate ha generado preocupaciones ambientales (Vega, 2019). Se espera que la demanda global de aguacate siga creciendo debido a sus beneficios nutricionales. Para mantener su liderazgo, México debe enfrentar los retos ambientales y de seguridad, y apostar por prácticas agrícolas sostenibles y diversificación de mercados internacionales (FAO, 2020).

Los micromicetos en los cultivos agrícolas

Los hongos y oomicetos desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas agrícolas, influyendo en la salud y la estructura del suelo, la nutrición de las plantas y las interacciones con otros organismos. Aunque algunos son patógenos (como *Macrophomina*, *Phytophthora*, *Pythium*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, entre otros), muchos son beneficiosos (como *Trichoderma*, *Penicillium*, *Aspergillus*, y varios géneros de hongos micorrízicos, entre otros), ayudando a la fertilidad del suelo y al crecimiento de las plantas, al igual que reducir la incidencia de patógenos y la dependencia de fertilizantes, así como pesticidas químicos (Tiedje *et al.*, 1999).

Los hongos saprófitos descomponen materia orgánica en descomposición de origen vegetal, animal, fúngico, entre otros, liberando nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio que son absorbidos por las plantas. Esto mejora la estructura y la fertilidad del suelo (Swift *et al.*, 1979). Las micorrizas facilitan la absorción de nutrientes al extender su red de hifas más allá de las raíces de las plantas, y también ayudan a las plantas a resistir condiciones de estrés, como sequías o suelos salinos, mejorando su resistencia a enfermedades (Wahab *et al.*, 2023).

Otros hongos actúan como biofertilizantes y biocontroladores, protegiendo las plantas de patógenos del suelo, como por ejemplo *Pythium oligandrum* y *Trichoderma* (Harman *et al.*, 2004).

El aguacate enfrenta diversas enfermedades causadas por hongos y oomicetos que afectan su producción. Las enfermedades más comunes incluyen las causadas por *Phytophthora cinnamomi*, *Fusarium* spp. y *Colletotrichum gloeosporioides*. *Phytophthora cinnamomi* causa "tristeza del aguacate" o podredumbre de raíz, debilitando la planta. Este patógeno ingresa a las raíces, liberando enzimas que destruyen las paredes celulares y dificultan la absorción de agua y nutrientes (Zentmyer, 1980). *Fusarium* spp. afecta el sistema vascular, bloquea el flujo de agua en la planta, causando marchitamiento y liberando toxinas (Ploetz *et al.*, 2003). *Colletotrichum gloeosporioides* es responsable de la antracnosis, produce toxinas que dañan los frutos causándoles manchas negras, y provocando su descomposición (Pernezny *et al.*, 2000).

El manejo de enfermedades en el cultivo del aguacate incluye varios tipos de actividades (Harman *et al.*, 2004; Whiley *et al.*, 2002):

- Prácticas culturales, como el aseguramiento de un buen drenaje en el suelo, y la rotación de cultivos.
- Control químico, como el uso de agroquímicos y fungicidas para combatir a los fitopatógenos.
- Control biológico, como la incorporación de *Trichoderma* spp. y *Phythium oligandrum* en el suelo y superficie de la planta para que inhiban el crecimiento de patógenos.
- El desarrollo y utilización de variedades de aguacate que sean resistentes a las enfermedades

Diversidad microbiana en suelos agrícolas

Los microorganismos del suelo son responsables de procesos clave en los ciclos de nutrientes, como la fijación de nitrógeno, la mineralización del fósforo y la descomposición de materia orgánica. Las bacterias fijadoras de nitrógeno, como *Rhizobium* y *Azospirillum*, convierten el nitrógeno atmosférico en una forma asimilable por las plantas, reduciendo la necesidad de fertilizantes nitrogenados y contribuyendo a la sostenibilidad del sistema agrícola (Kennedy & Smith, 1995). Los hongos micorrízicos arbusculares, por su parte, mejoran la absorción de fósforo y otros nutrientes por las raíces, promoviendo el crecimiento vegetal y reduciendo la dependencia de fertilizantes fosforados (Smith & Read, 2008).

Algunos microorganismos del suelo actúan como promotores del crecimiento vegetal al producir fitohormonas y compuestos bioactivos que estimulan el desarrollo de las plantas. Por ejemplo, las bacterias del género *Pseudomonas* producen ácido indolacético, una hormona que favorece el crecimiento radicular, mejorando la absorción de agua y nutrientes (Lugtenberg & Kamilova, 2009). Otros microorganismos, como *Bacillus* spp., producen enzimas y compuestos que ayudan a las plantas a resistir condiciones de estrés, como la sequía y la salinidad, aumentando su resiliencia (Yang *et al.*, 2009).

Los microorganismos del suelo también desempeñan un papel crucial en el control biológico de patógenos, ayudando a reducir la dependencia de pesticidas químicos. Los hongos del género *Trichoderma*, por ejemplo, tienen propiedades antimicrobianas y son efectivos en el control de patógenos como *Phytophthora* y *Fusarium*. Estos hongos producen enzimas que degradan las paredes celulares de los patógenos y compiten con ellos por espacio y recursos en la rizosfera (Howell, 2003). Además, algunos microorganismos inducen resistencia sistémica en las plantas, activando sus defensas naturales frente a enfermedades y reduciendo la necesidad de aplicaciones de pesticidas (Shoresh *et al.*, 2010).

Los microorganismos del suelo mejoran la resiliencia de los cultivos al facilitar su adaptación a condiciones de estrés ambiental, como sequías, salinidad y contaminación por metales pesados. Las bacterias halotolerantes, como las del género *Halomonas*, pueden colonizar las raíces de las plantas en suelos salinos, mejorando su resistencia al estrés salino (Glick, 2012). Además, los microorganismos del suelo ayudan a las plantas a acumular nutrientes y mejorar la estructura del suelo, lo que es crucial para mantener la estabilidad de los sistemas agrícolas en condiciones climáticas cambiantes

Investigaciones previas en micromicetos asociados con aguacate

Los estudios sobre la diversidad de micromicetos en suelos de aguacate han revelado una amplia gama de hongos asociados con este cultivo. Desde una perspectiva agrícola, estos micromicetos desempeñan roles importantes en la rizosfera, la zona del suelo directamente influenciada por las raíces del aguacate, y pueden encontrarse tanto en suelos saludables como en aquellos afectados por enfermedades.

Un estudio pionero de Zentmyer (1980) identificó varios hongos patógenos en suelos de aguacate en México y California, destacando a *Phytophthora cinnamomi*, un oomiceto devastador que causa la "tristeza del aguacate". Aunque este estudio se centró en patógenos, también se identificaron micromicetos saprófitos, los cuales juegan un papel importante en la descomposición de materia orgánica y en la regulación de la comunidad microbiana del suelo.

Posteriormente, estudios en México por García-Jiménez y Tuset (2004) analizaron la diversidad de hongos en huertos de aguacate afectados por podredumbre de raíz y encontraron una comunidad variada de hongos micromicetos. Este estudio reportó géneros como *Trichoderma*, *Penicillium* y *Fusarium*, sugiriendo que algunos de estos hongos podrían tener efectos antagonistas contra patógenos del suelo.

Un trabajo más reciente de Herrera *et al.* (2016) evaluó la diversidad de hongos micromicetos en huertos de aguacate bajo prácticas de manejo orgánico y convencional. Los resultados indicaron que los suelos bajo manejo orgánico mostraban una mayor diversidad de micromicetos beneficiosos, como *Trichoderma* y *Aspergillus*, los cuales tienen el potencial de promover el crecimiento de las plantas y proteger las raíces de infecciones patógenas. Este estudio destaca la influencia de las prácticas de manejo en la composición de la comunidad de micromicetos en el suelo.

Beneficios potenciales de los hongos micromicetos para las plantas

Los estudios sobre micromicetos han revelado que algunos de estos hongos no solo contribuyen a la descomposición de materia orgánica, sino que también tienen propiedades que benefician directamente a las plantas. Entre los más estudiados se encuentran los hongos micoparásitos, que son capaces de parasitar a otros hongos y organismos dañinos. El género *Trichoderma* es uno de los más conocidos y estudiados en este contexto debido a sus múltiples beneficios para las plantas y su capacidad de adaptarse a diversos ambientes (Harman *et al.*, 2004).

El género *Trichoderma* que presenta micoparásitos, ha sido ampliamente estudiado por su capacidad para antagonizar a otros hongos patógenos y promover el crecimiento vegetal. *Trichoderma* spp. produce una variedad de enzimas, como quitinasas y glucanasas, que degradan las paredes celulares de los hongos patógenos, inhibiendo su crecimiento y propagación (Howell, 2003). Además, *Trichoderma* es capaz de colonizar las raíces de las plantas y formar una relación simbiótica con ellas, mejorando la absorción de nutrientes y promoviendo el desarrollo radicular.

Otro género de micromicetos que ha demostrado tener propiedades beneficiosas para las plantas es *Gliocladium*. Este hongo actúa como micoparásito, particularmente contra hongos fitopatógenos en el suelo. Además de sus capacidades de biocontrol, *Gliocladium* mejora la disponibilidad de nutrientes en el suelo y favorece la salud del suelo y la estructura radicular de las plantas (Whipps, 2001).

Aunque *Metarhizium* y *Beauveria* son más conocidos como hongos entomopatógenos (patógenos de insectos), investigaciones recientes han demostrado que también pueden beneficiar a las plantas. *Metarhizium* spp., por ejemplo, puede colonizar la rizosfera y mejorar la resistencia de las plantas al estrés, mientras que *Beauveria* spp. se ha estudiado por su capacidad para promover la germinación y el crecimiento de semillas en condiciones adversas (Sasan & Bidochka, 2012).

El uso de micromicetos como agentes de biocontrol y promotores del crecimiento vegetal ofrece un enfoque sostenible y respetuoso con el medio ambiente para la agricultura. Estos hongos actúan a través de varios mecanismos para proteger a las plantas y mejorar su desarrollo, reduciendo la necesidad de pesticidas y fertilizantes químicos. Los micromicetos pueden actuar como agentes de biocontrol al competir con los patógenos por espacio y recursos, al producir sustancias antimicrobianas y al parasitar directamente a los hongos fitopatógenos (Millan *et al.*, 2021; Baron y Rigobelo, 2022; Matas-Baca *et al.*, 2023). *Trichoderma* spp., por ejemplo, produce compuestos secundarios como peptaiboles y terpenos, que inhiben el crecimiento de patógenos como *Phytophthora* y *Fusarium* (Harman *et al.*, 2004). Además, mediante el micoparasitismo, los micromicetos son capaces de penetrar y destruir las hifas de los hongos patógenos, lo cual es especialmente útil en suelos agrícolas donde estos patógenos pueden persistir (Howell, 2003).

