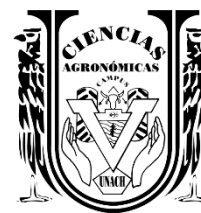




**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**CAMPUS V**



**Efecto bioprotector con hongos micorrizícos arbusculares nativos  
sobre *Hemileia vastatrix* de la región Frailesca, Chiapas**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA  
TROPICAL**

Presenta

**ELIZABETH MERCEDES FLORES CRUZ L050040**

Director de tesis

**DR. RAMIRO ELEAZAR RUÍZ NÁJERA**

Villaflores, Chiapas, México

Mayo, 2022



Villaflores, Chiapas  
11 de mayo de 2022  
Oficio N° D/414/22

**C. ELIZABETH MERCEDES FLORES CRUZ**  
MAESTRANTE EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL  
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS CAMPUS V  
P R E S E N T E.

En atención a que usted ha presentado los votos aprobatorios del Honorable Jurado designado para su evaluación de posgrado, de la tesis titulada: **"EFECTO BIOPROTECTOR CON HONGOS MICORRIZÍCOS ARBUSCULARES NATIVOS SOBRE *Hemileia vastatrix* DE LA REGIÓN FRAILESCA, CHIAPAS"**, por este medio le comunico que se le autoriza la impresión del documento, de acuerdo a los lineamientos vigentes de la Universidad.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR"



M. C. CARLOS ALBERTO VELÁZQUEZ SANABRIA  
DIRECTOR DIRECCIÓN

C. c. p. Archivo

CAVS\*marh.



Código: FO-113-09-05

Revisión: 0

**CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.**

El (la) suscrito (a) Elizabeth Mercedes Flores Cruz,  
Autor (a) de la tesis bajo el título de "Efecto bioprotector con hongos micorrizicos arbusculares nativos sobre *Hemileia vastratix* de la región Frailesca, Chiapas,"  
presentada y aprobada en el año 2022 como requisito para obtener el título o grado  
de Maestro en Ciencias Agropecuaria Tropical, autorizo a la  
Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional del Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 23 días del mes de mayo del año 2022.

Elizabeth Mercedes Flores Cruz

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

## **AGRADECIMIENTOS**

Estoy particularmente agradecido por la ayuda brindada por mi director de tesis el Dr. Ramiro Eleazar Ruiz Nájera de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) por toda su comprensión y lealtad, que Dios lo bendiga siempre en su vida.

Agradecimiento especial al Dr. Gabriel Rincón Enríquez y la Dra. Evangelina Esmeralda Quiñones Aguilar del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A. C. (CIATEJ), por todo su apoyo en las capacitaciones de las técnicas de los HMA, que se realizaron en el Laboratorio de Fitopatología de la Unidad de Biotecnología Vegetal del CIATEJ.

Me gustaría agradecer a las siguientes personas: a la Dra. Laura Hernández Cuevas del Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Jalisco (ITTJ), por todo su conocimiento impartido en Hongos Micorrizicos Arbusculares y al Dr. José Alfredo Medina Meléndez de la UNACH por su apoyo en el Laboratorio de Fitopatología de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH).

Un agradecimiento especial al Consorcio Social del Café Mexicano A. C. por todo el apoyo brindado con su personal técnico en las parcelas de cafetales convencionales.

Estoy totalmente agradecida con los cafecultores de la región de La Concordia y Montecristo de Guerrero, Chiapas, de la Federación de Sociedades Cooperativas Indígenas y Ecológicas de Chiapas por todo lo que me brindaron al llegar a sus cultivos de café.



Esta tesis de investigación de maestría forma parte del área de la línea de investigación:

“Desarrollo y evaluación de biofertilizantes-biopesticidas a base de hongos micorrízicos arbusculares nativos mexicanos”

Financiado por diferentes apoyos de proyectos CONACyT

*Líder de la línea de investigación: Dra. Evangelina Esmeralda Quiñones Aguilar*

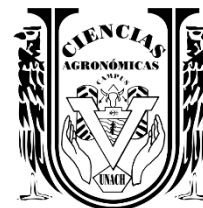
La presente investigación se desarrolló en las instalaciones del: Laboratorio de Fitopatología de Biotecnología Vegetal del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A. C. (CIATEJ), en el Laboratorio de Biología Molecular del Centro de Investigación en Genética y Ambiente, de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx) y en el Laboratorio de Fitopatología de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), bajo la dirección del Dr. Ramiro Eleazar Ruíz Nájera de la UNACH y codirección del Dr. Gabriel Rincón Enríquez del CIATEJ, así como la asesoría de la Dra. Laura Hernández Cuevas del ITTJ, de la Dra. Evangelina Esmeralda Quiñones Aguilar del CIATEJ y del Dr. José Alfredo Medina Meléndez de la UNACH.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**CAMPUS V**



## **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL**

Esta tesis titulada, “Efecto bioprotector con hongos micorrizcos arbusculares nativos sobre *Hemileia vastatrix* de la región Frailesca, Chiapas”. Fue parte del proyecto de investigación “Desarrollo y evaluación de biofertilizantes-biopesticidas a base de hongos micorrizcos arbusculares nativos mexicanos”, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, bajo la dirección de la Dra. Evangelina Esmeralda Quiñones Aguilar.

Perteneció al cuerpo académico Sistemas Integrales de Producción, bajo la dirección del Dr. José Alfredo Medina Meléndez. Se incluye en la línea de generación y aplicación del conocimiento: Tecnología e Innovación en los Sistemas Tradicionales y Alternativos de Producción Sustentable, del Programa de Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivos .....	2
1.1.1 Objetivo general .....	2
1.1.2 Objetivos particulares .....	2
1.2 Hipótesis .....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 El café ( <i>Coffea arabica</i> L.) de Chiapas .....	3
2.2 Variedades del cafeto .....	3
2.3 El agroecosistema cafetalero chiapaneco .....	4
2.4 Sistema de producción de café convencional.....	5
2.5 Principales enfermedades foliares del cultivo del café.....	6
2.6 Descripción de la roya del café .....	6
2.6.1 Daños por <i>Hemileia vastatrix</i> Berk. & Broome.....	7
2.6.2 Pérdidas económicas por <i>H. vastatrix</i> en el cultivo del café .....	8
2.7 Control biológico de enfermedades .....	9
2.8 Hongos micorrízicos arbusculares (HMA).....	9
2.8.1 Efectos de los hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo del Café.....	10
2.8.2 Aplicaciones de los consorcios de HMA para productividad de café .....	12
3. MATERIALES Y METODOS .....	13
3.1 Ubicación del área de estudio.....	13
3.1.1 Muestreo de suelos para la obtención del inóculo .....	13
3.1.2 Desarrollo del experimento .....	13
3.1.3 Evaluación de los consorcios de HMA contra <i>H. vastatrix</i> .....	13
3.2 Fases del estudio de la investigación .....	13
3.2.1 Fase I: Colecta de suelo en cafetales convencionales .....	14
3.2.2 Fase II. Identificación de las diferentes especies nativas de los HMA en cafetales convencionales y análisis físico químico de los suelos .....	16
3.2.3 Fase III: Multiplicación y cuantificación de las esporas de HMA en los consorcios de los HMA.....	18
3.2.4 Fase IV. Fase de evaluación de la respuesta de los HMA sobre el desarrollo y bioprotección hacia <i>Hemileia vastatrix</i> en plantas de café en condiciones de vivero. ....	20
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1 Análisis fisicoquímico de los sitios de muestreo .....	25

4.2 Riqueza de especies de HMA asociados a la rizósfera de <i>Coffea arabica</i> , en las plantaciones de las variedades Típica y Costa Rica 95 convencional. ....	27
4.3 Composición biológica de los consorcios nativos de los HMA .....	30
4.3.1 Riqueza de especies de HMA asociados a los consorcios Tip y Cr95.....	30
4.3.2 Cuento de esporas de los consorcios de HMA nativos.....	31
4.4 Evaluación de los efectos de los HMA en las variables vegetativas .....	33
4.4.1 Altura, diámetro y número de hojas de las plantas de café .....	33
4.4.2 Nivel de severidad de la roya del café <i>Hemileia vastatrix</i> en las variedades Típica y Costa Rica 95.....	38
4.4.3 Porcentaje de la incidencia de la roya <i>Hemileia vastatrix</i> en las plantas de café .....	42
4.4.4 Longitud de la raíz, peso seco de la raíz y volumen radical de las plantas de café .....	45
4.4.5 Área foliar total de las plantas de café de la variedad Típica y Costa Rica 95 .....	49
4.4.6 Peso seco de la parte aérea de las plantas de café inoculadas con HMA en condiciones de vivero .....	53
5. CONCLUSION .....	57
6. BIBLIOGRAFÍA .....	58



## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la roya del café ( <i>Hemileia vastatrix</i> ). .....	7
Cuadro 2. Localidades donde se realizaron los muestreos para la colecta de las fuentes de inóculo de los hongos micorrízicos arbusculares en el estado de Chiapas .....	15
Cuadro 3. Descripción del diseño de los tratamientos de estudio en esta investigación. ....	22
Cuadro 4. Análisis fisicoquímicos de los sitios de suelos de café convencional. ....	26
Cuadro 5. Diversidad de especies de HMA encontradas en el suelo rizosférico de <i>Coffea arabica</i> ; de cultivos convencionales en distintos sitios y épocas de muestreo (seca y lluvia) en los municipios de La Concordia y Montecristo de Guerrero, Chiapas, México. ....	29
Cuadro 6. Especies de HMA encontradas en los consorcios de café en condiciones de vivero. ....	30
Cuadro 7. Efecto de la aplicación de HMA en el crecimiento de las plantas de café con los distinto tratamientos en condiciones de vivero a los 150 días después de la inoculación (DDI) con los hongos. ....	34
Cuadro 8. Desarrollo del sistema radical de las plantas de café por efecto de los HMA con y sin roya en condiciones de vivero a los 150 días después de la inoculación con las micorrizas. ....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rizósfera de una planta formando simbiosis con los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) (tomado de Philippot <i>et al.</i> , 2013).....	10
Figura 2. Acompañamiento por productores de café indígenas Tzeltal del estado de Chiapas para el muestreo de suelo rizosférico de plantas de café. ....	14
Figura 3. Método de muestreo en W para obtención de las muestras de los consorcios que contuvieron a los HMA que se estudiaron en esta investigación. ....	15
Figura 4. Procedimiento del muestreo de suelo rizosférico para la obtención de los consorcios de HMA (Trinidad, 2017).....	16
Figura 5. Esquema de aislamiento e identificación taxonómica de los HMA provenientes de suelos rizosférico de zonas cafetales y propagados en macetas trampa.....	17
Figura 6. Multiplicación de los HMA en plantas trampa bajo condiciones de invernadero de suelos provenientes de zonas cafetaleras. ....	18
Figura 7. Conteo de esporas de HMA con el microscopio estereoscópio. ....	19
Figura 8. Ubicación del vivero de café tecnificado, donde se realizó el experimento ubicado en la Col. Presidente Echeverría, municipio de Venustiano Carranza, Chiapas, México.....	20
Figura 9. Observación de la inoculación de las plantas de café con los consorcios de HMA en condiciones de vivero.....	21
Figura 10. Aplicación de esporas de roya a las plantas de café micorrizas y sin HMA en condiciones de vivero.....	22
Figura 11. Evaluación de la severidad de roya del cafeto (SENASICA, 2018). ....	23
Figura 12. Densidad de esporas de HMA propagados, en maceta trampa bajo condiciones de invernadero. Las barras en los rectángulos indican $\pm$ el error estándar. ....	31
Figura 13. Efecto de los HMA en la altura de la planta por factores de estudio (variedad de café, HMA y Roya del café) en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio $\pm$ el error estándar. Letras diferentes en cada factor de estudio indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ). ....	36
Figura 14. Crecimiento de las variedades de café Típica y Costa Rica 95 sin roya en condiciones de vivero a los 150 DDI. La escala del centro de la figura está en cm. ...	37
Figura 15. Efecto bioprotector de los HMA ante la roya <i>Hemileia vastatrix</i> en plantas de café de la variedad Típica y Costa Rica 95 en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio $\pm$ el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ). ....	39
Figura 16. Nivel de severidad de la roya en las variedades de café Típica y Costa Rica 95 con roya en condiciones de vivero a los 150 DDI. La escala del centro de la figura está en cm.....	41

Figura 17. Efecto bioprotector de los HMA en la incidencia de la roya en las plantas de café ( <i>Coffea arabica</i> ) en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio $\pm$ el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ). .....	43
Figura 18. Aspectos del área foliar de plantas de café Var. Típica con roya y en los distintos tratamientos con los HMA (control sin HMA). .....	44
Figura 19. Aspecto del área foliar de plantas de café Var. Costa Rica 95 con roya y en los distintos tratamientos con los HMA (control sin HMA). .....	45
Figura 20. Aspecto del crecimiento del sistema radical de las plantas de café de la variedad Costa Rica 95 y Típica con roya en condiciones de vivero a los 150 días después de la inoculación con los HMA. ....	49
Figura 21. Aspecto del desarrollo radical de las plantas de café de la variedad Típica y Costa Rica 95 sin roya en condiciones de vivero a los 150 días después de la inoculación con los HMA. ....	49
Figura 22. Efecto de los HMA en el área foliar de las plantas de café en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio $\pm$ el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo un análisis ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P = 6.79746E^{-7}$ .) e intervalos de confianza de la mediana del 95 %. .....	50
Figura 23. Aspecto del área foliar de plantas de café de la variedad Típica sin roya, con diferentes inoculos de HMA. ....	52
Figura 24. Aspecto del área foliar de plantas de café de la variedad Costa Rica 95 sin roya, con diferentes inoculos de HMA. ....	52
Figura 25. Peso seco de la parte aérea de las plantas de café inoculado con HMA en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio $\pm$ el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo un análisis ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P = 2.03857E^{-7}$ .) e intervalos de confianza de la mediana del 95%. .....	53

## RESUMEN

El cultivo de café en el estado de Chiapas, genera divisas por alrededor de 800 millones de dólares; en la región Frailesca, el 90 % de los productores de café, implementan un sistema de monocultivo, utilizan fertilizantes químicos y agroquímicos. Sin embargo, la producción de café puede ser afectada por diversas plagas y enfermedades entre las cuales se encuentra la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*), que generalmente provoca la pérdida de las hojas; fue detectada por primera vez en México en la región del Soconusco, Chiapas en 1981, pero en el año 2014 la producción de café disminuyó el 50 % por este patógeno, ante esta problemática en este trabajo se propuso evaluar el efecto bioprotector de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) nativos de cafetales con sistemas de producción convencional, ya que estos microorganismos ayudan a las plantas de café, brindándoles un efecto protector ante microorganismos fitopatógenos en la raíz en la que compiten por espacio y nutrientes dentro de la raíz, además aumentan la tolerancia a condiciones de estrés biótico, ya que activan rutas metabólicas como las del ácido salicílico, del ácido jasmónico y del etileno que conllevan a la síntesis de sustancias tóxicas para los fitopatógenos y de proteínas relacionadas con la patogénesis. Para corroborar este efecto en esta investigación, plantas de café de la variedad Típica y Costa Rica fueron inoculadas con HMA al momento del trasplante y después de 90 días después de la inoculación (DDI), se infectaron con roya (*H. vastatrix*), a los 150 DDI se evaluó el efecto bioprotector de los HMA. La severidad de la roya disminuyó 24 % en la variedad Costa Rica 95 y en la variedad Típica la severidad disminuyó 8 %, el porcentaje de incidencia de la roya en las plantas de café, fue mayor en los tratamientos sin HMA, mostraron diferencias significativas (Tukey  $p \leq 0.05$ ), en la variedad Costa Rica 95 disminuyó 22.3 % de la incidencia en las hojas y en la variedad Típica disminuyó el 23 %; los HMA lograron generar un efecto bioprotector en las plantas de café con diferencias estadísticas, por lo que la utilización de los hongos en la caficultura convencional puede permitir que disminuya la aplicación de los fertilizantes químicos y agroquímicos y mejorar la rentabilidad económica de este cultivo.

**Palabras clave:** Café convencional, biofertilizante, café Costa Rica 95, bioprotección

## ABSTRACT

The cultivation of coffee in the state of Chiapas generates foreign exchange for around 800 million dollars; In the Frailesca region, 90% of the coffee producers implement a monoculture system, using chemical and agrochemical fertilizers. However, coffee production can be affected by various pests and diseases, among which is coffee rust (*Hemileia vastatrix*), which generally causes the loss of leaves; was detected for the first time in Mexico in the Soconusco region, Chiapas in 1981, but in 2014 coffee production decreased by 50% due to this pathogen, in view of this problem in this work it was proposed to evaluate the bioprotective effect of mycorrhizal fungi arbuscular (AMF) native to coffee plantations with conventional production systems, since these microorganisms help coffee plants, providing them with a protective effect against phytopathogenic microorganisms in the root in which they compete for space and nutrients inside the root, in addition they increase the tolerance to biotic stress conditions, since they activate metabolic pathways such as those of salicylic acid, jasmonic acid and ethylene that lead to the synthesis of toxic substances for phytopathogens and proteins related to pathogenesis. To corroborate this effect in this research, coffee plants of the Típica and Costa Rica variety were inoculated with AMF at the time of transplantation and after 90 days after inoculation (DDI), they were infected with rust (*H. vastatrix*), at 150 DDI, the bioprotective effect of AMF was evaluated. The severity of the rust decreased 24% in the Costa Rica 95 variety and in the Typical variety the severity decreased 8%, the percentage of incidence of the rust in the coffee plants was higher in the treatments without AMF, they showed significant differences ( Tukey  $p \leq 0.05$ ), in the Costa Rica 95 variety it decreased 22.3 % of the incidence in the leaves and in the Típica variety it decreased 23 %; AMF managed to generate a bioprotective effect on coffee plants with statistical differences, so the use of fungi in conventional coffee farming can reduce the application of chemical and agrochemical fertilizers and improve the economic profitability of this crop.

**Keywords:** Conventional coffee, biofertilizer, Costa Rica 95 coffee, bioprotection.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estado de Chiapas es el mayor productor de café en México, debido a que la combinación entre la altitud y la temperatura que se registran lo hacen el lugar ideal para el crecimiento de este cultivo, su calidad se ubica en los preferidos de los mercados internacionales, generando divisas por alrededor de 800 millones de dólares, superadas únicamente por la exportación de petróleo (CEDRSSA, 2019).

En la última década, las plantaciones de este cultivo han sido impactadas por la infestación de roya, enfermedad provocada por el hongo *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome; el cual es un hongo que se mantienen en constante adaptación, siendo cada vez más agresivo, sobre todo en las variedades Típica, Bourbon y Caturra, cuyos granos son los más demandados a nivel de exportación por su calidad en taza, pero que han disminuido su producción en más de un 77.5 % (FAOSTAT, 2016) debido a este patógeno.

El café está en riesgo permanente por la amenaza mundial de plagas y de enfermedades, los cuales provocan daños en materia económica, política, ecológica, social y cultural, por lo que se requiere recuperar la productividad de este cultivo. En el año 2012, a raíz de la situación en los suelos de los cafetales convencionales y la presencia de *H. vastatrix* en el cafeto, diferentes países iniciaron el desarrollo de tecnologías a base de microorganismos, uno de éstos implica el uso de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), los cuales mantienen una asociación mutualista .en este caso con el café (*Coffea arabica*), que ayuda a la agregación del suelo, son importantes en la productividad vegetal, mejoran la nutrición de las plantas con el aprovechamientos de nutrientes presentes en el suelo, además los HMA activan hormonas como el ácido jasmónico y el etileno que con llevan a la síntesis de sustancias tóxicas para los fitopatógenos, como fitoalexinas y flavonoides, metabolitos secundarios con propiedades antimicrobianas.

Por lo anteriormente mencionado se pretende conocer el efecto bioprotector de los HMA nativos de cafetales con sistemas de producción convencional de los municipios de La Concordia y Montecristo de Guerrero, Chiapas, con la finalidad de obtener consorcios de HMA que mejoren el estatus nutricional y de defensa de las plantas de este cultivo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

Determinar el efecto bioprotector de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) nativos de la rizosfera del café convencional sobre la severidad de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) bajo condiciones de vivero.

### **1.1.2 Objetivos particulares**

- a) Identificar y multiplicar los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el sistema de producción convencional de las variedades Típica y Costa Rica 95, en los municipios La Concordia y Montecristo de Guerrero, Chiapas.
- b) Evaluar el efecto de los consorcios de HMA en el crecimiento vegetal y sobre *Hemileia vastatrix* en plantas de café de las variedades Típica y Costa Rica 95 bajo condiciones de vivero.

## **1.2 Hipótesis**

- a) La inoculación de algún consorcio de hongos micorrízicos arbusculares de café (HMA) disminuirá los síntomas de la roya en las plantas de café bajo condiciones de vivero de las variedades Típica y Costa Rica 95.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 El café (*Coffea arabica* L.) de Chiapas

El estado de Chiapas es el principal productor de café a nivel nacional, según datos del año 2019; de acuerdo con el Padrón Nacional Cafetalero existen 180,856 productores con un total de 253,764 hectáreas; esta actividad sustenta a más de un millón de personas que se dedican y benefician de la industria del café (INCAFECH, 2019) y la producción nacional en el 2019 fue de 4.2 millones de sacos (60 kg/saco), con un valor en el mercado externo de 685,575 Mmd; Chiapas y Veracruz producen el 70 % de la producción total nacional (CEDRSSA, 2020).

Más del 90 % del cultivo de café en México es bajo sombra, por ello este cultivo es de gran importancia ecológica ya que para su producción requiere de la asociación con árboles, dado que este manejo contribuye a una mayor calidad del cafeto en el estado de cereza (fruto obtenido al momento del corte del café) y al momento de llevarlo a la taza. Un cafeto en una parcela con altas cantidades de nutrientes y polinizado de manera natural, tendrá mayor acidez, aroma y cuerpo, características que se evalúan para determinar la calidad en taza (*Op cit.*).

En Chiapas se encuentran las mejores calidades de café destacando su sabor, aroma y cuerpo, sin embargo, la roya (*Hemileia vastatrix*) ha traído una disminución significativa sobre la producción de este cultivo; Saldaña *et al.* (2020), mencionan que la caficultura mexicana está viviendo problemas serios de infestación de la roya (*Hemileia vastatrix*) en las variedades de café (*Coffea arabica* L.) tradicionales, que por su calidad en taza son preferidas por el mercado internacional.

### 2.2 Variedades del cafeto

La taxonomía de la planta de café indica que el género al que pertenece es *Coffea*, se conocen más de 100 especies del género en el mundo, pero poco más de una docena son las más conocidas; entre ellas dos tienen importancia económica, la primera, *Coffea arabica*, conocida comúnmente como arábica, que constituye entre el 60 al 75 % del café de exportación a nivel mundial, se produce en 61 países, la mayor parte en Sur y Centro América y la segunda *C. canephora* que abarca el resto de la exportación mundial (Jones, 1987; Rojo, 2014).



Entre las variedades de *C. arabica* se encuentran Típica, Caturra amarillo y rojo, Bourbon, Maragogipe, Garnica, Costa Rica 95, Sarchimor, Catimor, Marcellesa, Mundo Novo, Geisha, Oro Azteca, Anacafe 14, Pacamara, mientras que *C. canephora* es conocida como robusta (Preuss, 2019). Una de las variedades que son afectadas drásticamente por la roya del café (*Hemileia vastatrix*) es la Típica (López *et al.*, 2016).

*Coffea arabica* es originaria de Etiopía, donde se encuentra la mayor diversidad genética de la especie, se cree que las semillas de café de los bosques de café del suroeste de Etiopía fueron llevadas hacia Yemen, posteriormente las semillas fueron llevadas a la India y después los holandeses la llevaron a la isla indonesia de Java, ahí se dio origen al linaje “Típica” (también llamado Arábigo o criollo) (World Coffee Research, 2019). En paralelo, las semillas también de Yemen fueron trasladadas a la isla de Borbón, lo que dio origen al linaje “Borbón” (*Op cit.*).

Dentro de las variedades introducidas en el estado de Chiapas para el control de la roya se encuentra la variedad de café Costa Rica 95, fue creado de la hibridación entre Caturra Rojo y el Híbrido de Timor, liberado por el Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE), con resistencia a *Hemileia vastatrix* y excelente calidad de taza (Espinoza y Sancho, 2020).

### **2.3 El agroecosistema cafetalero chiapaneco**

En el año 1986 en México se inició la producción de café bajo el sistema orgánico con buenos resultados, este sistema representa un rescate del manejo agrícola tradicional, es decir, para su cultivo se realizan prácticas de conservación del suelo y del agua, sin usar insumos químicos, con lo cual se hace uso de los nutrientes disponibles en el suelo de manera natural, este sistema permite alcanzar las certificaciones internacionales logrando colocar el producto con un buen precio y con ello mejorar el ingreso económico de la familia campesina (Palomares *et al.*, 2012).

El sistema de producción de café de semisombra se define como un regulador de luz solar basado en la composición de los árboles, utilizando especies de árboles con una densidad de 20 a 50 árboles forestales por hectárea, o cualquier número de especies de arbustos semipermanentes (plátano o banano); cuando se logra el establecimiento de 750 árboles se logra alcanzar un microclima dentro del área de producción que ayuda a mejorar los rendimientos del cultivo del café (Arcila *et al.*, 2007). Cualquier

especie de arbusto que se utilice en abundancia puede ayudar a regular la luz dentro del cafetal y se puede establecer a una distancia de siembra de 3.7x3.7 m y el espacio debe estar distribuido uniformemente (*Op cit.*).

Los agricultores no realizan el manejo adecuado de sombra, ni de fertilización, no han renovado las viejas plantaciones de café; la gran mayoría, 98.80 % de los productores tienen variedades altamente susceptibles a la roya *H. vastatrix*, factor que está provocando la emergencia de severas plagas y enfermedades, entre ellas la roya, que ha dejado sin cosecha a un alto número de productores, se debe a los cambios de clima ya que hay un aumento de humedad y una temperatura de 10-12 °C, condiciones ideales para la roya (Medina *et al.*,2016).

#### **2.4 Sistema de producción de café convencional**

En la región Frailesca de Chiapas, la mayoría de los productores de café (90 %) implementan un sistema de monocultivo bajo sombra, generalmente utilizan fertilizantes químicos y agroquímicos (bactericidas, fungicidas, nematicidas, plaguicidas) para obtener buenos rendimientos en la región, sin embargo, este sistema impacta en el ambiente ya que genera altas tasas de contaminación del aire, de los mantos acuíferos, una disminución en la materia orgánica y favorece la erosión de los suelo (Medina *et al.*,2016); los suelos con mayores contenidos de materia orgánica (>2%) contienen una incrementada población y diversidad de microorganismos, conformadas principalmente por bacterias, actinomicetos, hongos y algas, cuya actividad está fuertemente relacionada con la fertilidad y la estabilidad del recurso edáfico (Chávez *et al.*, 2020).

Esto coincide con la disminución de flora y fauna nativa (peces, cangrejos, insectos y aves), que se ha observado en las zonas cafetaleras de la Sierra Occidental de Chiapas (Grajales *et al.*, 2008). Otros sistemas de producción, pero en pequeñas escalas son los sistemas tecnificados de producción de café, en los que los cafecultores se capacitan, aprenden y desarrollan tecnologías apropiadas para lograr un desarrollo óptimo de las plantaciones (densidad óptima de plantas de café: 4000 a 6000 arbustos/ha), siempre buscando mejorar la productividad del cafetal (Arcila *et al.*, 2007).

## **2.5 Principales enfermedades foliares del cultivo del café**

La cafecultura se considera como una actividad fundamental, por la generación de recursos económicos para grandes, medianos y pequeños productores ya que permite la integración de cadenas productivas, sin embargo existen diversas enfermedades que atacan al cultivo: mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*), ojo de gallo (*Mycena citricolor*), mal de hilachas (*Corticium koleroga*), derrite-quema (*Phoma costarricensis*), antracnosis (*Colletotrichum coffeanum*) y roya (*Hemileia vastatrix*) esta última es la principal enfermedad que ataca los cafetos en Latinoamérica (Hernández, 2010). La producción de café puede ser afectada por diversas plagas y enfermedades entre las cuales se encuentra la broca del café (*Hypothenemus hampei*) y la roya del cafeto (*H. vastatrix*); detectadas por primera vez en México en la región del Soconusco, Chiapas en los años 1978 y 1981; actualmente, están presentes en la mayoría de las zonas productoras del país (SENASICA, 2020).

Con relación a la roya del cafeto, desde el 2015 se lleva a cabo el manejo de focos de infestación de la enfermedad en áreas regionales de control, delimitadas en las principales zonas productoras del país, mediante la aspersion de fungicidas de manera preventiva en las variedades catalogadas como susceptibles, principalmente en la etapa fenológica de amarre de fruto a fruto lechoso, a fin de evitar el incremento de los niveles de severidad del patógeno (*Op Cip.*).

## **2.6 Descripción de la roya del café**

La roya del café es causada por el hongo *Hemileia vastatrix*; es un hongo biótrofo obligado de las plantas del café, pertenece a la familia Pucciniaceae (Cuadro 1), existen 32 razas de este hongo, con diferentes niveles de virulencia, atacan especialmente a las plantas de *Coffea arabica* que, al ser de las mejores variedades en calidad de taza, el ataque de la roya produce graves pérdidas económicas (CESAVE, 2020).

El hongo produce soros en donde se localizan las uredinosporas, las cuales son de color naranja y se localizan en el envés de las hojas; es parásito obligado y el inóculo primario del hongo sobrevive en lesiones de hojas adultas; cuando el ataque es severo, provoca defoliación y pérdidas, son escasos los estudios relacionados al problema y se desconoce mucho de la epidemiología de la enfermedad (Calderón, 2012).

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la roya del café (*Hemileia vastatrix*).

Taxonomía	Nombre
División	Basidiomycota
Subdivisión	Pucciniomycotina
Clase	Pucciniomycetes
Orden	Pucciniales
Familia	Pucciniaceae
Género	<i>Hemileia</i>
Especie	<i>Hemileia vastatrix</i>

Fuente: Kirk *et al.* (2008).

El micelio de este hongo fitopatógeno se encuentra dentro del mesófilo, consiste en hifas hialinas, de aspecto desigual y ramificado; cuando las células de la planta son invadidas, los cloroplastos de las hojas se tornan amarillentos inicialmente, hasta generar un crecimiento de nervaduras foliares, provocando la caída de las hojas (Rayner, 1972).