Muchos micromicetos también actúan como bioestimulantes al promover el crecimiento y la salud de las plantas. Estos hongos producen fitohormonas, como el ácido indolacético y el ácido giberélico, que estimulan el crecimiento radicular y mejoran la absorción de nutrientes. *Trichoderma*, por ejemplo, puede inducir cambios en el sistema de raíces que aumentan la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes (Hermosa *et al.*, 2012). Además, estos micromicetos ayudan a la planta a resistir el estrés abiótico, como la sequía

y la salinidad, lo cual es crucial para mejorar la resiliencia de los cultivos frente a condiciones ambientales adversas.

Algunos micromicetos son capaces de activar las defensas naturales de las plantas, un fenómeno conocido como resistencia sistémica inducida (ISR). Cuando un micromiceto benéfico coloniza la raíz de una planta, puede desencadenar una respuesta de defensa que prepara a la planta para resistir ataques de patógenos. Este mecanismo ha sido demostrado en estudios con *Trichoderma*, que al colonizar las raíces de las plantas activa vías de señalización en la planta, fortaleciendo su sistema inmunológico (Shoresh *et al.*, 2010).

Casos documentados de uso de micromicetos y otros organismos en la agricultura

Los productos comerciales a base de *Trichoderma* son ampliamente utilizados como biofungicidas para proteger los cultivos contra patógenos del suelo. En México, se han implementado formulaciones de *Trichoderma* en cultivos de aguacate, tomate y maíz, donde han mostrado eficacia en la reducción de enfermedades de raíz y en la mejora de la calidad de los cultivos. Estos productos se aplican directamente al suelo o como recubrimientos de semillas, lo que permite una colonización temprana del sistema radicular y una protección continua durante el ciclo de crecimiento (Mastouri *et al.*, 2010).

Los inoculantes basados en micromicetos, como *Gliocladium* y *Penicillium*, se han utilizado para mejorar el crecimiento de las plantas mediante la provisión de nutrientes y la mejora de la estructura del suelo. Estos productos son particularmente útiles en cultivos que requieren alta disponibilidad de fósforo, ya que algunos micromicetos tienen la capacidad de solubilizar fósforo y otros nutrientes inmovilizados en el suelo, poniéndolos a disposición de las plantas (Whipps, 2001).

Aunque *Metarhizium* y *Beauveria* son tradicionalmente utilizados como agentes de biocontrol de insectos, investigaciones recientes han demostrado que también benefician el crecimiento vegetal. Estos hongos son capaces de colonizar las raíces de las plantas y crear una barrera protectora que limita la entrada de nemátodos e insectos del suelo. Además, *Metarhizium* puede liberar compuestos que mejoran la resistencia de la planta

frente a condiciones de estrés abiótico, lo cual es especialmente valioso en regiones agrícolas con limitaciones de agua (Sasan & Bidochka, 2012).

Los biofertilizantes, que contienen bacterias y hongos beneficiosos, se utilizan ampliamente en cultivos de leguminosas, cereales y hortalizas para mejorar la disponibilidad de nutrientes y reducir la dependencia de fertilizantes químicos. Por ejemplo, los inoculantes de *Rhizobium* se emplean en cultivos de frijol y soya para fijar nitrógeno y mejorar la fertilidad del suelo (Kennedy & Smith, 1995).

En regiones con escasez de agua, los inoculantes microbianos que mejoran la resiliencia a la sequía han demostrado ser efectivos para mantener la productividad de los cultivos. Las bacterias que producen ácido indolacético y otros compuestos que promueven el crecimiento radicular ayudan a las plantas a absorber más agua en suelos secos. Los agricultores en zonas áridas están adoptando estos microorganismos en cultivos como trigo y sorgo para mejorar la resistencia al estrés hídrico (Yang *et al.*, 2009).

En sistemas de agricultura regenerativa, los microorganismos del suelo juegan un papel fundamental en la restauración de la salud del suelo y la reducción de la erosión. En este contexto, los biofertilizantes y los inoculantes de hongos micorrícicos se utilizan para mejorar la estructura del suelo, promover la acumulación de carbono y aumentar la biodiversidad. Esta práctica es común en cultivos perennes, como el café y los frutales, donde la salud del suelo es crucial para la sostenibilidad a largo plazo del sistema agrícola (Rhodes, 2017).

Microbiología del suelo en Nuevo León

Nuevo León es un estado ubicado en el noreste de México, con una superficie de aproximadamente 64,000 km². Su territorio se caracteriza por una gran diversidad geográfica, que incluye desde las planicies del norte hasta las montañas de la Sierra Madre Oriental. Esta variabilidad geográfica se complementa con una diversidad de suelos y climas que varían desde semiáridos y áridos en el norte y noreste, hasta subhúmedos y templados en las zonas montañosas del sur (INEGI, 2020).

La región agrícola de Nuevo León se concentra principalmente en el centro y sur del estado, donde la disponibilidad de agua y la composición del suelo favorecen el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas. Los suelos de estas áreas presentan una fertilidad limitada en comparación con otras regiones de México debido a la textura y el contenido de materia orgánica. Los suelos predominantes en el estado incluyen calcisoles, litosoles y leptosoles, los cuales tienen propiedades físicas y químicas que afectan la composición y diversidad microbiana (INEGI, 2020).

Desde el punto de vista agroclimático, Nuevo León experimenta un clima predominantemente árido y semiárido, con precipitaciones anuales que oscilan entre 300 y 700 mm y temperaturas que varían desde -5°C en las zonas montañosas hasta 45°C en las planicies del noreste (SMN, 2020). Estas condiciones extremas representan un desafío para el desarrollo agrícola, y la microbiología del suelo juega un papel fundamental en la resiliencia y sostenibilidad de los ecosistemas de suelo en la región.

La microbiología del suelo en Nuevo León es un campo de estudio relativamente joven, y aunque se han logrado algunos avances en la caracterización de algunos aspectos de la comunidad microbiana en el suelo, aún existen grandes vacíos de conocimiento. La mayoría de las investigaciones se han enfocado en la identificación de bacterias y hongos en suelos agrícolas y en la caracterización de sus roles en la fertilidad del suelo y el crecimiento de las plantas (Martínez-Vázquez *et al.*, 2015).

Estudios preliminares sugieren que los suelos de Nuevo León albergan una comunidad microbiana diversa y adaptada a las condiciones climáticas extremas de la región. Las bacterias del género *Pseudomonas* y los hongos del género *Trichoderma* son abundantes en suelos agrícolas y han sido asociados con la promoción del crecimiento vegetal y el control de enfermedades. Sin embargo, la diversidad microbiana en suelos naturales y su rol en la estabilidad ecológica y resiliencia de los ecosistemas del suelo es un área de investigación que requiere más atención (Rodríguez-Alonso *et al.*, 2018).

Martínez-Vázquez *et al.* (2015) realizaron uno de los primeros estudios sobre bacterias promotoras del crecimiento en suelos de Nuevo León. Identificaron especies de *Pseudomonas* y *Bacillus* que contribuyen al crecimiento de cultivos como el maíz y el sorgo, promoviendo la absorción de nutrientes y la resistencia a factores de estrés abiótico.

Este estudio destaca la importancia de las bacterias del suelo en la productividad agrícola de la región y sugiere que el uso de bacterias nativas como biofertilizantes podría ser una estrategia sostenible para mejorar el rendimiento de los cultivos.

Rodríguez-Alonso *et al.* (2018) estudiaron la presencia de hongos benéficos, como *Trichoderma* y *Aspergillus*, en suelos agrícolas de Nuevo León. Este estudio reveló que estos hongos no solo mejoran la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes, sino que también pueden actuar como agentes de biocontrol contra patógenos del suelo. Los hallazgos de este estudio son relevantes para el manejo de plagas en la agricultura y resaltan el potencial de los hongos como parte de una estrategia de control biológico en suelos agrícolas.

Un estudio reciente de González-Montiel *et al.* (2020) exploró la diversidad microbiana en suelos semiáridos del norte de Nuevo León mediante técnicas de secuenciación de ADN. Este análisis metagenómico reveló una gran diversidad de bacterias adaptadas a condiciones de baja disponibilidad de agua y altos niveles de salinidad, como las del género *Halomonas*. La presencia de microorganismos adaptados a condiciones extremas sugiere que estos podrían desempeñar un papel clave en la resiliencia de los ecosistemas agrícolas frente a condiciones climáticas adversas.

En un estudio comparativo, López-García *et al.* (2019) analizaron los efectos del manejo agrícola convencional y orgánico en la composición de la microbiota del suelo en Nuevo León. Los resultados indicaron que los suelos bajo manejo orgánico tenían una mayor diversidad de bacterias y hongos beneficiosos, como *Trichoderma* y *Bacillus*, en comparación con los suelos de agricultura convencional, donde predominaban microorganismos asociados a la degradación de pesticidas. Este estudio resalta la influencia de las prácticas de manejo en la salud del suelo y en la sostenibilidad de la agricultura en Nuevo León.

JUSTIFICACIÓN

La producción de aguacate en México es fundamental para la economía agrícola, generando ingresos significativos y sustentando a miles de familias rurales. Sin embargo, la creciente demanda internacional ha expuesto al cultivo a problemas fitosanitarios, especialmente por hongos y oomicetos, que afectan la salud de las plantas y la productividad de los huertos. Esto resalta la necesidad de investigar la microbiología del suelo, en particular la diversidad de micromicetos, que pueden ser cruciales para la salud y sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

En Nuevo León, la investigación sobre micromicetos es especialmente relevante, dado el escaso conocimiento sobre la microbiología del suelo en relación con el aguacate. Identificar y caracterizar los géneros de micromicetos en estos suelos permitirá entender mejor la biodiversidad microbiana de la región y su relación con la salud de los cultivos. Este conocimiento es esencial para desarrollar estrategias de manejo sostenible que promuevan la salud del suelo y reduzcan la dependencia de agroquímicos.

Dentro de los microorganismos en el suelo, existen aquellos que se han reportado como promotores del crecimiento vegetal por su actividad como la solubilización de fosfato, producción de fitohormonas que estimulan a las plantas, producción de sideróforos que pueden ser utilizadas por las plantas, y la producción de enzimas para la descomposición de materia orgánica en descomposición para la liberación de nutrientes. Hay microorganismos que sirven como antagonistas, protegiendo a las plantas de enfermedades que inician a nivel de las raíces, y hay microorganismos que estimulan los mecanismos de defensa de las plantas.