### 2.6.1 Daños por *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome

La roya (*Hemileia vastatrix*) del café, ocasiona generalmente la pérdida de hojas y disminuye hasta del 30 al 50 % del rendimiento en algunas variedades de *C. arabica*, lo que significa un gran impacto económico a nivel mundial; durante el ciclo 2013-2014 la producción en Centroamérica y México fue afectada en 3.3 millones de sacos (Ramírez *et al.*, 2020). La infección de *Hemileia vastatrix* inicia a través de los estomas que se encuentran en el envés de las hojas, una vez dentro de las hojas, el hongo desarrolla una estructura llamada haustorio para extraer los nutrientes de las células vegetales, necesarios para su crecimiento, en las hojas se observan manchas blanquizas (Calderón, 2012).

Cuando los síntomas de la enfermedad aparecen en las hojas se debe aplicar productos curativos para controlar la enfermedad, ya que es el inicio del proceso de contagio, se observa que las manchas blanquizas aumentan con el paso del tiempo, y se forman manchas amarillas o anaranjadas (Rivillas *et al.*, 2011). La roya es la

enfermedad más destructiva del cafeto, provoca principalmente la caída prematura de las hojas, esto propicia la reducción de la capacidad fotosintética y en infecciones severas sin control puede ocasionar la muerte de las plantas (SENASICA, 2016). Se sabe que el exceso de hojas en una planta favorece la propagación de la roya dado que allí permanecen las hojas viejas donde están las esporas que son mantenidas de un año a otro, lo que favorece la infección, es por ello que los productores deben realizar podas fitosanitarias y aplicación preventiva de fungicidas durante todo el año (Calderón, 2012).

### **2.6.2 Pérdidas económicas por *H. vastatrix* en el cultivo del café**

Las pérdidas causadas por este patógeno en Centroamérica fueron del 50 % en el ciclo productivo 2011-2012 (Herrera *et al.*, 2019). En México, ha generado una reducción en la producción de café de 4.3 millones a sólo 2.2 millones de sacos de 60 kilos entre 2012 y 2016 (Henderson, 2019). Ante esta situación se redefinió la política pública para reactivar el sector cafetalero a través de programas (PROCAFE), para la renovación de cafetales y la asistencia técnica (SAGARPA, 2017).

En el último reporte de SENASICA que corresponde al ciclo productivo 2018-2019, se publicó que la predominancia de la roya en la mayoría de los estados se dió de la siguiente manera: fase de fruto (38 %), brotes (30 %) y maduro (29 %). En cuanto a la severidad foliar, el promedio por estado fue de 12.4 % en Estado de México, 9.7 % en Chiapas, 9.7 % en Jalisco, en Veracruz 7.8 %, 7.8 % en San Luis Potosí, 6.7 % en Puebla, 3.2 % en Oaxaca, 2.8 % en Nayarit y 2.4 % en Guerrero (CEDRSSCA, 2019). Ante esta situación se debe buscar practicas tecnológicas que ayuden a resolver esta problemática, pero cuidando al medio ambiente (FAO, 2015). La roya es la enfermedad que más afecta a los cafeticultores actualmente; en una encuesta efectuada por Saldaña *et al.* (2020), se encontró que el 99.2 % de los entrevistados (en ocho municipios de Chiapas; Amatenango de la Frontera, Bellavista, Escuintla, Frontera Comalapa, Huixtla, Montecristo de Guerrero, Tapachula y Tuzantán-) mencionaron que sus cafetales fueron atacados por la plaga y que el periodo más crítico fue en los años 2012-2013.

## **2.7 Control biológico de enfermedades**

Para el control de enfermedades, se ha utilizado el control químico afectando considerablemente la rentabilidad de la producción por sus altos costo, con efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente (Devine *et al.*, 2008). En México, más de 78.2 % de las unidades de producción agropecuaria reporta pérdidas debidas a causa de plagas y enfermedades y se quejan principalmente de los altos costos de insumos y de su baja efectividad, lo que genera una mala rentabilidad de sus cultivos (Zepeda, 2018).

A partir de estas inconformidades por parte de los consumidores y trabajadores en la agricultura, comienzan a buscarse otras opciones para el control de las enfermedades y toman en consideración el control biológico que surgió en los años 90, esta es una herramienta biotecnológica con el uso de microorganismos benéficos como hongos, bacterias, nematodos (entomopatogénicos) y virus (bacteriófagos); han observado que el uso de estos microorganismos y de los virus bacteriófagos ayuda a mejorar notablemente la economía de los agricultores, protege al ambiente y a la salud de los consumidores (Pacheco *et al.*, 2020).

## **2.8 Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)**

Dentro de los microorganismos del suelo destacan los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), que forman una de las asociaciones simbióticas mutualistas más importantes de la naturaleza (Figura 1); esta asociación se establece entre las raíces de las plantas terrestres y hongos pertenecientes al filo Glomeromycota que integran la llamada micorriza arbuscular, con una amplia distribución en el planeta; estos microorganismos cumplen múltiples funciones dentro del ecosistema mejorando el crecimiento y la salud de las plantas facilitando la absorción de agua y de nutrientes, tienen impacto positivo sobre la estabilidad de los agregados del suelo y la infiltración del agua, incrementan la tolerancia de las plantas al estrés hídrico (Fajardo *et al.*, 2011), entre otras funciones. Las micorrizas más abundantes y con una distribución amplia en el planeta son las ectomicorrizas y las arbusculares, aproximadamente 80 % de las familias de plantas son capaces de establecer este último tipo de micorrizas (Camarena, 2012).

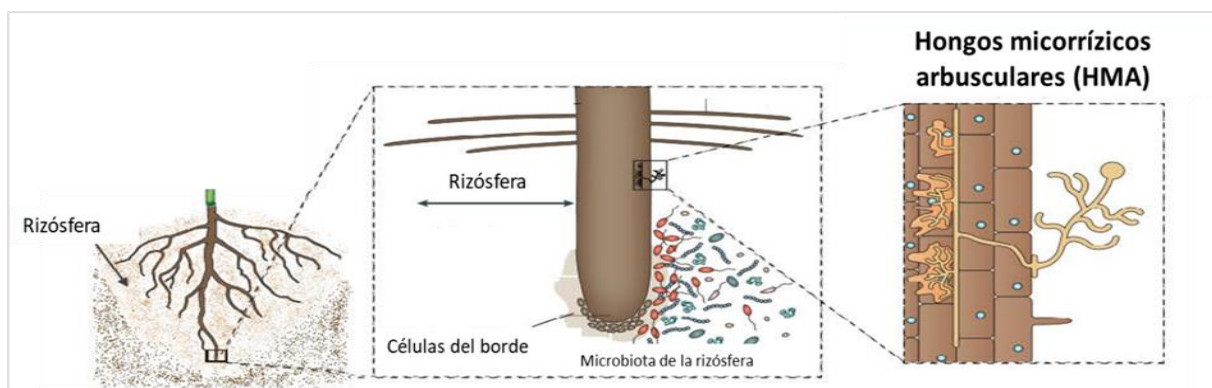


Figura 1. Rizósfera de una planta formando simbiosis con los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) (tomado de Philippot *et al.*, 2013).

Los HMA son organismos biótrofo obligados del suelo, que se asocian de forma mutualista con diversos grupos vegetales (Figura 1), de esta forma las plantas obtienen beneficios de esta interacción biológica (López *et al.*, 2015) para mejorar la nutrición de las plantas (Jakobsen y Hammer, 2015). Además, son capaces de competir con fitopatógenos por espacio y nutrientes dentro de la raíz (Nogales, 2006). Reyes *et al.* (2016), indicaron que los HMA ayudan a las plantas, aumentando la tolerancia a condiciones de estrés biótico y abiótico, mejorando la calidad del suelo y la promoción del establecimiento de bacterias fijadoras de N<sub>2</sub> atmosférico. Los HMA permiten usar de manera eficiente los fertilizantes orgánicos y convencionales aplicados al suelo, ya que los nutrientes son asimilados por la planta con mayor rapidez por efecto de la asociación con los HMA, razón por la cual se pueden reducir los problemas de contaminación por el exceso de aplicación de fertilizantes químicos derivado a que los fertilizantes convencionales son muy volátiles (Trinidad, 2014).

### 2.8.1 Efectos de los hongos micorrízicos arbusculares en el cultivo del Café

Para la producción de plántulas de café, en la producción de café orgánico, se requiere de una nutrición de plántulas a base de biofertilizantes, con base en ello Adriano *et al.* (2011), evaluaron el efecto del HMA *Rhizophagus intraradices* en plantas de café variedad Bourbon; después de la inoculación encontraron un incremento en la altura (32.8 %), hojas (73 %) y raíces (18 %) en plantas de la variedad Bourbon con respecto a las plantas testigo, además de un incremento del peso seco en raíz y hojas, del 118 al 141 %, respectivamente.

Incluso se ha investigado el efecto bioprotector de los HMA en el cultivo de *Coffea arabica*. Guzmán y Rivillas (2007), inocularon dos especies de hongos micorrícicos arbusculares para probar su efecto en la variedad Caturra y la línea CX2720 de la variedad Castillo, utilizaron *Glomus manihotis* y *G. fasciculatum*, la inoculación fue directamente a las raíces al momento del trasplante a nivel vivero, sesenta días después de haber inoculado las dos especies de HMA, se inoculó *Cercospora coffeicola* (mancha de hierro). La concentración del patógeno fue de 15,000 conidios/mL de agua aplicado mediante el sistema de aspersión. En la variedad Caturra la severidad y las hojas caídas obtuvieron un valor de 10.3 % y 38 hojas, en la variedad Castillo fue de 7.35 % de severidad y 13 hojas caídas, en tanto que los testigos presentaron una severidad del 100 % en la variedad Caturra y 67.37 % en Castillo, con 40 hojas caídas en ambas variedades, por lo tanto, las plantas micorrizadas presentaron mayor tolerancia al ataque de la mancha de hierro con menores valores en severidad y menor número de hojas caídas (*Op cit.*).

Herrera *et al.* (2019) mencionan que caracterizaron a nivel morfológico las especies endomicorrícicas asociadas con cafetos (*C. arabica* L.) de la variedad Típica que presentaban signos y sin signos de infección con roya (*H. vastatrix*), se encontró que los géneros *Rhizophagus* y *Acaulospora* predominan en la composición de los consorcios, siendo este primero el más frecuente en plantas de café sanas con mayor abundancia de HMA, que las plantas enfermas, esto se debe a que los HMA forman simbiosis, el hongo transporta los nutrientes del suelo hacia la planta y ésta en compensación le brinda una fuente de carbono, además, los HMA forman un puente que facilita la interacción de las raíces de las plantas con otros componentes de la microbiota y la parte abiótica del suelo (Trinidad, 2017), por lo tanto para esta investigación se puede mencionar que existe una relación en la disminución de la severidad de la roya utilizando los HMA en plantas de café.

Ya que los HMA son probablemente un componente importante del fenómeno de supresión de fitopatógenos, ya que aumentan los niveles de aminoácidos (arginina, prolina), de las proteínas relacionadas con la defensa (3 glucanasas, quitosanasas, quitinasas, peroxidasas, fenilalanina amonio liasa, chalcona sintasa, superóxido dismutasa), incremento en la metilación del ADN y crean barreras estructurales internas (ligninas, callosa, hidroxiprolina, glicoproteínas) (Carreón *et al.*, 2008).



### **2.8.2 Aplicaciones de los consorcios de HMA para productividad de café**

Un consorcio microbiano es una asociación natural de dos o más poblaciones microbianas, de diferentes especies, que actúan conjuntamente como una comunidad en un sistema complejo, donde todos se benefician de las actividades de los demás (Ochoa y Montoya, 2010). Se han realizado investigaciones con consorcios de HMA, para mejorar la productividad y la sanidad en el cultivo del café. Trejo *et al.* (2011), probaron el efecto de siete consorcios de HMA de fincas cafetaleras en el estado de Veracruz, para evaluar el crecimiento de plantas de café de la variedad Garnica en condiciones de invernadero y de campo, los consorcios incrementaron la altura en un 91 % con respecto al testigo absoluto y al testigo fertilizado con fósforo ( $800 \text{ mg Ca (PO}_4)_3 \text{ L}^{-1}$ ), en condiciones de invernadero.

En condiciones de campo, a los 290 DDI (días después de la inoculación), las plantas inoculadas con los consorcios La Estanzuela (ES), Miradores (MI) y Paso Grande (PG), tuvieron mayor supervivencia (> 80 %). Los consorcios que generaron más altura procedieron de las plantaciones de café con manejo agronómicos de tecnología media. En Perú, se evaluaron consorcios de HMA en plantas de café de la variedad Caturra: altura de planta, área foliar, biomasa aérea, biomasa radicular seca, porcentaje de colonización y longitud de micelio extra radical, desarrollando significativamente más las plantas micorrizadas comparadas con el testigo sin HMA (Del Águila *et al.*, 2018).

Para esta investigación se considera como consorcio de HMA a la asociación de diversas especies de HMA, propagadas en conjunto, que se inocularán con el propósito de lograr la disminución de los síntomas de *H. vastatrix* en plantas de café.

### **3. MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1 Ubicación del área de estudio**

##### **3.1.1 Muestreo de suelos para la obtención del inóculo**

Se seleccionaron dos municipios cafetaleros de la Región Frailesca: La Concordia y Montecristo de Guerrero, para la obtención de suelo como fuente de inóculo (variedades Típica y Costa Rica 95), para analizarse y realizar la multiplicación de los HMA en el Laboratorio de Fitopatología de la Unidad de Biotecnología Vegetal del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ), ubicado en Zapopan, Jalisco, México.

##### **3.1.2 Desarrollo del experimento**

La presente investigación se desarrolló en el Laboratorio de Fitopatología de la Unidad de Biotecnología Vegetal del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ) y en el vivero tecnificado ubicado en la Col. Presidente Echeverría, municipio de Venustiano Carranza, Chiapas, México.

##### **3.1.3 Evaluación de los consorcios de HMA contra *H. vastatrix***

La evaluación de los HMA contra la roya del café se realizó en el vivero tecnificado ubicado en la Col. Presidente Echeverría, municipio de Venustiano Carranza, Chiapas, México.

#### **3.2 Fases del estudio de la investigación**

La investigación estuvo organizada en cuatro fases:

1. Fase de colecta suelos en cafetales convencionales.
2. Fase de identificación de las diferentes especies nativas de HMA en cafetales con manejo convencional y análisis físico y químico de los suelos.
3. Fase de multiplicación y cuantificación de esporas HMA, en los consorcios de los HMA.
4. Fase de evaluación de la respuesta de los HMA sobre el desarrollo y la bioprotección hacia *Hemileia vastatrix* en plantas de café en condiciones de vivero.

### 3.2.1 Fase I: Colecta de suelo en cafetales convencionales

Los muestreos se realizaron en dos zonas cafetaleras convencionales correspondientes: a) Municipio de La Concordia, Chiapas, localizada a una altura de entre 400 a 2500 msnm, coordenadas geográficas 15°41'N y 92°37'W, temperatura media anual 14-26 °C y precipitaciones de 1000-4000 mm y b) Municipio de Montecristo de Guerrero, a una altura de 800 a 2800 msnm, coordenadas geográficas 15°41'N y 92°37'W, temperatura media anual 14-24 °C y precipitación anual entre 2500-4000 mm (INEGI, 2014). En ambos municipios se realizaron los muestreos de suelos en la temporada seca y lluvia, con productores indígenas (Figura 2).



Figura 2. Acompañamiento por productores de café indígenas Tzeltal del estado de Chiapas para el muestreo de suelo rizosférico de plantas de café.

El muestreo se realizó por variedad de café, en el mes de mayo del 2020, se tomó en el área de goteo de la planta, a una profundidad de 0 a 20 cm, se eligieron cinco plantas sanas dentro del cafetal bajo el método sistemático dirigido tomando cuatro puntos (Figura 3), consistió en tomar una planta en cada punto formando una W en la superficie con la variedad a muestrear en el cafetal, el resultado de las muestras de las cinco plantas de la misma variedad en particular se mezcló para formar una muestra compuesta aproximadamente de 5 kg (Trinidad, 2014).

En cada localidad se seleccionó una variedad que la representa tomando en cuenta las siguientes variedades: Típica (Tc) y Costa Rica 95 (CR) (Cuadro 2). La muestra de suelo se extrajo en la zona rizosférica de las plantas en producción, se tomaron cuatro submuestras a la altura del área de goteo extrayendo 250 g, por cada punto, posteriormente de las submuestras fueron mezcladas para hacer una muestra compuesta aproximadamente 1 kg por planta, se mezclaron las cinco plantas con

muestreo, las cuales se etiquetaron y almacenaron en bolsas de polietileno al laboratorio (*Op cit.*), (Figura 4).

El muestreo utilizado fue sistemático dirigido, tomando los cinco puntos en forma de “W”, muestreando plantas vigorosas, sanas y sin síntomas de roya de café, tomando en cuenta las plantas de la parte de en medio de la parcela evitando el efecto orilla (Herrera *et al.*, 2019).

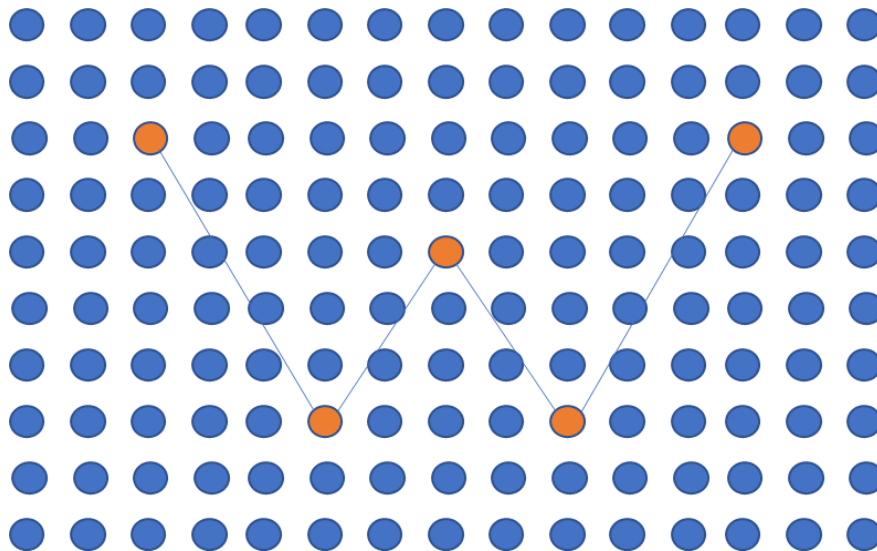


Figura 3. Método de muestreo en W para obtención de las muestras de los consorcios que contuvieron a los HMA que se estudiaron en esta investigación.

Cuadro 2. Localidades donde se realizaron los muestreos para la colecta de las fuentes de inóculo de los hongos micorrízicos arbusculares en el estado de Chiapas.

Municipio	Localidad	msnm	Variedad de café	Fecha de muestreo
La Concordia	Santa Elena (SE-CR)	1,546	Costa Rica 95	26/05/2020
	Emiliano Zapata (EZ-TI)	1,564	Típica	24/05/2020
Montecristo de Guerrero	Montecristo de G. (MG-CR)	1,327	Costa Rica 95	13/05/2020
	Laguna de Cofre (LF-TI)	1,797	Típica	19/05/2020



Figura 4. Procedimiento del muestreo de suelo rizosférico para la obtención de los consorcios de HMA (Trinidad, 2017).

### 3.2.2 Fase II. Identificación de las diferentes especies nativas de los HMA en cafetales convencionales y análisis físico químico de los suelos

La identificación taxonómica y la contabilización de esporas por especie de los HMA nativos de los cultivos de café, se llevó a cabo en el Laboratorio de Biología Molecular del Centro de Investigación en Genética y Ambiente, de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, donde se realizaron las siguientes actividades.

#### Identificación taxonómica de las especies de los HMA

Para la identificación taxonómica de las especies con base en la morfología de las esporas, se extrajeron las esporas de una muestra de 50 g de suelo seco de la muestra compuesta de los cafetales convencionales, mediante la técnica de tamizado húmedo, decantación y centrifugación con gradiente de sacarosa (20 y 60 %, p:v) (Gerdemann y Nicolson, 1963). El centrifugado se realizó por 3 min a 1500 rpm, el sobrenadante fue pasado por un tamiz de malla de 45  $\mu\text{m}$  y se enjuagó con abundante agua destilada (Figura 5) (Brundrett *et al.*, 1996).

Posteriormente las esporas fueron extraídas con la ayuda de un estereomicroscopio y se colocaron en un portaobjetos clasificándolos por grupos, de acuerdo con las características de color y tamaño. Con cada grupo de esporas se elaboró una preparación permanente con alcohol polivinílico en lactoglicerol (PVLG) mezclado con el reactivo de Melzer (1:1 v/v) (Figura 5). Las esporas se observaron con un

microscopio óptico Zeiss, acoplado con una cámara digital de la marca Axiocam ERc 5s y el software ZEN 2.3 (Blue edition) (Carl Zeiss Microscopy GmbH. 2011. Copy Right 2002-2011).

La identidad de las esporas se determinó por comparación de las características morfológicas (diámetro, color, agrupamiento, tipos y arreglo de los estratos de la pared esporal, tamaño de las esporas y de los estratos de pared, reactividad al Melzer) observadas contra la descripción de las especies de HMA que se encuentran en la International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi ([www.invam.wvu.edu/](http://www.invam.wvu.edu/)) y de las descripciones originales de la mayoría de las especies publicadas, obtenidas de la página electrónica Glomeromycota Taxonomy ([www.amf-phylogeny.com](http://www.amf-phylogeny.com)). La nomenclatura de las especies siguió la clasificación propuesta por Schußler *et al.* (2001) e incluyendo la nomenclatura propuesta por (Schußler y Walker, 2010).

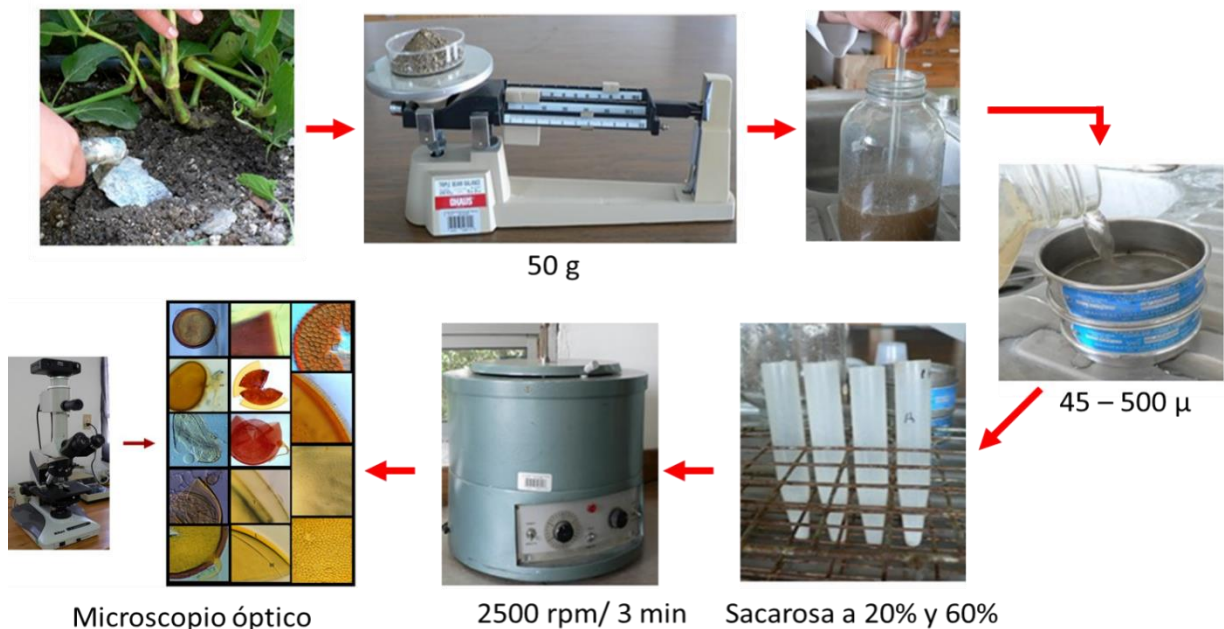


Figura 5. Esquema de aislamiento e identificación taxonómica de los HMA provenientes de suelos rizosférico de zonas cafetales y propagados en macetas trampa.

### **Análisis fisicoquímicos de los suelos de los cafetales convencionales**

Los análisis físicos y químicos de los suelos recolectados de la rizósfera del café se llevaron a cabo en el Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), ubicado en San Cristóbal de Las Casas. Los análisis incluyeron las siguientes variables: fósforo (P), nitrógeno

amoniaco ( $\text{NH}_4^+$ ), potasio (K), pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ), materia orgánica y la clasificación textural del suelo, bajo los criterios de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002).

### 3.2.3 Fase III: Multiplicación y cuantificación de las esporas de HMA en los consorcios de los HMA.

La multiplicación de los consorcios de HMA en las muestras de suelo se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Fitopatología de la Unidad de Biotecnología Vegetal del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ). Las micorrizas al ser microorganismos biótrofos obligados, necesitaron de plantas vivas para su multiplicación Ruscitti *et al.* (2019), por lo tanto para esta propagación se emplearon como planta trampa cempasúchil (*Tagetes erecta*), pasto bermuda (*Cynodon dactylon*) y alfalfa (*Medicago sativa*), para promover una mayor variedad de asociación de las esporas con las plantas; se trabajó bajo condiciones de invernadero, el sustrato de propagación estuvo compuesto por: suelo, arena y agrolita (proporción:60:30:10), en macetas de plástico de polipropileno negro con capacidad de 2 L (Montoya, 2014).



Figura 6. Multiplicación de los HMA en plantas trampa bajo condiciones de invernadero de suelos provenientes de zonas cafetaleras.

La propagación de estas plantas inicio el 15 de agosto de 2020 y finalizo el 15 de enero de 2021, se generaron dos consorcios de HMA nativos, considerando uno por cada variedad de café (Típica y Costa Rica 95), posterior a los cinco meses de propagación se realizó la identificación taxonómica de las especies presentes y se cuantificó la abundancia de esporas que existen por cada gramo de suelo (Figura 6).

## Cuantificación de esporas de HMA

Se determinaron las dosis de los consorcios de HMA, después de los 5 meses del inicio de la propagación de los HMA, se realizó la cuantificación de esporas en cada maceta trampa, así mismo se realizó una comparación de sitios de cafetales orgánicos y convencionales, fueron analizados en las instalaciones del Laboratorio de Fitopatología de la Unidad de Biotecnología Vegetal del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ).

### a) Conteo de esporas de los HMA

La cuantificación de esporas se realizó por conteo en caja de Petri y extrapolación, bajo las indicaciones de Carballar *et al.* (2020):

a). Extraer las esporas a partir de una muestra de peso o volumen conocido y colocarlas con agua destilada en una caja de Petri, cuadrículada en el fondo. b). Colocar la caja Petri bajo un microscopio estereoscópico a bajo aumento 3-4x. Seleccionar al azar 10 cuadrados de la cuadrícula y contar la totalidad de las esporas contenidas en ellos. Registrar el dato. c). Revolver suavemente el contenido de la caja, para distribuirlo homogéneamente. d). Repetir los pasos 2 y 3, dos veces más para tener tres conteos de la misma muestra. e). Contar el número de esporas presentes en 10 cuadrados y aplicar una regla de tres para estimar la cantidad total de esporas contenidas en el número total de cuadrados de la caja y contar únicamente las esporas turgentes, brillantes y completas presentes en el fondo de la caja de Petri. f), las que se presuponen con contenido, lo que se usa como evidencia indirecta de su viabilidad, (Figura 7).

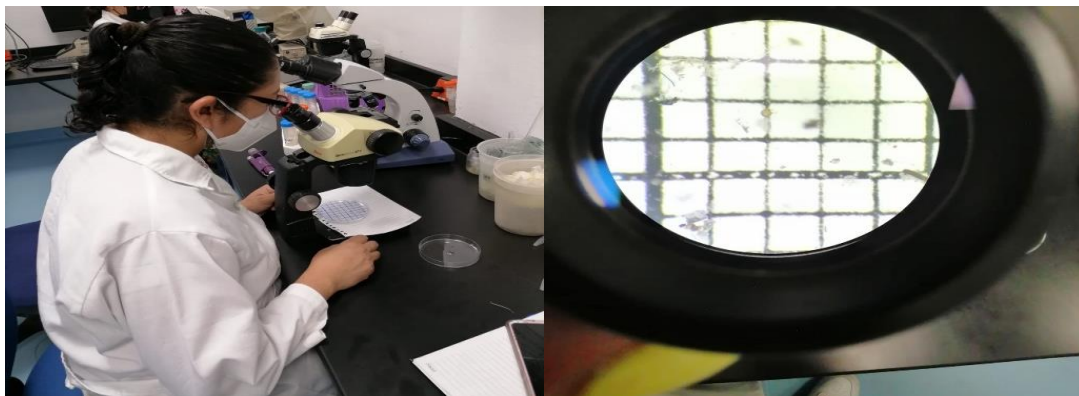


Figura 7. Conteo de esporas de HMA con el microscopio estereoscópico.



### 3.2.4 Fase IV. Fase de evaluación de la respuesta de los HMA sobre el desarrollo y bioprotección hacia *Hemileia vastatrix* en plantas de café en condiciones de vivero.

La evaluación de los efectos de los consorcios de HMA con plantas de café bajo condiciones de vivero, se realizó en el vivero de café tecnificado, ubicado en la Col. Presidente Echeverría, Mpio. de Venustiano Carranza, Chiapas, México. La cual pertenece a la región IV de Los Llanos, del estado de Chiapas, México. Limita al norte con Totolapa, Nicolás Ruíz y Teopisca, al noreste con Amatenango del Valle, al este con Las Rosas y Socoltenango, al sur con La Concordia, al oeste con Villa Corzo y Chiapa de Corzo, al noroeste con Acalá (Figura 8).



Figura 8. Ubicación del vivero de café tecnificado, donde se realizó el experimento ubicado en la Col. Presidente Echeverría, municipio de Venustiano Carranza, Chiapas, México.

La localidad se encuentra a una altura de 540 metros sobre el nivel del mar. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano. La vegetación es de selva baja, con una precipitación media anual de 1,100 mm – 1 500 mm y una temperatura media anual de 16 – 26 °C (INEGI, 2014).

#### **Variedades de café**

Se empleó dos variedades de café convencional: Típica (T) y Costa Rica (CR). Las semillas se quedaron en un cantero de 1 x 5m; se sembraron de forma lineal hasta al final del cantero, de ahí se tapó y se colocó encima pasto seco para agilizar los tiempos

de germinación y proteger las plántulas de café; después de dos meses inicio la germinación y emergencia de las plántulas de café.