Proporcionar datos sobre la diversidad microbiana en suelos de huertos de aguacate puede servir como base para implementar prácticas agrícolas que respeten la biodiversidad del suelo, contribuyendo a una agricultura sostenible. La investigación propuesta es relevante no solo para la producción de aguacate en Nuevo León, sino también para la comprensión de las interacciones microbianas en sistemas agrícolas del norte del país.

HIPÓTESIS

La diversidad de micromicetos cultivables en los suelos de huertos de aguacate en el estado de Nuevo León varía significativamente entre diferentes huertos, y esta variación está asociada con factores edáficos, prácticas de manejo agrícola y la salud del cultivo.

OBJETIVO DEL TRABAJO

Objetivo general

- Determinar la diversidad de micromicetos cultivables en los suelos de huertos de aguacate en el estado de Nuevo León.

Objetivos particulares

- Identificar y clasificar los morfotipos y géneros de micromicetos presentes en los suelos de cinco huertos de aguacate en Nuevo León.
- Calcular el índice de diversidad de Shannon-Wiener para los morfotipos y géneros de micromicetos aislados de cada huerto, y analizar las diferencias significativas entre ellos.
- Calcular el índice de diversidad de Simpson para los morfotipos y géneros de los micromicetos aislados de cada huerto.
- Calcular el índice de diversidad de Simpson y Margalef para los morfotipos y géneros de los micromicetos aislados de cada huerto.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

Laboratorio de Micología y Fitopatología, del Departamento de Microbiología e Inmunología, de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Huertas de estudio

En el 2020 se obtuvieron muestras de suelo de cinco huertas de aguacate, tres en el mes de agosto del municipio de Aramberri (MA-1, MA-2, MA-3) y dos en el mes de noviembre del municipio de Bustamante (MB-1, MB-2), del estado de Nuevo León. La ubicación georreferenciada de las huertas y fechas de colecta se muestran en el **Tabla 1**.

Tabla 1. Información de huertas de aguacate de las que se obtuvieron muestras de suelo para el aislamiento de micromicetos.

Municipio-huerta	Propietario	Coordenadas	Número de submuestras	Fecha de colecta
Aramberri 1 (MA-1)	María Gordiano	24.019339, -99.788944	5	15/08/2020
Aramberri 2 (MA-2)	Huerta la Cabaña	24.055258, -99.804128	6	15/08/2020
Aramberri 3 (MA-3)	Lilia Villanueva	24.120603, -99.818822	5	15/08/2020
Bustamante 1 (MB-1)	Daniel Santos	26.538965, -100.514231	7	28/11/2020
Bustamante 2 (MB-2)	Daniel Santos	26.533027, -100.498780	5	28/11/2020

Dentro de los cultivos de aguacate se establecerá una diagonal de árboles que atraviese el terreno, empezando por una esquina de este, y que termine lo más cercano posible a la otra esquina. Se escogerán 5 árboles que se encuentren distribuidos sobre esta diagonal, en los cuales se realizarán los muestreos de suelo (**Figura 1**).

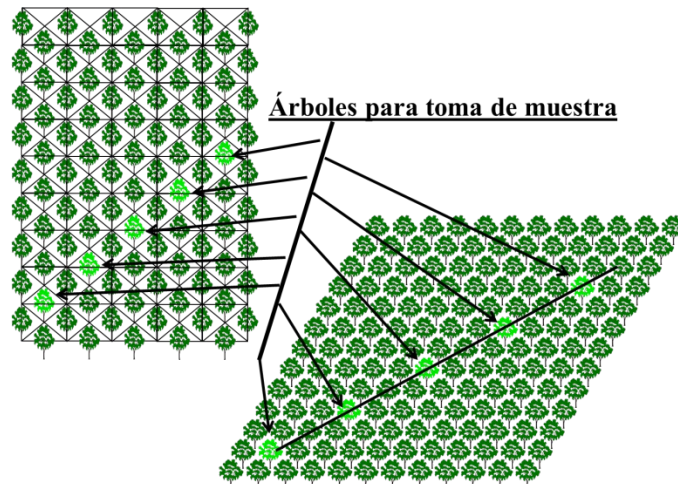


Figura 1. Línea diagonal de árboles que empiezan en una esquina y atraviesan el terreno. Sobre la diagonal, se indican los árboles donde se muestreó suelo. Autor: Rodríguez-Guerra, R.

El muestreo se realizó colectando muestras de suelo bajo la copa de árboles, a una distancia media entre el tronco y el borde de la copa (**Figura 2**), y a una profundidad de 15 - 30 cm, sobre la diagonal trazada arbitrariamente en cada huerta. El suelo colectado de cada árbol consistió en 50 gr aproximadamente y fue vertido a una sola bolsa de hule por cada huerta. Las muestras se transportaron al Laboratorio de Micología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

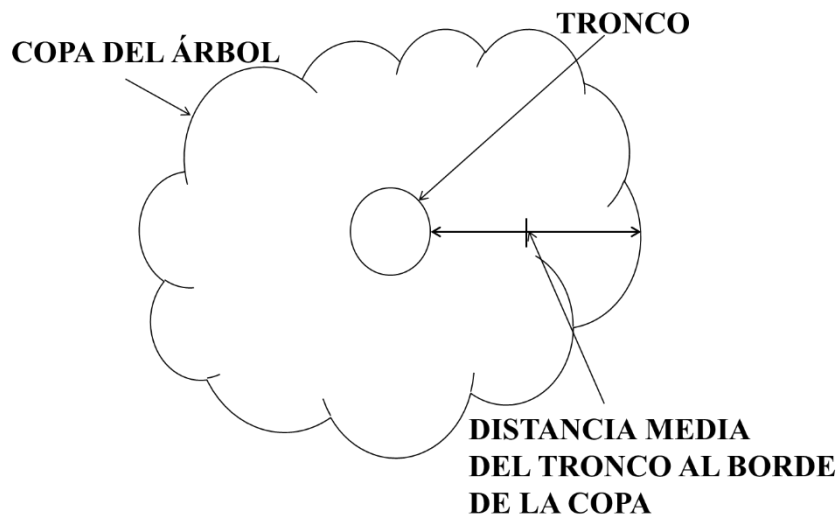


Figura 2. Las muestras de suelo se consiguieron a partir de la distancia media entre el tronco del árbol de aguacate y el borde de su copa. Sitio donde se tomó la muestra de suelo en los árboles seleccionados de los cultivos de aguacate. Autor: Rodríguez-Guerra, R.

Aislamiento de micromicetos

De cada muestra obtenida de las huertas se realizaron cuatro diluciones en agua destilada estéril a partir de un gramo de suelo (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4}). De las diluciones trabajadas, se incorporaron volúmenes de 50 μL en cajas de Petri conteniendo el medio de cultivo papa dextrosa agar acidificado (200 $\mu\text{L L}^{-1}$ de ácido láctico al 85%, incorporado antes de vaciar el medio a cajas Petri). Las diluciones trabajadas fueron 10^{-2} , 10^{-3} y 10^{-4} y se inocularon en 5, 13 y 5 cajas Petri, respectivamente y se dispersaron con un asa de Digralsky. De las últimas tres diluciones se incorporó un volumen de 50 μL a 5, 13 y 5 cajas de Petri conteniendo el medio de cultivo papa dextrosa agar acidificado (200 $\mu\text{L L}^{-1}$ de ácido láctico al 85%, incorporado antes de vaciar el medio a cajas Petri), y se dispersaron con un asa de Digralsky. Las cajas Petri inoculadas se dejaron semiabiertas dentro de una campana de flujo laminar, para evaporar el agua libre que se encontraba sobre el agar, permitiendo que los microorganismos inoculados se asienten sobre el agar. Las cajas Petri se mantuvieron semiabiertas para permitir el secado sobre la superficie del medio de cultivo, y se cerraron. Las cajas Petri se abrieron a las 24-48 hr y se observaron al microscopio compuesto; las microcolonias de hongos se extrajeron con una aguja entomológica adherida a una aguja de disección y se transfirieron a nuevas cajas Petri con el mismo medio de cultivo. La pureza de las colonias fue revisada durante las siguientes 72 hr.

Caracterización morfológica de micromicetos

De cada huerta se registró el número de aislamientos y las microcolonias inicialmente subcultivadas se caracterizaron visualmente a los siete días con base a la apariencia y diámetro de la colonia, al color del micelio superficial, así como a la apariencia y color de la parte inferior de la colonia, la producción de color en el sustrato y por la apariencia al microscopio de hifas en el borde de las colonias (Rodríguez-Guerra *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2013). Las colonias que presentaron un conjunto único de características se definieron como morfotipos. Se seleccionó arbitrariamente una cepa de cada morfotipo para utilizarla en estudios posteriores y éstas se mantienen en el Laboratorio de Micología y Fitopatología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, conservadas en agua estéril.

Identificación a nivel de género

Las cepas seleccionadas de los diversos morfotipos se identificaron al nivel de género utilizando las claves de Barnett y Hunter (1998).

Para esto, las cepas se trabajaron a partir del 5to día de su crecimiento en medio de cultivo papa dextrosa agar para la realización de preparaciones en portaobjetos, para la observación de estructuras microscópicas de los micromicetos representativos de cada morfotipo. Se buscó en las preparaciones a los propágulos de los micromicetos, los cuales pueden ser esporas asexuales (conidias, esporangiosporas, clamidosporas, artroconidios) y esporas sexuales (como las ascosporas). Al encontrar propágulos, se revisó la forma, la cantidad de septos, los tipos de septos (transversales y/o longitudinales), la presencia o ausencia de pigmento, y el tamaño de dichas estructuras. También se buscó a las estructuras productoras de dichos propágulos (esporangios, esporangióforos, conidióforos, células conidiogénicas, fiálides). Además, se buscaron otras estructuras que pueden ayudar a determinar el filum o el género del micromiceto (como las fíbulas, los esclerocios, entre otros).

Existen algunos hongos que pueden ser identificados utilizando solamente los conidios (como los géneros *Curvularia*, *Bipolaris*, *Alternaria*, *Colletotrichum*, entre otros). Otros hongos se identifican observando la estructura que produce dichos conidios (conidióforos; como los géneros *Penicillium*, *Aspergillus*, *Gliocladium*, entre otros). Existen hongos que pueden producir dos tipos de esporas asexuales como los géneros *Fusarium* y *Thielaviopsis*, por lo que fue importante analizar bien las preparaciones para no omitir ninguna estructura de los hongos.

La presencia de fíbulas es un indicativo de que el micromiceto es un micelio secundario de un *Basidiomycota*. Existen pocos hongos que son capaces de producir esclerocios y clamidosporas como forma de resistencia/sobrevivencia.