### **Inoculación de los consorcios de HMA en el experimento**

Las variedades de café utilizadas para este experimento fueron inoculadas con 200 esporas de HMA por cada planta al momento del trasplante con 20 días de haber germinado, en estado fenológico conocido como mariposa con dos hojas verdaderas., colocadas directamente sobre la raíz (Típica y Costa Rica 95) (Figura 9). Se determinó esta cantidad de esporas con base en una investigación realizada por Reyes *et al.* (2016), quienes inocularon con 80 esporas a plantas de *Capsicum annuum* al momento del trasplante y lograron controlar la enfermedad producida por *Phytophthora capsici* L. El sustrato constó de una mezcla de suelo, arena y agrolita (proporción 60-30-10), fue esterilizado en autoclave a 120 °C durante 6 h con la finalidad de eliminar patógenos y microorganismos benéficos que puedan afectar los resultados; se utilizaron bolsas de plástico con 2 L de capacidad (Montoya, 2014).



Figura 9. Observación de la inoculación de las plantas de café con los consorcios de HMA en condiciones de vivero.

### **Aplicación de las esporas de *Hemileia vastatrix* en las plantas de café**

Después de 3 meses del trasplante y la inoculación con los HMA a las plantas de café se les aplicaron esporas de *Hemileia vastatrix*, con la finalidad de cuantificar el efecto de los HMA contra esta enfermedad en las plantas de café. Las esporas de la roya se recolectaron en plantas de campo, en un tiempo de 24 a 48 h como máximo previo a la inoculación en el experimento; se inoculó 1 mL de una suspensión de  $10^5$  esporas  $\text{mL}^{-1}$ .

La inoculación fue realizada en el haz y en el envés de las hojas superiores de las plantas de café (Figura 10). Se eligió esta dosis con base en un estudio realizado por García e Hidalgo (2019), donde infectó plantas de café a una concentración de  $1 \times 10^7$  conidios/ mL<sup>-1</sup>, y las plantas presentaron los síntomas de la enfermedad.

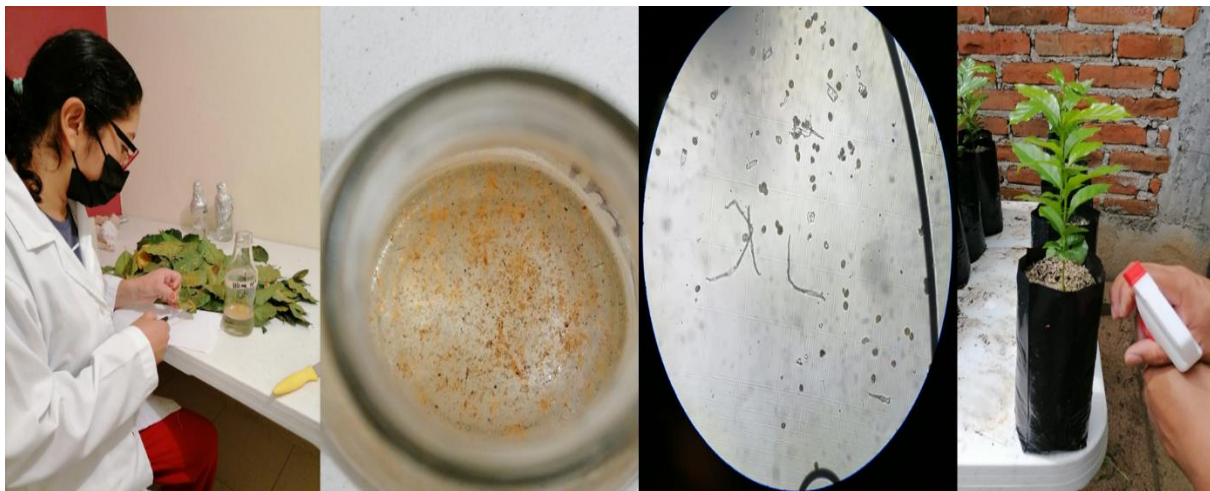


Figura 10. Aplicación de esporas de roya a las plantas de café micorrizas y sin HMA en condiciones de vivero.

### Diseño experimental para la evaluación de los HMA sobre las plantas de café

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar bajo un arreglo trifactorial 2x4x2: factor variedad de café (2 niveles: Típica y Costa Rica 95); factor HMA (4 niveles: 2 consorcios HMA (Tip y Cr95), 1 HMA mono-específica *Funneliformis mosseae* y sin HMA) y el factor Roya (2 niveles: con Roya y sin Roya) (Cuadro 3).

La unidad experimental fue una maceta con una planta de café, 16 tratamientos con seis repeticiones por tratamiento, por lo tanto, en esta investigación se trabajó con 96 unidades experimentales. A continuación, se describe la clave de cada tratamiento:

Cuadro 3. Descripción del diseño de los tratamientos de estudio en esta investigación.

Tto	Variedad, fuente del inóculo y presencia de roya*	Clave del tratamiento
1	Costa Rica 95 + Consorcio Cr95 + Con roya	Cr.Cr95.Cr.
2	Costa Rica 95 + Consorcio Cr95 + Sin roya	Cr.Cr95.Sr.
3	Costa Rica 95 + <i>Funneliformis mosseae</i> + Con roya	Cr.Fm.Cr.

4	Costa Rica 95 + <i>Funneliformis mosseae</i> + Sin roya	Cr.Fm.Sr.
5	Costa Rica 95 + Sin HMA + Con roya	Cr.Shma.Cr.
6	Costa Rica 95 + Sin HMA + Sin roya	Cr.Shma.Sr.
7	Costa Rica 95 + Consorcio Tip + Con roya	Cr.Tip.Cr.
8	Costa Rica 95 + Consorcio Tip + Sin roya	Cr.Tip.Sr.
9	Típica + Consorcio Cr95 + Con roya	Tc.Cr95.Cr.
10	Típica + Consorcio Cr95 + Sin roya	Tc.Cr95.Sr.
11	Típica + <i>Funneliformis mosseae</i> + Con roya	Tc.Fm.Cr.
12	Típica + <i>Funneliformis mosseae</i> + Sin roya	Tc.Fm.Sr.
13	Típica + Sin HMA + Con roya	Tc.Shma.Cr.
14	Típica + Sin HMA + Sin roya	Tc.Shma.Sr.
15	Típica + Consorcio Tip + Con roya	Tc.Tip.Cr.
16	Típica + Consorcio Tip + Sin roya	Tc.Tip.Sr.

\*Los tratamientos indican variedad de café, nivel micorrización y presencia de roya

### Variables de respuestas por evaluadas

Por cada unidad experimental, después de la inoculación con los HMA, se midió el desarrollo de la planta cada 30 días, considerando; la altura, diámetro del tallo y número de hojas, después de los 90 días después de la inoculación (DDI) con los HMA, se evaluaron a cada 30 días las variables fitopatológicas de la planta: la severidad de la roya, el número de hojas con pústulas, el número de pústulas por hojas y el porcentaje de incidencia de la roya, a los 150 DDI, se midió la longitud de la raíz, el volumen radical, el peso seco de raíz, el área foliar total, el volumen de la parte área, la altura, el diámetro del tallo, el número de hojas y todas las variables fitopatológicas. Para medir la altura de las plantas en cm y el diámetro del tallo en mm se utilizó un vernier; el conteo de las hojas de cada unidad experimental se realizó de manera manual considerando una hoja completamente formada (Zitácuaro y Aparicio, 2004).

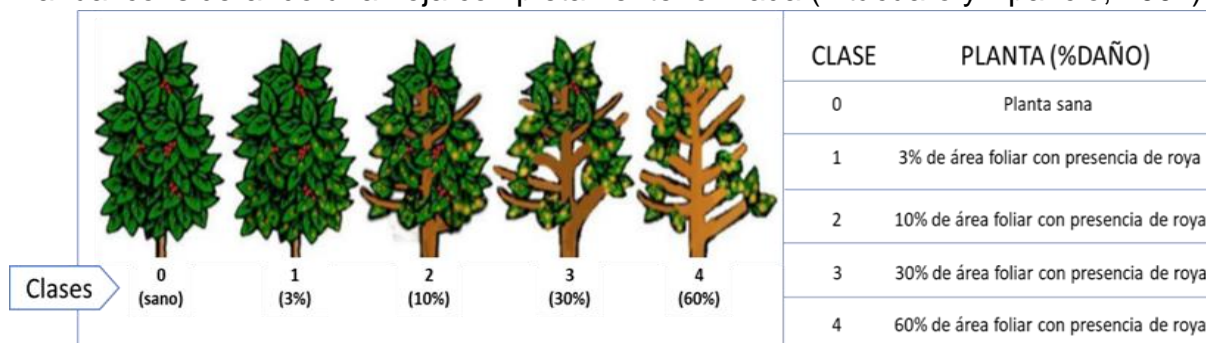


Figura 11. Evaluación de la severidad de roya del caféto (SENASICA, 2018).

En este experimento, para definir la severidad de daño por la roya, se utilizó la escala “evaluación de la severidad de roya del cafeto en planta” (Figura 11), emitida por SENASICA (2016); para el número de hojas con pústulas, se contabilizaron de manera visual las hojas que presentaron pústulas con roya; para determinar el número de pústulas por hojas, se contabilizaron todas las hojas con roya y todas las pústulas por hoja, el total de pústulas se dividió entre el número de hojas infestadas. La incidencia de roya se estimó al finalizar la investigación a los 150 DDI. El cálculo del PI de roya se realizó usando la siguiente fórmula (Romero, 2019 y Saboya, 2018):

$$\text{Porcentaje de Infección (PI)} = \frac{\text{Número de hojas con roya}}{\text{Número total de hojas}} \times 100$$

La longitud de la raíz de las plantas se midió con un flexómetro, para determinar el volumen radical y el volumen de la parte aérea, se utilizaron probetas graduadas con capacidad de 1 L; el peso fresco y seco de la raíz se registró con ayuda de una balanza analítica (Montoya, 2014), se midió el área foliar total considerando todas las hojas de las plantas (Trinidad, 2014).

### **Análisis estadísticos**

Los datos obtenidos de la evaluación de las distintas variables de respuesta fueron sometidos a un análisis de varianza multifactorial y a una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), mediante el programa Statgraphics Centurión (StatPoint Inc., 2005).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Análisis fisicoquímico de los sitios de muestreo

Estos análisis se llevaron a cabo en el Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), ubicado en San Cristóbal de Las Casas. Los análisis incluyeron los siguientes parámetros: fósforo (P), nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), potasio (K), pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ), materia orgánica y la clasificación textural del suelo (Cuadro 4).

MG-CR (Montecristo de Guerrero-Costa Rica 95): pH ácido, contenido medio de materia orgánica, nitrógeno y potasio, muy bajo en fosforo; suelo franco arenoso.

LF-TI (Laguna del cofre-Típica): pH ácido, contenido muy alto de materia orgánica y potasio, medio en nitrógeno, medio en fosforo; suelo franco-arcillo-arenoso.

SE-CR (Santa Elena-Costa Rica 95): pH ácido, contenido medio de materia orgánica, nitrógeno y potasio, muy alto en fosforo; el suelo es franco.

EZ-TI (Emiliano Zapata-Típica): pH ácido, contenido bajo de materia orgánica, medio en nitrógeno, fosforo y bajo en potasio; el suelo es franco arcilloso.

Todos los suelos resultaron con pH ácido; el contenido de materia orgánica alto, lo obtuvo la muestra LF-TI con 17.07 %, lo mismo que de potasio con 0.97 cmol/kg. La muestra SE-CR tuvo el valor más alto de fosforo 30.56 mg/kg. Por lo tanto, todas las muestras de suelo se encuentran en rangos adecuados de pH, ya que para este cultivo los intervalos fueron 5 a 5.5. (CENICAFE, 2008) y los suelos buenos para cultivar café deben tener contenidos de materia orgánica mayores al 8 % (Vanegas, 2016), por lo que las muestras SE-CR y EZ-TI, estuvieron por debajo de estos valores.

El fósforo es uno de los elementos fundamentales para el desarrollo de las plantas de café, y cuando los contenidos del suelo están por debajo de su nivel crítico (30 mg/kg), como fue el caso de la muestra MG-CR, LF-TI y EZ-TI, en plantaciones pequeñas debe fertilizarse con DAP (18-46-00), tres aplicaciones, la primera 9 g por planta, la segunda 11 g por planta y la tercera 13 g por planta con intervalos de 4 meses de diferencia entre cada aplicación (CENICAFE, 2008).

Cuadro 4. Análisis fisicoquímicos de los sitios de suelos de café convencional.

Características fisicoquímicas									
Sitios	pH H <sub>2</sub> O	Materia orgánica (%)	Nitrógeno total (%)	Fósforo disponible mg/kg	Potasio disponible cmol/kg	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Nombre textual
MG-CR	5.85	10.36	0.44	2.86	0.47	53.1	18.9	28	Franco-arenoso
LF-TI	5.51	17.07	0.79	16.71	0.97	57.3	27.3	15.4	Franco-Arcillo-Arenoso
SE-CR	5.44	7.35	0.37	30.56	0.47	46.4	22.9	30.7	Franco
EZ-TI	5.56	5.43	0.31	14.45	0.3	24.4	34.9	40.7	Franco-arcilloso

MG-CR: Montecristo de Guerrero-Costa Rica 95; LF-TI: Laguna del cofre-Típica; SE-CR: Santa Elena-Costa Rica 95; EZ-TI: Emiliano Zapata-Típica

pH: Fuertemente ácido (Muy bajo) (menor de 5.0), neutro (Medio) (6.6-7.3), fuertemente alcalino (Muy alto) (mayor de 8.6),

Materia Orgánica: Muy bajos (menor de 4.0), bajo (4.1-6.0), medio (6.1-10.9), alto (11.0-16.0), muy alto (mayor de 16.1),

Nitrógeno: Muy bajo (menor de 0.15), bajo (0.16 – 0.30), medio (0.31 – 0.80), alto (0.81 – 1.2), muy alto (mayor de 1.3)

Fósforo: Muy bajo (menor de 5.5), bajo (5.51 – 11.0), medio (11.1 – 18.0), alto (mayor de 18.1 – 22.0), muy alto (mayor de 22.1)

Potasio (cmol/kg): Muy bajos (menor de 0.2), bajo (0.21-0.3), medio (0.31-0.6), alto (mayor de 0.61 – 0.8), muy alto (mayor de 0.81)

Textura Media: Franco, Franco arcillo arenoso, Franco arcillo limoso, Franco arcilloso, Franco limoso

Textura Fina o pesado: Arcilloso, Arcillo limoso, Arcillo arenoso, Limosos

Textura Gruesa: Arenoso, Franco arenoso, Areno franco.

#### **4.2 Riqueza de especies de HMA asociados a la rizósfera de *Coffea arabica*, en las plantaciones de las variedades Típica y Costa Rica 95 convencional.**

El análisis taxonómico convencional de las esporas de HMA de las variedades Típica llevo a la identificación de 11 especies de HMA; en Costa Rica 95 se encontraron 13 especies distintas, en el Cuadro 5, se muestra que en las cuatro plantaciones y en dos épocas del año se identificaron cuatro familias, siete géneros y dieciocho especies de HMA. Las familias fueron: Acaulosporaceae, Claroideoglomeraceae, Glomeraceae y Gigasporaceae. Las especies con mayor frecuencia fueron: *Funneliformis geosporus*, *Claroideoglopus etunicatum*, *Acaulospora mellea* y *Acaulospora scrobiculata* (Cuadro 5).

Garzón (2014), indicó que el género *Acaulospora* está asociado a los suelos ácidos, como los que predominan en los terrenos de cultivo del café estudiados en este trabajo. Herrera *et al.* (2019) al identificar a los HMA nativos en la variedad de café Típica señalaron que predominaron dos géneros *Acaulospora* y *Rhizophagus*: *A. scrobiculata*, *A. foveata*, *A. mellea*, *A. laevis*, *A. delicata*, *A. capsicula*, *A. spinosa*, *A. lacuosa*, *R. intraradices*, *R. fasciculatus* y *R. manihotis*.

A pesar de que los consorcios provienen de café de un lugar muy similar al estudiado por Bertonili *et al.* (2020), las especies fueron diferentes; ellos encontraron como exclusivas a *Acaulospora scrobiculata*, *Funneliformis mosseae*, *Sclerocystis* sp., *S. taiwanensis*, *Scutellospora calospora* y un Glomerar (*Glomus* sp.1) no identificado y a *Ambispora reticulata* como nuevo registro para México y para el estado de Chiapas. Se han identificado nuevas especies en México, como es en otros, por ejemplo, en Perú, se identificaron 31 especies de HMA, en suelos de doce localidades de plantaciones de café, de la cuales se reportó una especie nueva (*Funneliglomus sanmartinense*) (Arteaga, 2019).

Hasta el momento no se han encontrado registros de HMA asociados al cultivo del café de la variedad Costa Rica 95, en ésta es necesario realizar más investigaciones enfocadas al estudio de los HMA, ya que utilizan grandes cantidades de fertilizantes convencionales y agroquímicos (Zepeda, 2018) que podrían influir de manera importante en las comunidades de HMA, por lo cual en esta investigación no se puede comparar los resultados obtenidos con otras investigaciones. Sin embargo, en esta



investigación se identificaron el 16% de las especies encontradas en el cultivo del café, ya que de las 334 especies de HMA identificadas en el mundo, existen más de 100 especies de HMA que se asocian a las plantas de café en diferentes países del mundo, es decir una tercera parte se han encontrado en el cultivo del café (Hernández *et al.*, 2021). Una de las principales razones que presentan estos cultivos para poder estar realizando simbiosis con los HMA, es que el cultivo de café es dependiente de los HMA, para su nutrición y crecimiento vegetativo Ruscitti *et al.* (2019).

Además, le brinda un nicho ecológico natural, ya que el cultivo del café, se produce bajo un sistema bajo sombra tiene un aporte continuo de nutrientes provenientes del estrato arbóreo principalmente de leguminosas, árboles maderables y vegetación propia de la zona; Cedro (*Cedrus*), Caoba (*Swietenia macrophylla*), Chalun (*Inga edulis*), matarratón (*Gliricidia sepium*), guasch (*Leucaena leucocephala*), crea un ambiente óptimo para la sobrevivencia y la simbiosis de microorganismos benéficos entre los que destacan los HMA (Jaramillo,2011). A pesar de la importancia para el buen funcionamiento de los servicios ecosistémicos, no hay un gran conocimiento de las relaciones interespecíficas que se dan en estos sistemas de producción asociados a los hongos micorrizicos arbusculares (Urgiles *et al.*, 2021).

Cuadro 5. Diversidad de especies de HMA encontradas en el suelo rizosférico de *Coffea arabica*; de cultivos convencionales en distintos sitios y épocas de muestreo (seca y lluvia) en los municipios de La Concordia y Montecristo de Guerrero, Chiapas, México.

Hongo micorrizico arbuscular	Sitios de muestreo de HMA							
	MG-CR		LF-TI		SE-CR		EZ-TI	
	LL	S	LI	S	LI	S	LI	S
<b>Familia: Acaulosporaceae</b>								
<i>Acaulospora denticulata</i> Sieverd. & S. Toro		+						
<i>Acaulospora foveata</i> Trappe & Janos	+							
<i>Acaulospora laevis</i> Gerd. & Trappe								+
<i>Acaulospora rehmii</i> Sieverd. & S. Toro		+						
<i>Acaulospora mellea</i> Spain & N.C. Schenck					+	+	+	
<i>Acaulospora reducta</i> Oehl, B.T. Goto & C.M.R. Pereira					+			
<i>Acaulospora scrobiculata</i> Trappe	+	+		+				+
<i>Acaulospora</i> sp. 1			+				+	
<i>Acaulospora</i> sp. 4					+			
<b>Familia: Claroideoglomeraceae</b>								
<i>Claroideoglopus claroideum</i> C. Walker & Schuessler								+
<i>Claroideoglopus etunicatum</i> C. Walker & Schuessler		+	+	+		+	+	
<b>Familia: Glomeraceae</b>								
<i>Funneliformis geosporus</i> C. Walker & Schuessler	+	+	+	+		+	+	+
<i>Funneliformis verruculosus</i> C. Walker & Schuessler				+				
<i>Funneliformis mosseae</i> C. Walker & Schuessler		+		+				
<i>Rhizophagus intraradices</i> C. Walker & Schuessler		+		+				
<i>Glomus spinuliferum</i> Sieverd. & Oehl	+	+						
<i>Septoglopus constrictum</i> Sieverd., G. A. Silva & Oehl								+
<b>Familia: Gigasporaceae</b>								
<i>Gigaspora candida</i> Bhattacharjee, Mukerji, J.P. Tewari & S				+				

MG-CR: Montecristo de Guerrero-Costa rica 95; LF-TI: Laguna del Cofre-Típica; SE-CR: Santa Elena-Costa rica 95; EZ-TI: Emiliano Zapata-Típica; LI: Epoca de lluvia; S: Epoca de seca; +: Presencia de la especie de HMA.

### 4.3 Composición biológica de los consorcios nativos de los HMA

#### 4.3.1 Riqueza de especies de HMA asociados a los consorcios Tip y Cr95.

Se identificaron 10 especies de HMA en los cultivos trampas, conformados en 6 géneros de HMA (Cuadro 6), resultados muy distintos a los obtenidos por Medina (2017), quien reportó que, directamente de campo (cafetales), identificó 21 morfotipos correspondiente a especies de *Glomus* y de *Acaulospora*.

Cuadro 6. Especies de HMA encontradas en los consorcios de café en condiciones de vivero.

Espece de HMA	Consortio Tip	Consortio Cr95
Familia: Acaulosporaceae		
<i>Acaulospora denticulata</i> Sieverd. & S. Toro		+
<i>Acaulospora rehmi</i> Sieverd. & S. Toro		+
<i>Acaulospora scrobiculata</i> Trappe	+	+
Familia: Claroideoglomeraceae		
<i>Claroideoglomus etunicatum</i> C. Walker & Schuessler	+	+
Familia: Glomeraceae		
<i>Funneliformis geosporus</i> C. Walker & Schuessler	+	+
<i>Funneliformis verruculosus</i> C. Walker & Schuessler	+	
<i>Funneliformis mosseae</i> C. Walker & Schuessler	+	+
<i>Rhizophagus intraradices</i> C. Walker & Schuessler	+	+
<i>Glomus spinuliferum</i> Sieverd. & Oehl		+
Familia: Gigasporaceae		
<i>Gigaspora candida</i> Bhattacharjee, Mukerji, J.P. Tewari & Skoropad	+	

\*Consortio TIP: Se obtuvo del sitio LF-TI: Laguna del Cofre-Típica en época de seca

\*Consortio CR95: Se obtuvo del sitio MG-CR: Montecristo de Guerrero-Costa Rica 95 en época de seca

En esta investigación los HMA se agruparon en dos consorcios y al estar integrados por una mezcla de especies de HMA, tienen la posibilidad de complementar los requerimientos de su planta hospedera, dado que ésta tiene varias posibilidades para elegir al HMA con la que pueda realizar la mayor eficiencia simbiótica (Quiñones *et al.*, 2019).

La especie *Rhizophagus intraradices* fue la que se encontró con mayor número de esporas en ambos consorcios (Consortio Tip y Consortio Cr95), esto coincide parcialmente con los datos obtenidos por Hernández *et al.* (2020), quienes mencionan que el cultivo del café se asocia principalmente con una especie de *Rhizophagus*, *R. irregularis*. Se consideró la utilización de consorcios conformados por diversas especies ya que pueden competir eficientemente y asegurar el éxito de la inoculación en campo y representan una ventaja funcional sobre las plantas inoculadas (Del Águila., 2018). Además, los HMA nativos presentan mayor adaptación a condiciones edafoclimáticas específicas en donde serán introducidos (Trejo *et al.*, 2011).

#### 4.3.2 Conteo de esporas de los consorcios de HMA nativos

En la (Figura 12), se puede observar que el mayor número de esporas de los cafetales convencionales está en la zona de La Concordia, sin embargo, se tomó la decisión de usar los consorcios de la zona del Mpio. de Montecristo de Guerrero, Chiapas, tanto para los consorcios orgánicos y convencionales, para comparar la eficiencia de los HMA de la misma zona productiva.

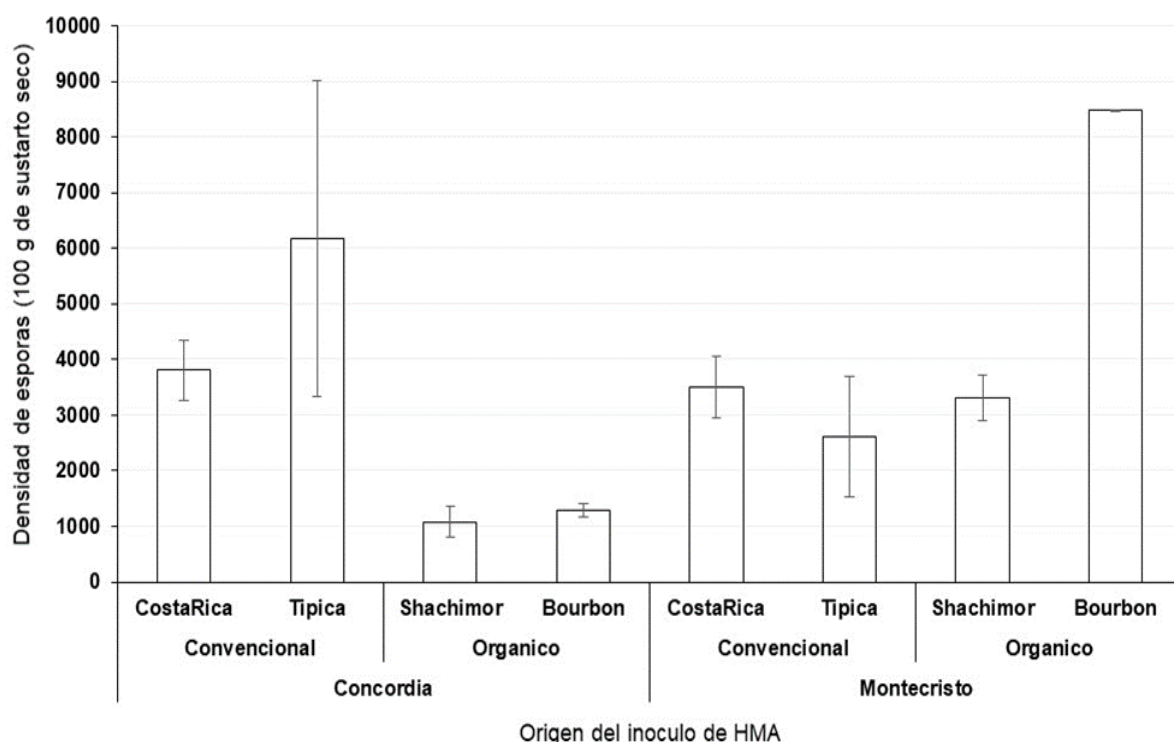


Figura 12. Densidad de esporas de HMA propagados, en maceta trampa bajo condiciones de invernadero. Las barras en los rectángulos indican  $\pm$  el error estándar.

De la variedad Típica se obtuvo el Consorcio Tip, con una concentración de 25 esporas  $g^{-1}$  de sustrato y de la variedad Costa Rica 95 se obtuvo el Consorcio Cr95, con una concentración de 33 esporas  $g^{-1}$  de sustrato, ambos de cafetales convencionales del municipio de Montecristo de Guerrero, Chiapas. Estos resultados indican que las esporas nativas propagadas en las macetas trampa lograron buenos resultados, ya que Usuga *et al.* (2008) multiplicó HMA nativas del cultivo de Banano y en las macetas trampa obtuvo 28 esporas  $g^{-1}$  de sustrato y con un inóculo comercial obtuvo 30 esporas  $g^{-1}$  de sustrato. Esquivel (2020), multiplicó HMA de inóculos provenientes de ecosistemas naturales obteniendo de 19 a 43 esporas  $g^{-1}$  de sustrato en las macetas trampa.

En la (Figura 12) se observa la comparación del contenido de esporas de inóculos provenientes de cafetales orgánicos y convencionales, para el sitio Montecristo se nota una disminución de esporas de inóculos de cafetales convencionales, posiblemente se debe al uso de agroquímicos ya que tiene efectos adversos, en la acción biológica de los HMA y en la abundancia de las esporas porque dependiendo del suelo y del cultivo, puede haber un efecto estimulador, depresivo o no significativo sobre el hongo (Barrer, 2009), esto mismo lo confirma Pérez *et al.* (2012) quienes mencionan que un sistema de producción intensivo (monocultivo y uso de insumos químicos), se encontraron baja diversidad y esporulación de los HMA, comparada con parcelas donde se hizo rotación de cultivos y aplicación moderada de insumos.

Sin embargo, no ha sido bien documentado el efecto que los herbicidas sobre la actividad de los HMA en el suelo, aunque, dada la naturaleza biológica de los productos basados en estos hongos no se recomienda hacer aplicaciones de herbicidas sobre la aplicación de HMA nativos o comerciales (Barrer, 2009). Por su parte Cornejo (2006), argumenta que se ha evidenciado que no todas las especies de HMA colonizan y esporulan con la misma intensidad.

Sin embargo, los beneficios y los efectos simbióticos que proveen los HMA, puede ser similares aun cuando estos microorganismos procedan de agroecosistemas con diferentes manejos agronómicos (Trejo *et al.*, 2011). Ejemplo de ello se tiene con la especie *Glomus iranicum var tenuihypharum*, hongo formador de micorrizas patentado por la empresa Symborg<sup>®</sup>, ha demostrado su eficacia con incrementos entre 8 % y 20

% en los rendimientos de los cultivos de arándano, fresa, mora y frambuesa y fue identificado de cultivos de fresa convencional (Nicolas *et al.*, 2013). Por este motivo en esta investigación se evaluó los HMA, provenientes de cafetales convencionales.

#### **4.4 Evaluación de los efectos de los HMA en las variables vegetativas**

##### **4.4.1 Altura, diámetro y número de hojas de las plantas de café**

El análisis estadístico, mostró un efecto altamente significativo, en la comparación de medias con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), para las variables altura de las plantas, diámetro y número de hojas en las plantas de café a los 150 días de establecimiento en vivero (Cuadro 7). Los mejores tratamientos fueron; Cr.Tip.Sr.; Tc.Tip.Sr.; Tc.Fm.Sr. y Cr.Cr95.Sr., obtuvieron el mayor crecimiento de la altura de las plantas, diámetro del tallo y mayor número de hojas en el (Cuadro7), se detalla los datos numéricos.