Una vez realizadas las observaciones en las preparaciones, comparamos lo observado contra las descripciones e ilustraciones de las claves de Barnett y Hunter (1998) para establecer el género de cada micromiceto. Las cepas que no fue posible identificar, se agruparon con base a características distintivas comunes.

Diversidad de morfotipos y géneros

Se determinaron los índices de diversidad de Shannon-Wiener (Shannon, 1948) y de Simpson, el índice de dominancia de Simpson y el índice de riqueza de Margalef para morfotipos, y para los géneros y grupos definidos.

Índice de Shannon-Wiener: $H' = -\sum(p_i * \ln(p_i))$

Índice diversidad de Simpson: $1-\lambda = 1-\sum(p_i^2)$

Índice de dominancia de Simpson: $\lambda = \sum(p_i^2)$

Índice de riqueza de Margalef: $D_{Mg} = (S-1)/\ln(N)$

donde:

p_i = Proporción de aislados de cada morfotipo, y de los géneros y grupos definidos respecto al total de aislados.

\ln = Logaritmo natural.

S = Número total de morfotipos o géneros y grupos evaluados.

N = Número total de aislados evaluados.

En este estudio, los análisis de diversidad fueron aplicados sobre los morfotipos o sobre los géneros/grupos encontrados, no sobre especies.

- El índice de Margalef (D_{Mg}) indica la riqueza de especies. Mientras mayor sea el índice, mayor cantidad de especies distintas habrá en la muestra. Este índice no refleja si las especies son igual de abundantes o si hay especies dominantes.
- El índice de Shannon-Wiener (H') toma en consideración la abundancia de las especies y si hay especies dominantes. Un alto índice significa que hay una gran diversidad y/o que las especies estudiadas tienen una abundancia similar entre ellas. Un bajo índice significa que hay una baja diversidad y/o que hay una o pocas especies que son muy dominantes.

- El índice de diversidad de Simpson ($1-\lambda$) es un índice que está más enfocado a la dominancia de las especies. Mientras más alto sea el valor, indica una menor probabilidad de que dos individuos elegidos al azar pertenezcan a la misma especie, indicando que hay una mayor diversidad, y viceversa.

Con los géneros identificados se estableció cuáles han sido reportados previamente como entomopatógenos o agentes de biocontrol contra fitopatógenos. Adicionalmente se revisó la literatura para establecer qué géneros identificados han sido reportados como agentes fitopatógenos en aguacate.

Análisis estadísticos

Se determinó las diferencias significativas ($p= 0.05$) entre los índices de diversidad de Shannon-Wiener de las huertas trabajadas (Hutcheson, 1970) para los géneros y grupos.

RESULTADOS

Se obtuvieron 518 aislados de hongos de las cinco huertas muestreadas, variando de 88 (MA-3) a 114 (MA-2) entre huertas. De los aislados obtenidos se determinaron 291 morfotipos, variando la cantidad de morfotipos de 46 (MB-2) a 71 (MA-2) entre huertas; los morfotipos determinados de cada huerta son exclusivos para cada una, ya que no se estableció la relación de morfotipos comunes entre huertas. Una muestra de la diversidad de morfotipos presentes en la huerta MA-1 se presenta en la **Figura 3**.

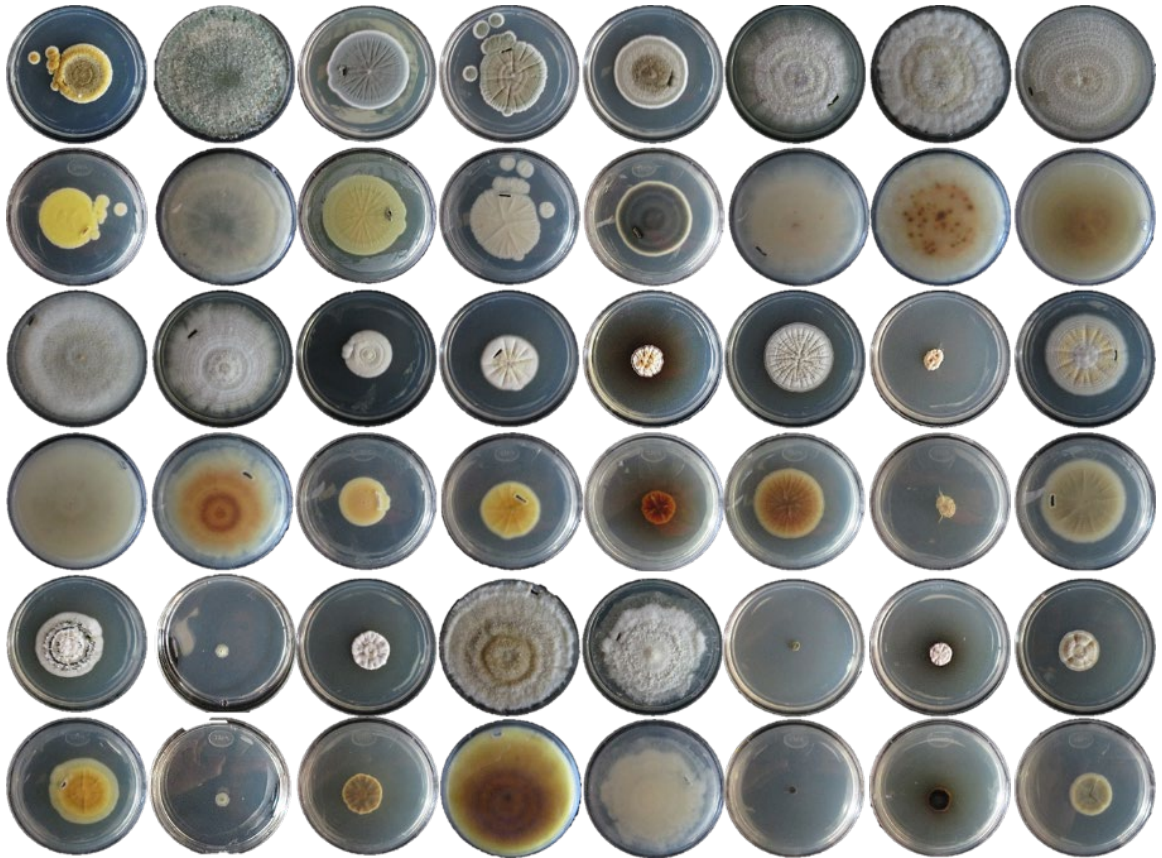


Figura 3. Muestra de morfotipos aislados de la muestra uno de Aramberri (MA-1). Vista frontal (filas 1, 3 y 5) e inversa (filas 2, 4 y 6) de las colonias.

De los 291 morfotipos caracterizados, 225 (77.3 %) fueron identificados al nivel de género, agrupándolos en 44 géneros distintos; mientras que 66 morfotipos (22.7 %) se distribuyeron en siete grupos definidos de hongos con base a características comunes en cada uno (**Tabla 2**).

De entre los hongos no identificados a nivel de género, están los que producen aleuriosporas, las cuales son conidios que por lo general son pequeños, unicelulares y se producen a los laterales de las hifas. Otro grupo de hongos es el que produce artrosporas, las cuales son conidios que se forman a partir de la segregación de las hifas, resultando por lo general en conidios con forma de “ladrillo” y que se encuentran alineados en fila. También se encontró una cepa que solo produjo ascas y ascosporas, por lo que conformó al grupo de los ascomicetos. Encontramos dos cepas que al crecer en caja Petri, producía sus conidióforos de manera abundante en zonas puntuales de la colonia, donde también producía conidios abundantemente, conformando al grupo de los que producen esporodoquios. De entre los aislamientos, también encontramos colonias levaduriformes, que presentan células circulares y ovoides y carecen de hifas. También se encontraron cepas que solo produjeron hifas y micelio; tras su observación al microscopio, no fue posible encontrar ningún otro tipo de célula o spora o estructura, por lo que se asignaron como micelio estéril. Por último, también encontramos colonias que producen clamidosporas muy grandes, con diámetros mayores a los 100 μm , los cuales fueron asignados al grupo de los glomeromicetos.

Tabla 2. Número de aislamientos/morfotipos de géneros y grupos de hongos con características comunes en huertas de aguacate del estado de Nuevo León.

Huertos Géneros	MA-1	MA-2	MA-3	MB-1	MB-2
<i>Aposphaeria</i>					1 / 1
<i>Aspergillus</i>	7 / 3	11 / 5	5 / 3	8 / 4	11 / 5
<i>Aureobasidium</i>				2 / 1	
<i>Beauveria</i>	1 / 1	1 / 1		2 / 1	
<i>Bipolaris</i>		5 / 2			
<i>Botryotrichum</i>					1 / 1
<i>Cephalosporium</i>	14 / 6	14 / 9	5 / 3	7 / 4	5 / 2
<i>Chaetomium</i>		1 / 1	3 / 2		
<i>Cladosporium</i>	4 / 2	3 / 2		9 / 4	15 / 5
<i>Colletotrichum</i>			1 / 1		
<i>Cylindrocarpon</i>		2 / 1			
<i>Cylindrocladium</i>	2 / 1	1 / 1			
<i>Curvularia</i>				3 / 1	
<i>Diplosporium</i>			2 / 1		
<i>Doratomyces</i>		4 / 2			
<i>Epicoccum</i>					3 / 1
<i>Fusarium</i>	18 / 11	10 / 7	22 / 17	3 / 2	15 / 6
<i>Gliocladium</i>	5 / 3	8 / 4		3 / 2	6 / 3
<i>Gliomastix</i>		2 / 1			
<i>Graphium</i>					3 / 1
<i>Heterosporium</i>	2 / 1				
<i>Humicola</i>	2 / 2	3 / 3	13 / 9	1 / 1	
<i>Hymenella</i>		1 / 1			
<i>Ilosporium</i>	2 / 2			2 / 1	
<i>Metarhizium</i>	3 / 1		3 / 2		
<i>Microsporium</i>			1 / 1		
<i>Monocillium</i>	2 / 2				2 / 1

Continuación de la Tabla 2...

<i>Nodulosporium</i>					1 / 1
<i>Paecilomyces</i>	1 / 1	3 / 2	3 / 2	2 / 1	2 / 1
<i>Penicillium</i>	4 / 3	5 / 2	9 / 5	7 / 3	13 / 5
<i>Phialophora</i>			2 / 1		
<i>Periconia</i>		2 / 1			
<i>Pestalotia</i>	5 / 2	2 / 2			
<i>Pseudotorula</i>	2 / 1				
<i>Pyrenochaeta</i>	2 / 1				
<i>Robillarda</i>		2 / 1		2 / 1	
<i>Sporotrix</i>		1 / 1			
<i>Stachybotrys</i>	2 / 1	6 / 4			
<i>Synematium</i>					3 / 1
<i>Trichocladium</i>	3 / 1		1 / 1		7 / 3
<i>Trichoderma</i>	3 / 1	2 / 2	5 / 4	3 / 2	1 / 1
<i>Tritirachium</i>				3 / 1	
<i>Verticillium</i>	1 / 1	1 / 1		2 / 1	3 / 1
<i>Wallemia</i>		1 / 1			
Total de géneros	21	24	14	16	17
Huertos					
Grupo	MA-1	MA-2	MA-3	MB-1	MB-2
Aleuriosporas	2 / 1		3 / 3	5 / 3	
Artrosporas		2 / 1		1 / 1	
Ascomiceto			1 / 1		
Esporodoquios		2 / 2			
Levadura				5 / 3	
Micelio estéril	25 / 13	17 / 10	8 / 6	23 / 12	18 / 7
Glomeromiceto	1 / 1	2 / 1	1 / 1		
Total de grupos	3	4	4	4	1

Los índices de diversidad de Shannon-Wiener y Simpson, y el índice de riqueza de Margalef respecto a los morfotipos encontrados variaron de 3.77 a 4.18, 0.976 a 0.984 y de 9.57 a 14.78 en las huertas MB-2 y MA-2, respectivamente. En cuanto a los géneros y grupos, los mismos índices de diversidad variaron de 2.46 a 2.93 y de 0.881 a 0.928 en las huertas de MA-3 y MA-2, respectivamente, mientras que la riqueza de Margalef oscila de 3.62 a 5.70 en las huertas de MB-2 y MA-2 (**Tabla 3**).

Los índices de diversidad calculados al considerar los morfotipos, fue mayor que al considerar los géneros y grupos definidos, debido a que los aislamientos se agruparon en un mayor número de conjuntos. Analizando los índices de Margalef, podemos darnos una idea de cuál huerto tiene una mayor diversidad de hongos. Considerando los índices de Shannon-Wiener, podemos ver cual huerta tiene una mayor diversidad y con una abundancia más similar entre los hongos que lo componen. Con el índice de diversidad de Simpson, podemos ver que huertas cuentan con menos hongos repetidos en el estudio.

Tabla 3. Distribución de morfotipos y género y grupos de micromicetos aislados de suelos de huertas de aguacate e índices obtenidos en cada huerta analizada.

	MA-1	MA-2	MA-3	MB-1	MB-2
Número de aislados	113	114	88	93	110
Número de morfotipos	62	71	63	49	46
Número de géneros y grupos	24	28	18	20	18
Índices para morfotipos					
Índice de diversidad de Shannon-Wiener	4.04	4.18	4.08	3.83	3.77
Dominancia de Simpson	0.019	0.016	0.018	0.023	0.024
Índice de diversidad de Simpson	0.981	0.984	0.982	0.977	0.976
Índice de riqueza de Margalef	12.90	14.78	13.85	10.59	9.57
Índices para géneros y grupos con características comunes					
Índice de diversidad de Shannon-Wiener	2.67	2.93	2.46	2.63	2.51
Dominancia de Simpson	0.105	0.072	0.119	0.103	0.101
Índice de diversidad de Simpson	0.895	0.928	0.881	0.897	0.899
Índice de riqueza de Margalef	4.86	5.70	3.80	4.19	3.62

Considerando el total de géneros y grupos de hongos presentes en las huertas de cada municipio, en suelos de huertas del municipio de Aramberri se presenta la mayor riqueza (6.95) con 41 géneros y grupos respecto al municipio de Bustamante (5.08) con 28 géneros y grupos (**Tabla 4**). Además, diez géneros y grupos ocurren de manera exclusiva en Bustamante, mientras que en Aramberri ocurren 23; y sólo 18 son compartidos entre ambos municipios (**Tabla 2**).

Tabla 4. Distribución de géneros y grupos de micromicetos aislados de las cinco huertas y los índices obtenidos por cada municipio.

	Aramberri	Bustamante
Número de aislados	315	203
Géneros y grupos	41	28
Índice de diversidad de Shannon-Wiener	2.99	2.76
Dominancia de Simpson	0.080	0.092
Índice de diversidad Simpson	0.920	0.908
Índice de riqueza de Margalef	6.95	5.08

De estos últimos, en los grupos de hongos con aleuriospora, artrospora, esporodoquio, y del grupo glomeromiceto, las características de sus estructuras no concordaron con algún género incluido en las claves utilizadas. Además, en el grupo de micelio estéril no se observó la ocurrencia de fibulas en las hifas que sugiriera que algún morfotipo correspondiera a los basidiomicetos, o de características que pudieran sugerir su identidad a géneros como *Rhizoctonia*, *Macrophomina* y *Sclerotinia*.

La distribución de géneros identificados y grupos definidos de hongos en huertas de cada municipio se presenta en la **Figura 4**. En el municipio de Aramberri se determinaron 41 géneros y grupos, de los cuales el 21.9% (9) se presentan distribuidos en las tres huertas muestreadas y el 12.2% (5), 26.8% (11) y 12.2% (5) fueron exclusivos de MA-1, MA-2 y MA-3 respectivamente, y el resto fue compartido entre pares de huertas. Mientras que en Bustamante ocurrieron 28 géneros y grupos, de los cuales el 35.7% (10) ocurren en ambas huertas y el 35.7% (10) y 28.6% (8) son exclusivos de MB-1 y MB-2.

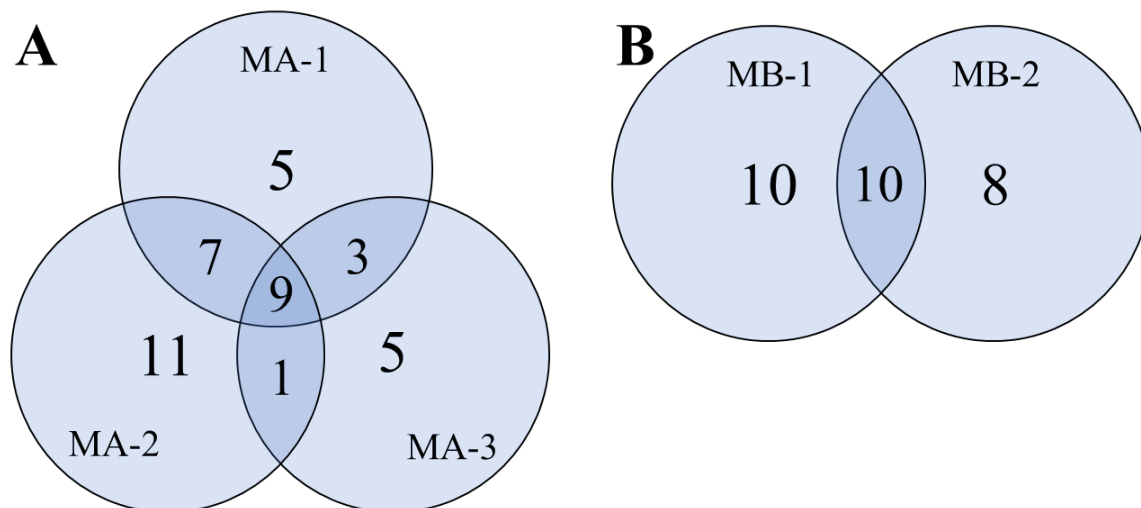


Figura 4. Distribución de géneros y grupos en huertas muestreadas de los municipios de Aramberri (A) y Bustamante (B).

El índice de diversidad de Shannon-Wiener de géneros y grupos varió de 2.46 (MA-3) a 2.93 (MA-2), mientras que para morfotipos varió de 3.77 (MB-2) a 4.18 (MA-2) y aunque el índice de dominancia de Simpson muestra que las huertas carecen de géneros o grupos dominantes (**Tabla 3**), aquellos géneros y grupos que presentaron una cantidad de aislamientos igual o mayor al 10% del total presente en cada huerta, o del total en las cinco huertas, fueron considerados los más predominantes. En la huerta MA-1 predominó micelio estéril, *Fusarium* y *Cephalosporium*, en la huerta MA-2 micelio estéril y *Cephalosporium*, en MA-3 *Fusarium*, *Humicola* y *Penicillium*, en MB-1 micelio estéril y en MB-2 micelio estéril, *Fusarium*, *Cladosporium*, *Penicillium* y *Aspergillus*. Los géneros y grupos predominantes de las cinco huertas fueron micelio estéril (91 aislamientos) y *Fusarium* (68 aislados); otros géneros que abundaron son *Cephalosporium* (45 aislamientos), *Aspergillus* (42 aislamientos) y *Penicillium* (38 aislamientos). Seis géneros de hongos (*Aspergillus*, *Cephalosporium*, *Fusarium*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Trichoderma*) y el grupo de micelio estéril ocurrieron de manera común en las cinco huertas de ambos municipios. El grupo determinado como glomeromiceto únicamente está representado en las tres huertas de Aramberri; ningún otro género o grupo está representado exclusivamente en las tres huertas de Aramberri y ausente en ambas muestras de Bustamante, y viceversa.

De acuerdo con la prueba de Hutcheson ($p= 0.05$), se encontró que el índice de diversidad de Shannon-Wiener de la huerta MA-2 es la única que presenta diferencias significativas en comparación con los índices de las demás huertas de Aramberri y Bustamante (**Tabla 5**).

Tabla 5. Prueba de t de Hutcheson ($p= 0.05$) entre los índices de diversidad de Shannon-Wiener para géneros y grupos definidos de las huertas muestreadas.

		MA-1	MA-2	MA-3	MB-1	MB2
Huerta	Índice de Shannon-Wiener (de la Tabla 3)	2.67	2.93	2.46	2.63	2.51
MA-1	2.67					
MA-2	2.93	*				
MA-3	2.46	ns	*			
MB-1	2.63	ns	*	ns		
MB-2	2.51	ns	*	ns	ns	

*= Existen diferencias significativas entre los índices.

ns= No existe diferencias significativas entre los índices.

DISCUSIÓN

El estudio de la diversidad de hongos es útil para establecer relaciones de su composición en ecosistemas naturales y alterados por la actividad humana, así como conocer la distribución, abundancia y papel en agroecosistemas. En esta investigación se obtuvieron resultados de la diversidad de morfotipos y géneros de micromicetos cultivables a partir de suelo de huertas de aguacate del estado de Nuevo León. En este estudio se ha obtenido la mayor cantidad de aislamientos de hongos cultivables de suelo de huertas de aguacate. De los 518 aislamientos obtenidos, 291 morfotipos fueron definidos, aunque no fue posible establecer la relación de los morfotipos entre las diferentes huertas debido a que se requería contar con todos los aislamientos creciendo simultáneamente, y ser evaluados al mismo tiempo para establecer morfotipos comunes entre ellos. Sin embargo, la variación del número de aislamientos cultivables obtenidos de cada huerta fue debida a que se consideró que la mayor diversidad de microcolonias en cada una de ellas había sido obtenida en el tiempo establecido para su aislamiento. No se descarta que algunos micromicetos cultivables pudieron tener la capacidad de germinar y formar microcolonias después de las 48 hr o contar con requerimientos especiales para su crecimiento, como ha sido considerado por Filion *et al.* (2003).