Los tratamientos con menor respuesta fueron los testigos: Tc.Shma.Cr., Cr.Shma.Cr., Tc.Shma.Sr. y Cr.Shma.Sr. obteniendo 13 cm, 1.5 mm, 9 hojas para Tc.Shma.Cr.; 13 cm, 1.8 mm, 9.1 hojas en Cr.Shma.Cr.; 13.5 cm, 2 mm, 12.8 hojas para Tc.Shma.Sr. y 13.6 cm, 2 mm, 12 hojas en Cr.Shma.Sr. Por lo tanto, se puede indicar que los mejores tratamientos fueron los inoculados con HMA (Cuadro 7).

Al comparar el crecimiento vegetativo de las plantas inoculadas sin roya entre el mejor y el menor (Cr.Tip.Sr y Cr.Shma.Sr.), se puede observar que los HMA aumentaron 289% en la altura, 200% en el diámetro del tallo y 152% en número de hojas de las plantas. Los resultados de esta investigación fueron muy similares a los obtenidos por Trejo *et al.* (2018), quienes utilizaron consorcios nativos en la variedad Garnica, después de los 240 DDI, evaluaron los mismos parámetros en las plantas sin HMA crecieron 8 cm de alto, 4.64 mm de diámetro y 20 hojas, las del mejor consorcio de HMA obtuvo 36 cm, 6.75 mm y 60 hojas aumentando 450 % el crecimiento de la planta.

De la misma manera Sandoval (2019), evaluó la variedad Pache y a los 210 DDI encontró que las plantas inoculadas con HMA nativos crecieron 30.5 cm, 7.9 mm y 30 hojas y las plantas sin HMA solo crecieron 14.5 cm, 4.15 mm y 14 hojas, es decir, hubo un aumento del 213% en la altura, 190% en el diámetro del tallo y 209% en el número de hojas. Sánchez (2000), reportó también incrementos de 149% en la altura de las plantas, 125% diámetro del tallo y al comparar el número de hojas no encontró

diferencias significativas entre plantas micorrizadas y no inoculadas. Romeo (2019), confirmo los efectos benéficos de los HMA, ya que reportó un incremento de la altura de las plantas del 133% y un incremento del 110% en el número hojas en comparadas con el testigo sin HMA, después de los 180 DDI.

Cuadro 7. Efecto de la aplicación de HMA en el crecimiento de las plantas de café con los distinto tratamientos en condiciones de vivero a los 150 días después de la inoculación (DDI) con los hongos.

No	Tratamiento	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Número de hojas
1	Cr.Cr95.Cr.	32bc	3.8b	17.6c
2	Cr.Cr95.Sr.	36.7bcd	3.9b	20c
3	Cr.Fm.Cr.	30bc	3.8b	18.3c
4	Cr.Fm.Sr.	29.2bc	3.5b	19c
5	Cr.Shma.Cr.	13a	1.8a	9.1 <sup>a</sup>
6	Cr.Shma.Sr.	13.6a	2a	12 <sup>a</sup>
7	Cr.Tip.Cr.	31bc	3.8b	19.2c
8	Cr.Tip.Sr.	39.1d	4b	19.5c
9	Tc.Cr95.Cr.	29.8bc	3.5b	16.1bc
10	Tc.Cr95.Sr.	34.5bcd	3.5b	19c
11	Tc.Fm.Cr.	33bcd	3.6b	17.5c
12	Tc.Fm.Sr.	37.5bcd	4b	19.2c
13	Tc.Shma.Cr.	13a	1.5a	9 <sup>a</sup>
14	Tc.Shma.Sr.	13.5a	2a	12.8ab
15	Tc.Tip.Cr.	31.8bcd	3.9b	17.6c
16	Tc.Tip.Sr.	39d	4b	19.6c

\*Letras distintas indican diferencias significativas, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

Los resultados de esta investigación a los 150 DDI las plantas alcanzaron más de 39 cm., al comparar los datos de esta investigación, fueron muy similares a los obtenidos por Saboya (2018), inoculo con HMA a plantas de la variedad Caturra y crecieron 30.07 cm, Vallejos *et al.* (2019)., después de los 295 DDI, reporto 36.75 cm en la altura de las plantas y datos más recientes por Douglas, (2020), reporto a los 75 DDI un crecimiento con los HMA 6.98 cm y muy superiores a los obtenidos por Hernández *et al.* (2020), ya que reporto un crecimiento de las plantas de 6 cm en 335 DDI.

En el Cuadro 7, podemos observar que no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (variedad + HMA + con roya) y (variedad + HMA - sin roya), en la comparación de medias con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), cuando se aplicó el patógeno en las plantas de café en ambas variedades, disminuyendo 1.94 hojas, esto se debe a que los HMA, desarrollan mecanismos de supervivencia, los cuales pueden ser capaces de incrementar la cantidad esporas al estar amenazados por los suministros de carbono por parte de la planta otorgando directamente bioprotección (Reyes *et al.*, 2016). Un aumento en los niveles de ácido jasmónico en tejidos, cuyo efecto genera rápido crecimiento y respuesta de defensa en la planta, estas evidencias son indirectas, porque en esta investigación no se evaluaron los niveles de ácido jasmónico ni otro metabolito indicador de resistencia.

Estas investigaciones confirman que las plantas de café son altamente micotróficas (López *et al.*, 2015), los efectos positivos de los HMA se evidencian también como incremento en el diámetro de tallo, índice de vigor, concentración de fósforo, incrementan la eficiencia y la utilización de elementos pocos móviles, fundamentalmente el fósforo, zinc, azufre, calcio, molibdeno y boro (Molina *et al.*, 2005), por lo que se recomienda el uso de HMA para reducir la fertilización de fósforo inorgánico en plantas de interés económico (Vital *et al.*, 2020). Por lo que la utilización de los HMA, deben de considerarse dentro de la utilización para la producción masiva de plantas a nivel vivero (Acosta, 2019).

Por lo tanto, ha cobrado gran importancia el estudio de técnicas para aislar y evaluar el rendimiento de estos microorganismos con el fin de aplicarlos al suelo como biofertilizantes, ya que constituyen una alternativa para la solución de problemas de propagación, aclimatación y nutrición, al reducir los costos de producción y permitir sistemas más eficientes y sostenibles (Pérez *et al.*, 2015). La producción de esporas de HMA en macetas trampas son una alternativa biológica de bajo costo, y amigable al medio ambiente que puede contribuir al éxito de la renovación de plantaciones para la producción de plantas de café en vivero (Cuervo y Rivas, 2007).

En la (Figura 13), se comparó por factor (variedad de café, nivel de micorrización y aplicación de roya del café), ambas variedades, presentaron el mismo crecimiento de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) y las plantas sin HMA dejaron de crecer



22.35 cm comparadas con el mejor tratamiento que fue el Consorcio Tip. La variedad Típica es un arbusto que puede alcanzar 4 m de altura por lo que se le tipifica como variedad de porte alto (Anacafé, 2016), mientras que la variedad Costa Rica 95 es considerada un cultivar de porte bajo (Julca *et al.*, 2018), aunque otros autores mencionan que esta variedad es de porte mediano resistente a la roya del café (IICA, 2019). En los resultados de esta investigación las plantas en ambas variedades no mostraron diferencias estadísticamente significativas, por lo cual se puede indicar que la variedad Costa Rica 95, logro una altura similar a la variedad Típica a pesar de que la variedad Costa Rica 95 es de porte mediano.

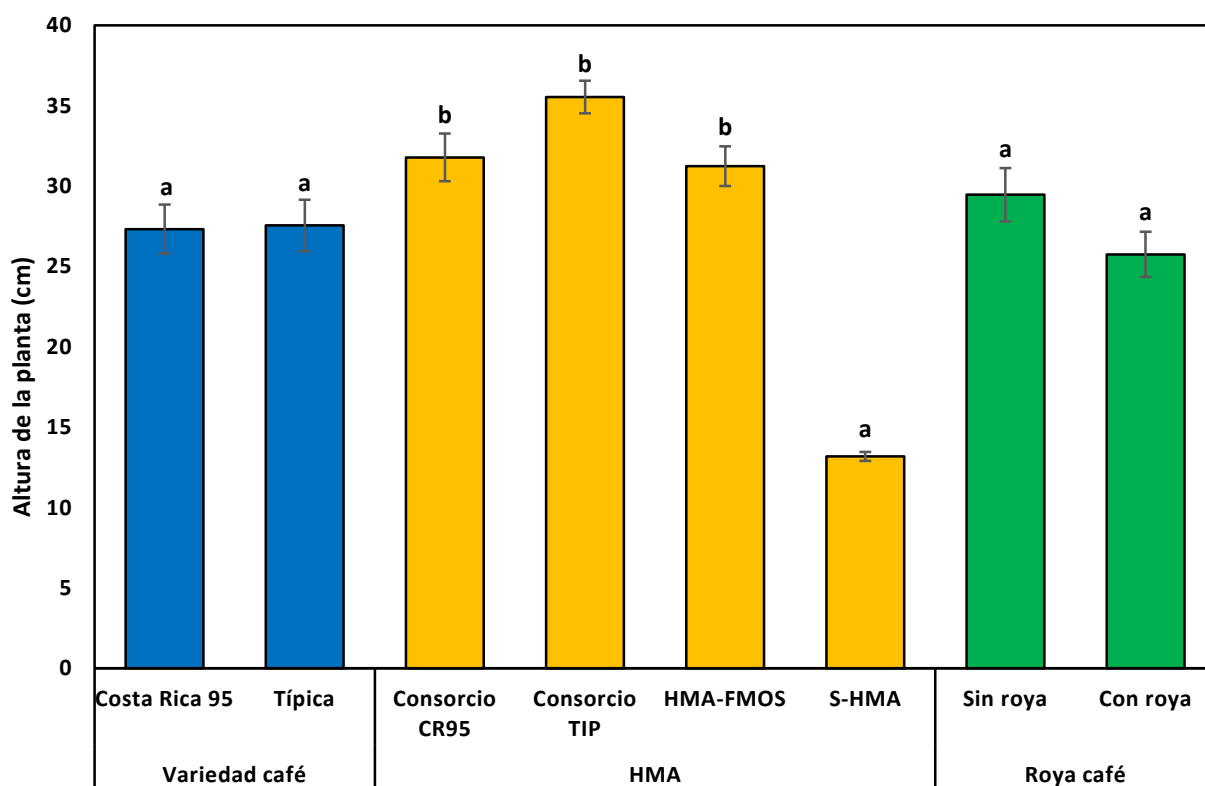


Figura 13. Efecto de los HMA en la altura de la planta por factores de estudio (variedad de café, HMA y Roya del café) en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio  $\pm$  el error estándar. Letras diferentes en cada factor de estudio indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

Por lo tanto, evaluar la altura es un indicador importante, que ayuda a determinar el ritmo del crecimiento de la planta (Sandoval, 2019). Saboya (2018), mencionó que las plantas de café micorrizadas generan mayor crecimiento, desarrollo vegetativo y adaptación al medio donde se establecerán y mejoran el reciclado y absorción de nutrientes que las plantas no pueden alcanzar, como se puede ver al comparar las

plantas sin HMA, solo lograron crecer 13 cm, y con el consorcio Tip 35.5 cm en un periodo de 5 meses.



Figura 14. Crecimiento de las variedades de café Típica y Costa Rica 95 sin roya en condiciones de vivero a los 150 DDI. La escala del centro de la figura está en cm.

En la (Figura 14), se muestran todas las plantas de café de los diferentes tratamientos, a las que no se les aplicaron fertilizantes convencionales granulados ni foliares, ni hormonas de crecimiento y las plantas que fueron inoculadas con HMA alcanzaron una altura superior a 30 cm, en un periodo de 5 meses, altura perfecta para llevarlas al establecimiento en campo, lo que demuestra la conveniencia de utilizar los HMA en las variedades Costa Rica 95 y Típica, demostrando la eficiencia de los HMA y tomando en consideración como una opción viable para contrarrestar con los problemas del incremento de los precios de los fertilizantes (52.05 %), coadyuvante (45.71 %), fungicidas (44.14 %), e insecticidas (43.75 %), lo que se traduce en menos rentabilidad (Vásconez, 2021).

Hoy la agricultura convencional ha fracasado, ya que no es rentable económica ni ecológicamente (Pastrán, 2021). En el último registro de los precios de los fertilizantes nitrogenados la urea (46-00-00), ha incrementado más del 69 % (Vásconez, 2021). Y para este cultivo es uno de los fertilizantes más utilizados, Paramo y Medina, (2018),

mencionaron que México es el undécimo productor de café y del total generado en territorio nacional, las dos quintas partes provienen de Chiapas y Veracruz. Además, es preciso mencionar que el pequeño cafetalero, siempre busca la manera de preservar el ecosistema, pero a la falta de tecnologías como éstas, ha llevado a la destrucción de la naturaleza (Flores *et al.*, 2010).

#### **4.4.2 Nivel de severidad de la roya del café *Hemileia vastatrix* en las variedades Típica y Costa Rica 95.**

En la (Figura 15), se presentan todos los tratamientos que fueron inoculados con roya y el efecto de los HMA como bioprotectores ante este patógeno; lo cual presentaron diferencias significativas según Tukey ( $p \leq 0.05$ ), entre los tratamientos; la variedad Costa Rica 95 resistente a la roya, al comparar los tratamientos Cr.Shma.Cr. (4-60 %) y el tratamiento Cr.Fm.Cr. (2.3- 16 %), la severidad de la roya disminuyó 24 % equivalente a 1.7 de severidad en la variedad Típica susceptible a la roya; al comparar los tratamientos Tc.Shma.Cr. (4- 60 %) y Tc.Tip.Cr. (3.1- 32 %), la severidad disminuyó 8 % equivalente a 0.9 de severidad, sin diferencias significativas según Tukey ( $p \leq 0.05$ ), para poder determinar la severidad y el porcentaje de daño, se usó la clasificación de SENASICA (2016).

Al comparar estos resultados con los de Saboya (2018), reportó mejores efectos de bioprotección, ya que los resultados mostraron diferencias altamente significativas Tukey ( $p \leq 0.05$ ), en la severidad de la roya en las plantas sin HMA obtuvo 34.72 % y con el mejor consorcio de HMA 0.44 % de severidad, inoculados en la variedad caturra que es muy susceptible a la roya.