En México son escasas las investigaciones dirigidas al estudio de la diversidad de micromicetos en huertas de aguacate. Solís-García *et al.* (2021) realizaron un estudio en una huerta en el estado de Veracruz en el que determinaron el efecto de árboles sintomáticos y asintomáticos por pudrición de raíz debida a *Phytophthora* sobre el microbioma de la rizosfera de aguacate, mediante un análisis metagenómico del suelo; mientras que Valle-Aguirre *et al.* (2016) identificaron morfológicamente hongos presentes en el aire de huertas del estado de Morelos. Sin embargo, también se ha dirigido la búsqueda de agentes de biocontrol en suelo de huertas de aguacate en el estado de Nayarit (Vega-Torres *et al.*, 2019).

Los índices de diversidad observados en esta investigación son menores para géneros y grupos definidos con características comunes que, para los morfotipos de hongos aislados, lo anterior demuestra que ocurre gran variación en cuanto a las características morfológicas de los aislamientos pertenecientes a un mismo género o grupo (**Tabla 3**). Esto es comúnmente observado cuando se realizan caracterizaciones morfológicas de hongos, como ha sido observado por Solís-García *et al.* (2021) quienes a partir de 46 aislamientos de hongos obtenidos de raíces de aguacate determinaron 10 morfotipos que correspondieron a sólo cuatro géneros. Sin embargo, también se ha reportado que aislamientos de morfotipos distintos pueden ser taxonómicamente idénticos utilizando patrones de restricción de los espaciadores transcritos internos del rDNA (Watrud *et al.*, 2006).

Los índices de diversidad de Shannon-Wiener obtenidos para géneros y grupos en las cinco huertas bajo estudio son menores a aquellos obtenidos por Solís-García *et al.* (2021), quienes mediante análisis de unidades taxonómicas operativas de hongos, determinadas mediante el análisis de secuencias espaciadoras transcritas internas (ITS) del rDNA suelo de árboles de aguacate sintomáticos y asintomáticos por pudrición de raíz, encontraron de 545 a 574 OTUs que resultaron en índices de 4.56 y 4.81 respectivamente, en el estado de Veracruz. Lo anterior demuestra que el análisis metagenómico permite definir la ocurrencia de mayor diversidad de taxones mayores de hongos en suelo respecto al procedimiento tradicional llevado aquí; sin embargo, en este estudio se desarrolló un banco de micromicetos cultivables de 291 aislamientos representando cada morfotipo y con los que es posible realizar estudios diversos que permitan su utilización en el sistema de producción de aguacate.

La mayor diversidad (Shannon-Wiener: 2.99; Simpson: 0.92) y riqueza (6.95) de géneros y grupos, así como el mayor número de géneros y grupos exclusivos (23) en el municipio de Aramberri respecto al municipio de Bustamante, puede ser influenciada por las diferentes condiciones climáticas que ocurren en ambos municipios. Esto es sustentado con base a que la mayor diversidad de hongos en suelo ocurre en zonas templadas o tropicales respecto a zonas áridas o muy áridas (Maestre *et al.*, 2015; Aguirre-Acosta *et*

al., 2014), ya que el municipio de Aramberri cuenta con clima templado mientras que en Bustamante es principalmente árido.

De los 44 géneros identificados en este estudio, 16 (*Aspergillus*, *Beauveria*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Curvularia*, *Colletotrichum*, *Epicoccum*, *Fusarium*, *Humicola*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Pestalotia*, *Trichocladium*, *Trichoderma*, *Tritirachium*, *Verticillium*) han sido registrados previamente a partir de análisis metagenómicos o por aislamiento de muestras de suelo (Aguirre-von-Wobeser *et al.*, 2021; Arjona-Girona y López-Herrera, 2018; Tofiño *et al.*, 2012; Violi *et al.*, 2007; Borneman y Hartin, 2000), raíces (Solís-García *et al.*, 2021; López-Herrera y Melero-Vara, 1991), hojas en suelo (Borneman y Hartin, 2000), aire (Valle-Aguirre *et al.*, 2016), corteza (Aguirre-von-Wobeser *et al.*, 2021) y como endófitos en diversos tejidos de la planta (Pérez-Martínez *et al.*, 2018) en huertas de aguacate. Los resultados de esta investigación permiten incluir 28 nuevos géneros de micromicetos cultivables asociados a suelo de huertas de aguacate, a los previamente reportados por los autores anteriores. Sin embargo, es posible que entre los 66 morfotipos en los siete grupos definidos de hongos se encuentren nuevos géneros. Entre estos grupos, el más abundante y distribuido en las huertas de ambos municipios, es el de micelio estéril con 91 aislamientos y 48 morfotipos, y ninguno de éstos fue reconocido como *Rhizoctonia*, el único género de micelio estéril que se ha reportado solamente en raíces de plantas de aguacate con síntomas de marchitez (López-Herrera y Melero-Vara, 1991). Lo anterior sugiere que el análisis de secuencias del ADN de hongos que no producen esporas como medio de reproducción en medios de cultivo, puede incrementar la diversidad de micromicetos cultivables asociados al agroecosistema de aguacate.

De los pocos estudios que podemos citar para comparar índices de diversidad de suelo de aguacatales, está el estudio de Raya-Montaña *et al.* (2019), donde encontraron un índice de Shannon-Weaver de 3.192 al estudiar esporas de micorrizas en aguacatales de Michoacán. Este índice es mayor a los índices encontrados de géneros y grupos, pero menor a los índices de morfotipos. Un estudio de Huang y colaboradores (2020) en diferentes huertos de aguacate de China, estudiaron la presencia de hongos micorrízicos,

encontrando índices de Shannon-Wiener que van de 2.24 a 3.22. A pesar de que estos estudios trabajaron con hongos micorrízicos, comparando estos índices de diversidad, los encontrados en este trabajo no son tan diferentes. No pudimos encontrar otros estudios de donde estudien la diversidad de hongos en la rizosfera de árboles de aguacate, no solo de hongos micorrízicos, por lo que consideramos que este trabajo es una nueva contribución para el conocimiento de la diversidad fúngica en huertos de aguacate.

Seis géneros (*Fusarium*, *Cephalosporium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Trichoderma*) ocurrieron de manera común en las huertas de ambos municipios, y los más abundantes considerando las cinco huertas bajo estudio fueron *Fusarium* (68 aislamientos), *Cephalosporium* (45 aislamientos), *Aspergillus* (42 aislamientos) y *Penicillium* (38 aislamientos). Veinticuatro géneros y tres grupos con características comunes fueron representados por menos de cinco aislamientos en alguna de las cinco huertas bajo estudio. La abundancia de *Fusarium*, *Aspergillus* y *Penicillium* también ha sido observada en suelos de huertas del estado de Michoacán (Aguirre-von-Wobeser *et al.*, 2021), lo que sugiere que pueden estar realizando alguna función en el agroecosistema de aguacate. De estos géneros, *Fusarium* es reconocido por contar con especies de importancia económica que causan pudrición de raíz en numerosos cultivos, incluyendo aguacate (Olalde-Lira *et al.*, 2020); y otro género reportado como patógeno de raíz en aguacate identificado en este estudio es *Verticillium* (Pérez-Jiménez, 2008), el cual fue representado por un bajo número de aislamientos. Por lo anterior, de los 43 morfotipos presentes entre los 68 aislamientos obtenidos del género *Fusarium*, 32 se identificaron utilizando las claves de Nelson *et al.* (1983) y la descripción de especies de Leslie y Summerell (2008). El 69 % de los morfotipos se identificaron como *F. solani*, el 25 % como *F. oxysporum* y el 3% como *F. equiseti* y *F. semitectum*. La elevada frecuencia en suelo de aislamientos de *Fusarium*, y la presencia de las especies *F. solani* y *F. oxysporum*, pudiera sugerir su asociación como patógenos de raíz de aguacate en las huertas analizadas, como se ha reportado por Olalde-Lira *et al.* (2020). Además, cepas de *F. solani*, *F. equiseti* y *Fusarium* spp., aisladas de raíces de aguacate (Solís-García *et al.*, 2021) y de *F. oxysporum* aisladas de tallos (Ceja-Torres *et al.*, 2000) son capaces de causar necrosis en tallo cuando son inoculadas artificialmente.

La abundancia observada de los géneros *Aspergillus* y *Penicillium* concuerda con investigaciones realizadas en diversos suelos (Gomez *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2014), aunque en otros se ha reportado que ambos géneros están ampliamente distribuidos, pero en baja frecuencia (Zhong *et al.*, 2022); además, se considera que especies de estos géneros juegan un papel en la solubilización de fosfato en suelo (Elias *et al.*, 2016). El género *Cephalosporium* (actualmente aceptado *Acremonium*) es considerado como un saprobio en suelo y restos vegetales (Park *et al.*, 2017) y algunas especies causan enfermedades en humanos y plantas (Summerbell *et al.*, 2018; Ortiz-Bustos *et al.*, 2015); sin embargo, y al igual que *Fusarium*, *Aspergillus* y *Penicillium*, su identificación al nivel de especie o relación con géneros, familias y aún órdenes ha cambiado con base a análisis filogenéticos de secuencias de diversos loci (Summerbell *et al.*, 2011; Gräfenhan *et al.*, 2011; Crous *et al.*, 2021; Houbraken *et al.*, 2020). Otros géneros ausentes en algunas huertas como *Beauveria*, *Gliocladium* y *Metarhizium*, así como *Paecilomyces* y *Trichoderma* presentes en las cinco huertas, están considerados entre los principales agentes de biocontrol contra plagas y hongos fitopatógenos (Thambugala *et al.*, 2020; Baron *et al.*, 2019). El contar con cepas de estos géneros de micromicetos puede permitir su utilización en los sistemas de producción de aguacate para el control de problemas fitosanitarios que enfrentan.

Los resultados obtenidos demuestran la existencia de gran diversidad de géneros de micromicetos cultivables presentes en suelos de huertas de aguacate en pequeñas áreas de producción del estado de Nuevo León, México, y es importante la implementación de estos estudios en regiones de otros países en los que se produce el aguacate para contar con cepas de uso potencial y recurso natural para mejorar sus sistemas de producción.

CONCLUSIONES

Esta investigación ha logrado identificar un total de 44 géneros de micromicetos cultivables en los suelos de huertas de aguacate en el estado de Nuevo León, de los cuales 28 representan nuevos géneros asociados a este cultivo. Además, se han agrupado 7 grupos de hongos, a partir de 291 morfotipos determinados. La diversidad encontrada en los suelos de los huertos muestreados no solo enriquece el conocimiento sobre la microbiota del aguacate en México, sino que también resalta la importancia de los micromicetos en los ecosistemas agrícolas.

Entre los géneros identificados, se destacan aquellos que contienen especies fitopatógenas, entomopatógenas y micoparásitas, lo que indica la complejidad de las interacciones que estos microorganismos pueden tener en el cultivo de aguacate. La presencia de hongos fitopatógenos, como *Fusarium*, plantea un desafío para la salud del cultivo, mientras que la identificación de hongos entomopatógenos y micoparásitas sugiere un potencial para el control biológico de plagas y enfermedades, lo que podría abrir nuevas vías para el manejo sostenible de los huertos.

Este estudio se considera una de las aportaciones más significativas a la diversidad de micromicetos cultivables en suelos de huertas de aguacate en México, y se espera que los hallazgos sirvan como base para futuras investigaciones en microbiología agrícola, así como para el desarrollo de estrategias de manejo que promuevan una agricultura más sostenible y productiva. Los nuevos géneros identificados amplían la comprensión de la diversidad microbiana en sistemas agrícolas y subrayan la necesidad de estudios adicionales que exploren las funciones ecológicas y la interacción de estos microorganismos en el contexto de la producción de aguacate.

PERSPECTIVAS

Algo que la ciencia trata de vislumbrar, es el cómo interaccionan las plantas con los diferentes tipos de microorganismos que se encuentran en las raíces y el rizoma de estas. Sabemos que estas interacciones afectan en el desarrollo y crecimiento de las plantas; algunas interacciones inducen a que los tejidos vegetales cuenten con paredes celulares más gruesas o que se produzca una mayor cantidad de fitoalexinas. Algunos otros microorganismos producen metabolitos que pueden causar la inhibición o muerte de algunos otros microorganismos fitopatógenos que se encuentran cerca de las raíces de la planta. Mientras que, la ausencia de los microorganismo referidos anteriormente y la presencia de otros aun no tan estudiados, demuestran no presentar este tipo de actividades benéficas para las plantas.

Con el presente trabajo, se encontraron diferentes géneros de micromicetos presente en el rizoma de árboles de aguacate. Aunque varios géneros ya se han reportado con algunos roles ecológicos en los rizomas de las plantas, aún existe un desconocimiento respecto a la actividad de otros microorganismos, y a la actividad de cuando varios microorganismos interactúan con las plantas.

Esperemos que este trabajo aporte un poco de información que pueda ser de utilidad para aquellos que quieran entender mejor la dinámica ecológica que ocurre entre los microorganismos del rizoma con los aguacatales.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre-Acosta, E., Ulloa, M., Aguilar, S., Cifuentes, J. y Valenzuela, R. (2014). Biodiversidad de hongos en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: 76-81.
- Aguirre-von-Wobeser, E., Alonso-Sánchez, A., Méndez-Bravo, A., Espino, L.A.V. y Reverchon, F. (2021). Barks from avocado trees of different geographic locations have consistent microbial communities. *Archives of Microbiology*, 203: 4593–4607.
- Arjona-Girona, I. y López-Herrera, C.J. (2018). Study of a new biocontrol fungal agent for avocado white root rot. *Biological Control*, 117, 6-12.
- Barnett, H.L. y Hunter, B.B. (1998). *Illustrated Genera of Imperfect Fungi* (No. Ed. 4). American Phytopathological Society (APS Press). St. Paul, Minnesota, USA. 218 p.
- Baron, N.C. y Rigobelo, E.C. (2022). Endophytic fungi: a tool for plant growth promotion and sustainable agriculture. *Mycology* 13(1):39-55. <https://doi.org/10.1080/21501203.2021.1945699>
- Baron, N.C., Rigobelo, E.C. y Zied, D.C. (2019). Filamentous fungi in biological control: current status and future perspectives. *Chilean journal of agricultural research*, 79(2), 307-315.
- Borneman, J. y Hartin, R.J. (2000). PCR primers that amplify fungal rRNA genes from environmental samples. *Applied and environmental microbiology*, 66: 4356-4360.
- Ceja-Torres, L.F., Téliz-Ortiz, D., Osada-Kawasoe, S. y Morales-García, J.L. (2000). Etiología, distribución e incidencia del cancro del aguacate *Persea americana*

Mill. En cuatro municipios del estado de Michoacán, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 18(2): 79-86.

Crous, P.W., Lombard, L., Sandoval-Denis, M., Seifert, K.A., Schroers, H.J., Chaverri, P., Gené, J., Guarro, J., Hirooka, Y., Bensch, K., Kema, G.H.J., Lamprecht, S.C., Cai, L., Rossman, A.Y., Stadler, M., Summerbell, R.C., Taylor, J.W., Ploch, S., Visagie, C.M., Yilmaz, N., Frisvad, J.C., Abdel-Azeem, A.M., Abdollahzadeh, J., Abdolrasouli, A., Akulov, A., Alberts, J.F., Araújo, J.P.M., Ariyawansa, H.A., Bakhshi, M., Bendiksby, M., Ben-Hadj-Amor, A., Bezerra, J.D.P., Boekhout, T., Câmara, M.P.S., Carbia, M., Cardinali, G., Castañeda-Ruíz, R.F., Celis, A., Chaturvedi, V., Collemare, J., Croll, D., Damm, U., Decock, C.A., de-Vries, R.P., Ezekiel, C.N., Fan, X.L., Fernández, N.B., Fayam E., González, C.D., Gramaje, D., Groenewald, J.Z., Grube, M., Guevara-Suarez, M, Gupta, V.K., Guarnaccia, V., Haddaji, A., Hagen, F., Haelewaters, F.D., Hansen, K., Hashimoto, A., Hernández-Restrepo, M., Houbraken, J., Hubka, V., Hyde, K.D., Iturriaga, T., Jeewon, R., *et al.* y Thines, M. (2021). *Fusarium*: more than a node or a foot-shaped basal cell. *Studies in Mycology*, 98: 100116.

Elias, F., Woyessa, D. y Muleta, D. (2016). Phosphate solubilization potential of rhizosphere fungi isolated from plants in Jimma Zone, Southwest Ethiopia. *International Journal of Microbiology*, 2016:5472601. doi: 10.1155/2016/5472601.

FAO. (2020). *Estadísticas de Producción de Aguacate en México*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de <https://www.fao.org>

FAO. (2020). El estado de la comida y la agricultura: Superando los retos del agua en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de <https://www.fao.org>

- Filion, M., St-Arnaud, M. y Jabaji-Hare, S.H. (2003). Direct quantification of fungal DNA from soil substrate using real-time PCR. *J. Microbiol. Meth.* 53, 67–76.
- García-Jiménez, J., & Tuset, J. J. (2004). Diseases caused by soilborne fungi in avocado in Spain and Israel. *Plant Disease*, 70(8), 654-660.
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012.
- Gomez, E., Pioli, R. y Conti, M. (2007). Fungal abundance and distribution as influenced by clearing and land use in a vertic soil of Argentina. *Biology and Fertility of soils*, 43(3), 373-377.
- González-Montiel, S., Jiménez-Salazar, A., & Ramírez-Rodríguez, L. (2020). Diversity of halotolerant bacteria in arid soils of northern Nuevo León. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 123-134.
- Gräfenhan, T., Schroers, H. J., Nirenberg, H. I., & Seifert, K. A. (2011). An overview of the taxonomy, phylogeny, and typification of nectriaceous fungi in *Cosmospora*, *Acremonium*, *Fusarium*, *Stilbella*, and *Volutella*. *Studies in Mycology*, 68(1), 79-113.
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). Trichoderma species—opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43-56.
- Hermosa, R., Viterbo, A., Chet, I., & Monte, E. (2012). Plant-beneficial effects of Trichoderma and of its genes. *Microbiology*, 158(1), 17-25.
- Herrera, J., Alvarado, P., & Franco, L. (2016). Diversity of Trichoderma spp. in avocado soils and its potential for biological control. *Mycopathology*, 10(3), 198-209.

- Houbraken, J., Kocsubé, S., Visagie, C.M. Yilmaz, N., Wang, X.C., Meijer, M., Kraak, B., Hubka, V., Bensch, K., Samson, R.A. y Frisvad, J.C. (2020). Classification of *Aspergillus*, *Penicillium*, *Talaromyces* and related genera (Eurotiales): An overview of families, genera, subgenera, sections, series and species. *Studies in mycology*, 96(1), 141-153.
- Howell, C. R. (2003). Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases: The history and evolution of current concepts. *Plant Disease*, 87(1), 4-10.
- Huang, T., Wang, M., Qin, Z., Lui, X., Xu, Z., Sun, Y., Lui, Z. & Dong, T. (2020). Correlation between AM Fungal Diversity and Rhizosphere Fertility at Avocado Fields. *Fujian Journal of Agricultural Sciences* 35(7), 773–780. DOI: 10.19303/j.issn.1008-0384.2020.07.011
- Hutcheson, K. (1970). A test for comparing diversities based on the Shannon-Wiener formula. *Journal of Theoretical Biology*, 29: 151-154.
- INEGI. (2020). Cartografía de suelos y geografía del estado de Nuevo León. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx>
- Kennedy, A. C., & Smith, K. L. (1995). Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils. *Plant and Soil*, 170(1), 75-86.
- Leslie, J.F. y Summerell, B.A. (2008). *The Fusarium Laboratory Manual*. John Wiley and Sons. Iowa. 388 p.
- López-García, R., Pérez-Gómez, H., & Cordero-López, F. (2019). Effects of organic and conventional farming on soil microbiota in Nuevo León. *Agricultural Microbiology*, 22(4), 215-229.

- López-Herrera, C. J., and Melero-Vara, J. M. (1991). Diseases of avocado caused by soil fungi in the Mediterranean coast of Spain. *Proc. World Avocado Congr. II*. 119-121.
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541-556.
- Maestre, F.T., Delgado-Baquerizo, M., Jeffries, T.C., Eldridge, D.J., Ochoa, V., Gozalo, B., Quero, J.L., García-Gómez, M., Gallardo, A., Ulrich, W., Bowker, M.A., Arredondo, T., Barraza-Zepeda, C., Bran, D., Glorentino, A., Gaitán, J., Gutiérrez, J.R., Huber-Sannwald, E., Jankju, M., Mau, R.L., Miriti, M., Naseri, K., Ospina, A., Stavi, I., Wang, D., Woods, N.N., Yuan, X., Zaady, E. y Singh, B.K. (2015). Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112: 15684-15689.
- Martínez-Vázquez, R., Cano-Rodríguez, A., & Sánchez, J. (2015). Plant growth-promoting bacteria in arid soils of Nuevo León. *Mexican Journal of Agricultural Sciences*, 14(1), 78-89.
- Mastouri, F., Björkman, T., & Harman, G. E. (2010). Seed treatment with *Trichoderma harzianum* alleviates biotic, abiotic, and physiological stresses in germinating seeds and seedlings. *Phytopathology*, 100(11), 1213-1221.
- Matas-Baca, M.A., Flores-Córdova, M.A., Pérez-Álvarez, S., Rodríguez-Roque, M.J., Salas-Salazar, N.A., Soto-Caballero, M.C., & Sánchez-Chávez, E. (2023). *Trichoderma* fungi as an agricultural biological control in Mexico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 29(3), 79-114.
<https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2022.11.015>

- Millan, A. F-S., Larraya, L., Farran, I., Ancin, M. y Veramendi, J. (2021). Successful biocontrol of major postharvest and soil-borne plant pathogenic fungi by antagonistic yeasts. *Biological Control* 160:104683. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104683>
- Nelson, P.E., Toussoun, T.A. y Marasas, W.F.O. (1983). *Fusarium* species: An illustrated manual for identification. The Pennsylvania State University. University Park, Pennsylvania, USA. 193 p.
- Olalde-Lira, G.G., Montaña, Y.A.R., Barrios, P.A., Vargas-Sandoval, M., Santos, M.E.P., Raymundo, T., Valenzuela, R. y Lara-Chávez, M.B.N. (2020). Characterization of *Fusarium* spp., a phytopathogen of avocado (*Persea americana* Miller var. *drymifolia* (Schltdl. and Cham.)) in Michoacán, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 52(2): 301-316.
- Ortiz-Bustos, C.M., García-Carneros, A.B. y Molinero-Ruiz, L. (2015). La marchitez tardía del maíz (*Zea mays* L.) causada por *Cephalosporium maydis* en la Península Ibérica, y otros hongos asociados. *Summa Phytopathologica*, 41, 107-114.
- Park, S.W., Nguyen, T.T. y Lee, H.B. (2017). Characterization of two species of *Acremonium* (Unrecorded in Korea) from soil samples: *A. varicolor* and *A. persicinum*. *Mycobiology*, 45(4), 353-361.
- Pérez-Jiménez, R.M. (2008). Significant avocado diseases caused by fungi and oomycetes. *Eur J Plant Sci Biotechnol*, 2(1), 1-24.
- Pérez-Martínez, J., Ploetz, R.C. y Konkol, J.L. (2018). Significant *in vitro* antagonism of the laurel wilt pathogen by endophytic fungi from the xylem of avocado does not predict their ability to control the disease. *Plant Pathology*, 67(8), 1768-1776.

- Pernezny, K., Simone, G. W., Collins, J., & Allen, M. (2000). Anthracnose caused by *Colletotrichum gloeosporioides*: An emerging disease on avocado in Florida. *Plant Pathology Journal*, 6, 65-69.
- Ploetz, R. C., Zentmyer, G. A., Nishijima, W. T., Rohrbach, K. G., & Ohr, H. D. (2003). *Compendium of Tropical Fruit Diseases*. APS Press.
- Raya-Montaña, Y. A., Apáez Barrios, P., Aguirre Paleo, S., Vargas Sandoval, M., Da Silva, R. P. & Lara-Chávez, M. B. N. (2019). Identificación de hongos micorrizógenos arbusculares en huertos de aguacate de Uruapan, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(10), 2029-2041.
- Rhodes, C. J. (2017). The imperative for regenerative agriculture. *Science Progress*, 100(1), 80-129.
- Rodríguez-Alonso, A., Hernández-Mendoza, R., & Morales-García, A. (2018). Beneficial fungi in Nuevo León agricultural soils. *Mycology Today*, 12(5), 183-197.
- Rodríguez-Guerra, R., Reyes-Castillo, F., Ledesma-Bravo, B., Calderón-Ruiz, A., Armijo-Martínez, L.F. y Ruiz-Amaro, C. J. (2020). Diversidad en suelo y antagonismo de actinobacterias contra *Sclerotium rolfsii*. *Biotecnología y Sustentabilidad*, 5, 19-36.
- SAGARPA. (2021). *Informe Anual de la Producción y Exportación de Aguacate en México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México.
- SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria). (2017). México: Primer productor mundial de aguacate. Consultado de: <https://www.gob.mx/senasica/articulos/mexico-primer-productor-mundial-de-aguacate?idiom=es/>

- Sasan, R. K., & Bidochka, M. J. (2012). The insect-pathogenic fungus *Metarhizium* as an endophyte: Novel roles in plant protection and growth promotion. *Mycologia*, 104(4), 795-803.
- Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27: 379-423.
- Shoresh, M., Harman, G. E., & Mastouri, F. (2010). Induced systemic resistance and plant responses to fungal biocontrol agents. *Annual Review of Phytopathology*, 48, 21-43.
- Silva, M.S., Sales A.N., Magalhães-Guedes K.T., Dias, D.R. y Schwan, R.F. (2013). Brazilian Cerrado soil actinobacteria ecology. *BioMed Res Int*. 2013, 503805.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). Mycorrhizal symbiosis. Academic Press.
- SMN. (2020). Climatología del estado de Nuevo León. Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx>
- Solís-García, I.A., Ceballos-Luna, O., Cortazar-Murillo, E.M., Desgarenes, D., Garay-Serrano, E., Patiño-Conde, V., Guevara-Avenidaño, E., Méndez-Bravo, A. y Reverchon, F. (2021). Phytophthora root rot modifies the composition of the avocado rhizosphere microbiome and increases the abundance of opportunistic fungal pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 11, 3484.
- Summerbell, R. C., Gueidan, C., Guarro, J., Eskalen, A., Crous, P. W., Gupta, A. K., Gené, J., Cano-Lira, J. F., van Iperen, A., Starink, M. & Scott, J. A. (2018). The Protean *Acremonium*. *A. sclerotigenum/egyptiacum*: Revision, food contaminant, and human disease. *Microorganisms*, 6(3), 88.

- Summerbell, R. C., Gueidan, C., Schroers, H. J., de Hoog, G. S., Starink, M., Arocha Rosete, Y., Guarro, J., & Scott, J. A. (2011). Acremonium phylogenetic overview and revision of Gliomastix, Sarocladium, and Trichothecium. *Studies in Mycology*, 68, 139–162.
- Thambugala, K.M., Daranagama, D.A., Phillips, A.J., Kannangara, S.D. y Promputtha, I. (2020). Fungi vs. fungi in biocontrol: An overview of fungal antagonists applied against fungal plant pathogens. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 718.
- Tiedje, J. M., Colwell, R. K., & Firestone, M. K. (1999). The role of microbial diversity in the functioning of agricultural soils. *Ecology of Agricultural Microorganisms*, 32, 147-167.
- Tofiño, A., Cabal, D. y Gil, L.F. (2012). Análisis de componentes del sistema productivo de aguacate, con incidencia probable de *Phytophthora* en Cesar, Colombia. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 16(2), 63-90.
- Torres, M. (2022). *Impacto Económico y Ambiental de la Industria del Aguacate en México*. Editorial Universitaria de México.
- Valle-Aguirre, G., Velázquez-del Valle, M.G., Corona-Rangel, M.L., Amora-Lazcano, E. y Hernández-Lauzardo, A.N. (2016). First aeromycological study in an avocado agroecosystem in Mexico. *Aerobiologia*, 32: 657-667.
- Vega, L. (2019). *Historia y Evolución del Cultivo de Aguacate en México*. Fondo de Cultura Económica.
- Vega-Torres, M.G., Ruiz-Cisneros, M.F., Pérez-Corral, D.A., Berlanga-Reyes, D.I., Ornelas-Paz, J.J., Rios-Velasco, C., Cambero-Campos, O.J., Estrada-Virgen, M.O., Luna-Esquivel, G. y Denise-Revérchon, F.L. (2019). Actividad antifúngica

in vitro de microorganismos antagonistas contra *Fusarium oxysporum* de rizosfera de árboles de aguacate en Xalisco, Nayarit, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 37 (No. Esp. 1): 57-64.

Violi, H.A., Menge, J.A. y Beaver, R.J. (2007). *Chaetomium elatum* (Kunze: Chaetomiaceae) as a root-colonizing fungus in avocado: is it a mutualist, cheater, commensalistic associate, or pathogen? *American Journal of Botany*, 94: 690-700.

Watrud, L.S., Martin, K., Donegan, K.K., Stone, J.K. y Coleman, C.G. (2006). Comparison of taxonomic, colony morphotype and PCR-RFLP methods to characterize microfungi diversity. *Mycologia*, 98: 384-392.

Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz., Khizar, C., Pappula-Reddy, S.P. (2023). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Regulating Growth, Enhancing Productivity, and Potentially Influencing Ecosystems under Abiotic and Biotic Stresses. *Plants* 12(17), 3102. <https://doi.org/10.3390/plants12173102>

Whiley, A. W., Pegg, K. G., & Saranah, J. B. (2002). Avocado diseases. In A. W. Whiley, B. Schaffer, & B. N. Wolstenholme (Eds.), *The Avocado: Botany, Production and Uses* (pp. 243-294). CABI Publishing.

Whipps, J. M. (2001). Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 52(suppl_1), 487-511.

Yang, J., Kloepper, J. W., & Ryu, C. M. (2009). Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Science*, 14(1), 1-4.

Zentmyer, G. A. (1980). *Phytophthora cinnamomi* and the diseases it causes. American Phytopathological Society.

Zhong, F., Fan, X., Ji, W., Hai, Z., Hu, N., Li, X., Liu, G., Yu, C., Chen, Y., Lian, B., Wei, H. y Zhang, J. (2022). Soil Fungal Community Composition and Diversity of Culturable Endophytic Fungi from Plant Roots in the Reclaimed Area of the Eastern Coast of China. *J. Fungi* 8(2): 124. <https://doi.org/10.3390/jof8020124>

Zhou, Y., He, S., Gong, G., Zhang, S., Chang, X., Liu, N., Sun, X., Qi, X., Ye, K. y Wang, Y. (2014). Soil fungal diversity in three nature reserves of Jiuzhaigou County, Sichuan Province, China. *Annals of microbiology*, 64(3), 1275-1290.