No obstante, cabe resaltar que mientras que en esta investigación solo inoculamos 200 esporas de HMA por planta y se infectó 1mL de una suspensión de  $10^5$  esporas /  $\text{mL}^{-1}$  de esporas de roya se obtuvieron efectos de bioprotección, pero menores que los registrados por Saboya, (2018) quien aplicó 1,500 esporas de hongos micorrizicos arbusculares por planta e infecto con roya a una concentración de  $2 \times 10^5$  conidias/ml. Por otro lado, Romero (2019), inoculó plantas de café de la variedad Típica “variedad altamente susceptible a roya”, aplicando 1500 esporas de HMA, e infecto de manera natural con *Hemileia vastatrix* a las plantas de café, a los 2 meses de haber aplicado

la enfermedad se compararon los resultados con el testigo (sin HMA) y no presentaron diferencias significativas según Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

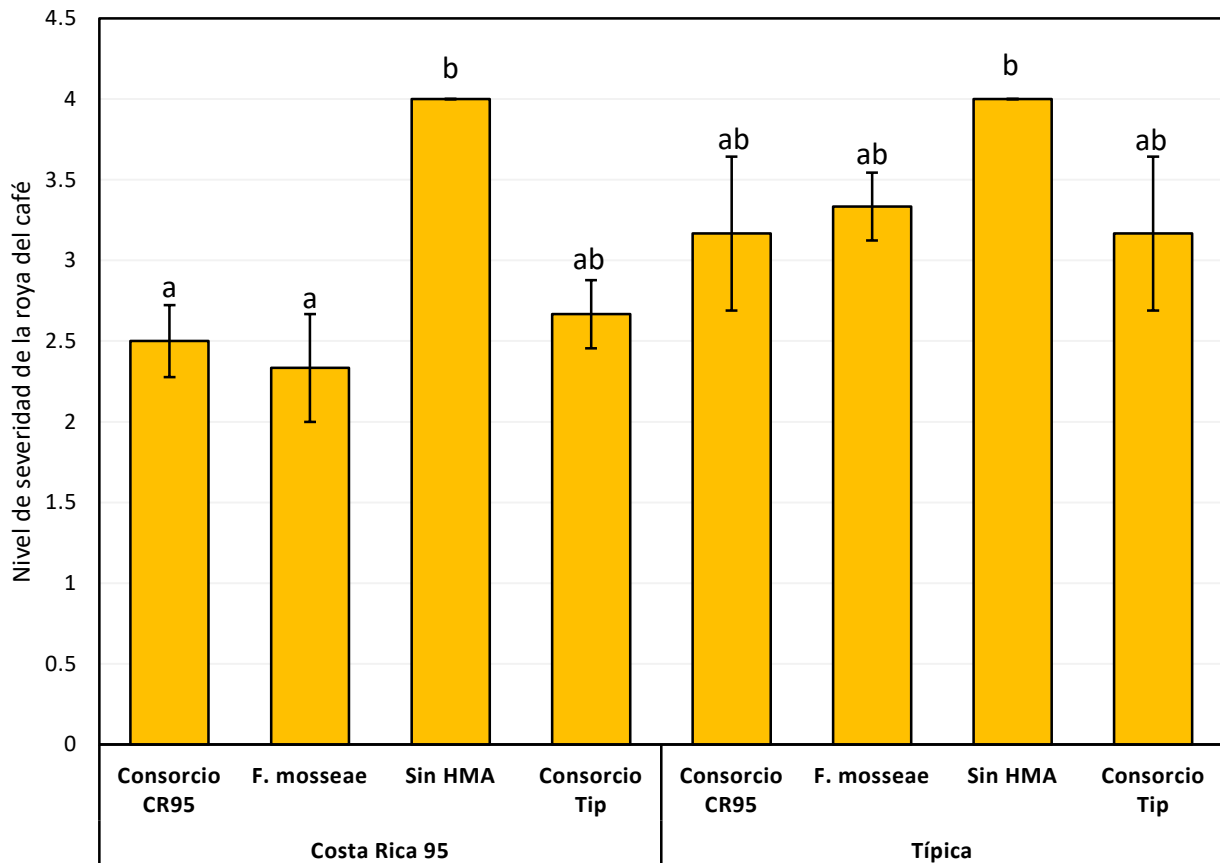


Figura 15. Efecto bioprotector de los HMA ante la roya *Hemileia vastatrix* en plantas de café de la variedad Típica y Costa Rica 95 en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio  $\pm$  el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

De todos los tratamientos de micorrización cuando se utilizó la especie de HMA *Funneliformis mosseae*, con la variedad Costa Rica 95, las plantas presentaron los niveles de severidad más bajos de todos los tratamientos. Esto se debe a que esta especie tiene efectos de bioprotección (Ruscitti *et al.*, 2019). Grosso (2020), inoculó con *F. mosseae* plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*), aplicando la enfermedad del nematodo *Nacobbus aberrans*, después de los 70 DDI, evaluó la enfermedad y encontró que disminuyó el 50 % de la severidad de la enfermedad comparado con las plantas sin HMA, en este mismo cultivo, encontraron incrementos del 115 % en el peso seco de la raíz y 114 % en el peso del fruto (Feng *et al.*, 2021).

*Funneliformis mosseae*, ha demostrado ser un poderoso biofertilizante, ya que al inocular plantas de *Capsicum frutescens* L. a los 55 DDI, alcanzaron un aumento del 178 % del área foliar, 330 % biomasa seca de parte aérea y 139 % de altura de la planta comparadas con plantas sin HMA (Jiménez *et al.*, 2017).

Los HMA han demostrado controlar otras enfermedades foliares, tales como las que reportaron Guzmán y Rivillas (2007) quienes inocularon con HMA (*G. manihotis* y *G. fasciculatum*) a plantas de café de la variedad Caturra; 60 días después de haber inoculado los HMA se inoculó *C. coffeicola* que produce la enfermedad mancha de hierro; en la evaluación las plantas micorrizadas presentaron menores tasas de desarrollo de la enfermedad en relación con los testigos sin HMA, la severidad fue de 67.37 % con los HMA, mientras que en el testigo (sin HMA) fue del 100 %. Colmenares y Pineda (2006), evaluaron los HMA en plantas la variedad Catuai, infestadas de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.) las plantas fueron inoculadas al momento del trasplante en campo y a los 20 días de su establecimiento aplicaron el patógeno; encontrando índices de infestación de 46.10 % en plantas sin HMA y de 12.57 % en plantas micorrizadas (diferencias significativas según Tukey ( $p \leq 0.05$ )).

Los HMA en el cultivo del café no solo controlan enfermedades foliares, sino también enfermedades radiculares, Trejo *et al.* (2018) aplicaron una suspensión de 1500 nematodos en estadios juveniles, a los 30 días las plantas de café micorrizadas con nematodos tuvieron un desarrollo radicular similar al de las plantas sanas (sin nematodos), demostrado en el peso seco de las plantas sin diferencias significativas; después de los siete meses, de iniciado el experimento, no se encontró presencia de nematodos en las plantas.

Lograr controlar la roya del café, en plantaciones en producción de variedades tradicionales del estado de Chiapas, con los HMA, sería una gran aportación científica y de solución, ya que, en México, la producción de café fue seriamente afectado por este patógeno, por lo que se necesita más investigaciones de comunidades de HMA diversa y selectiva en las plantaciones de café que pueden ayudar a amortiguar los impactos negativos de estos eventos (Vallegos *et al.*, 2019).

En la (Figura 16), se observa que las plantas de la variedad Costa Rica 95 presentan menor daño por roya que las de la variedad Típica, pero al observar las plantas sin

HMA de ambas variedades, las plantas están cloróticas, pequeñas y defoliadas en su totalidad, y los efectos de los HMA se hacen más notorios. Avelino y Rivas (2013), mencionan que *Hemileia vastatrix* tiene las características de una especie con gran potencial evolutivo o alta capacidad de mutación, aumentado su agresividad con el paso del tiempo. La pérdida de resistencia a la roya en variedades de café resistentes, se pierde en promedio a los 18 años, la resistencia a la roya no es permanente en las variedades mejoradas de café y la permanencia no es predecible ya que depende de la interacción entre el hongo, el clima y la planta, a lo largo del tiempo (Morales, 2019).



Figura 16. Nivel de severidad de la roya en las variedades de café Típica y Costa Rica 95 con roya en condiciones de vivero a los 150 DDI. La escala del centro de la figura está en cm.

En el 2012 se establecieron vivero tecnificados para producir y distribuir variedades resistentes a este patógeno en el estado de Chiapas, ya que ha provocado una reducción en la producción de más de 50 % entre 2012 y 2016 (Henderson, 2019). Por lo que a partir del 2030 se esperan grandes pérdidas económicas provocadas por la roya del café en variedades como Costa Rica 95, Sarchimor, Oro Azteca, Marcellesa, Catimor y Colombia.

Actualmente en regiones cafetaleras como la Frailesca y la Sierra Mariscal del estado de Chiapas, se han identificado plantaciones de la variedad Costa Rica 95, infestadas

con roya en más del 60 % de las hojas, ocasionando pérdidas económicas al productor por su baja producción, datos que coinciden con los reportados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2019), por lo que han considerado que la introducción de la variedad Costa Rica 95 es una mala decisión para la renovación de cafetales en Colombia y mencionan que el mismo Instituto del café de Costa Rica (ICAFFE), no recomienda la reproducción de esta variedad.

La utilización de los HMA en un plan estratégico para desarrollar tecnologías complementarias para controlar la roya es una opción muy viable (Del Aguilar *et al.*, 2018). A través de esta investigación se puede comparar los efectos de consorcios de HMA nativos del café y de un inóculo mono especie, pero no existen diferencias significativas en la bioprotección contra este patógeno de acuerdo con el tipo de inóculo, probablemente debido a que las plantas de café son altamente micotróficas (Adriano *et al.*, 2011).

Sin embargo es necesario realizar estudios más especializados en las plantas de café, sobre las rutas metabólicas y metabolitos que promueven la resistencia a este patógeno, ya que los HMA activan hormonas como el ácido jasmónico y el etileno que conllevan a la síntesis de sustancias tóxicas para los fitopatógenos, como fitoalexinas, flavonoides, isoflavonoides, lignina y estilbenos que son metabolitos secundarios con propiedades antimicrobianas, producidos por las plantas en respuesta de una infección, daño mecánico o a estrés que derivan de la ruta biosintética de los fenilpropanoides (García y Pérez, 2003).

#### **4.4.3 Porcentaje de la incidencia de la roya *Hemileia vastatrix* en las plantas de café**

El porcentaje de la incidencia de la roya en las plantas de café, fue mayor en los tratamientos sin HMA, mostraron diferencias significativas Tukey ( $p \leq 0.05$ ), en la variedad Costa Rica 95, el tratamiento Cr.Shma.Cr. obtuvo 63.2 % comparado con el tratamiento Cr.Cr95.Cr. que obtuvo 40.9 %, disminuyendo 22.3 % de la incidencia, en la variedad Típica el tratamiento Tc.Shma.Cr. alcanzó el 64.1 % y el tratamiento Tc.Tip.Cr. 41.1 % disminuyendo el 23 % en la incidencia. Por lo tanto, los consorcios Cr95 y *F. mosseae* en la variedad Costa Rica 95 y el consorcio Tip en la variedad

Típica lograron generar un efecto bioprotector en las plantas de café con diferencias estadísticas (Figura 17).

Los resultados de esta investigación fueron mejores a los que reporto Romero (2019), ya que no presentaron diferencias significativas según Tukey ( $p \leq 0.05$ ), entre el testigo y los consorcios, el testigo obtuvo 53.3 % y los consorcios; Moyobamba 59.9 %, El Dorado 65.1 % y el Huallaga 72 %, por lo que la aplicación de los HMA presentó menor efecto de bioprotección. Sin embargo, Saboya, (2018); reportó mejores resultados, mostrando diferencias altamente significativas (Tukey  $p \leq 0.05$ ). únicamente con el testigo (sin HMA), los resultados indicaron que los mejores consorcios de HMA fueron: Huallaga (26.52 %), Rioja (27.97 %), El dorado (30.03 %), Lamas (33.23 %) y el testigo (con roya y sin HMA) (52.61 %), es decir disminuyo 26.09 % la incidencia de la roya en plantas micorrizadas.

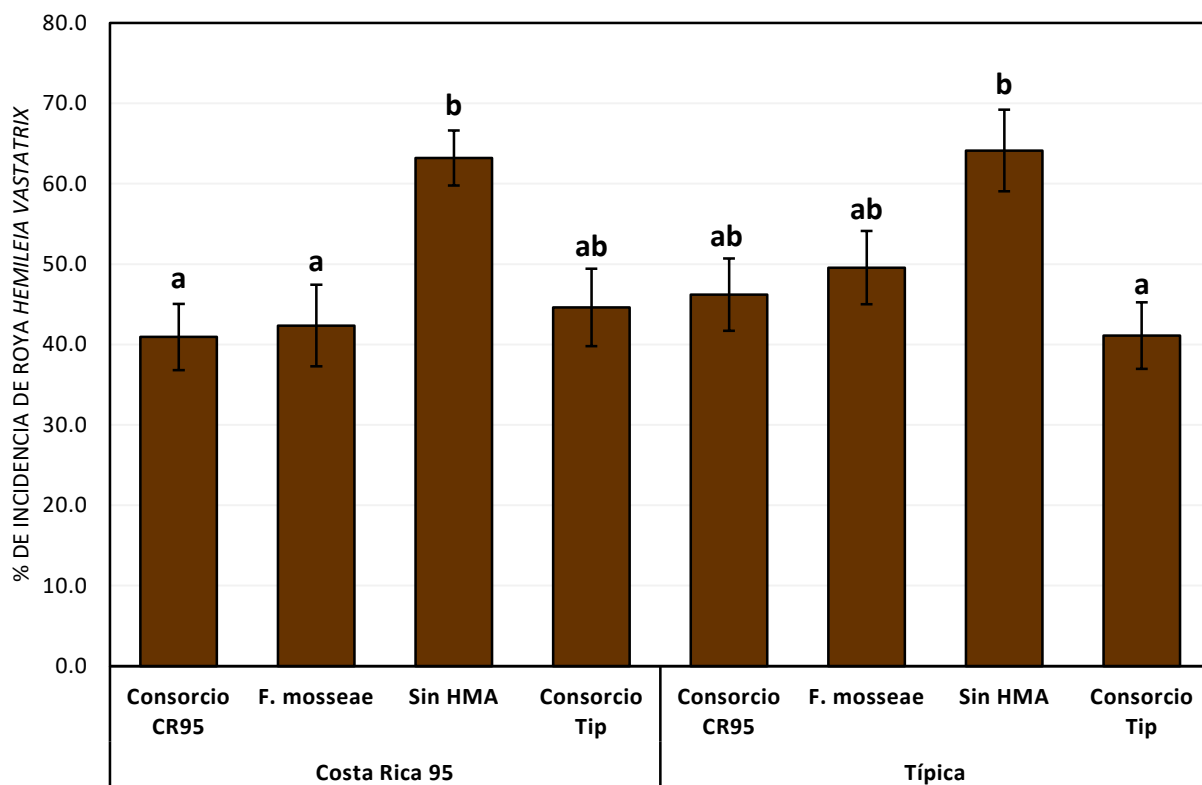


Figura 17. Efecto bioprotector de los HMA en la incidencia de la roya en las plantas de café (*Coffea arabica*) en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio  $\pm$  el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ).



La reducción del porcentaje de la incidencia de la roya, que se obtuvo en esta investigación, puede deberse al reconocimiento de los fitopatógenos en la planta y los HMA activaron mecanismos de defensa, como la activación de la enzima  $\beta$  1,3 glucanasa esta enzima, participa en la degradación de las paredes celulares de los hongos fitopatógenos debido a la presencia de  $\beta$  1,3 glucanos, lo que permite este reconocimiento entre la planta y los hongos micorrízicos cuando llega una enfermedad (Pérez *et al.*, 2015). Con la ayuda de los HMA, se puede realizar un plan de renovación de cafetales con variedades tradicionales selectivas que se ha mostrado resistencia a la roya, a través de un banco de germoplasma. Del Aguilar *et al.* (2018), proponen que para establecer la simbiosis entre los HMA y las plantas de café debe ser en estado vegetativo inicial y tendrá un mejor aprovechamiento de nutrientes y un ahorro económico en fertilizantes químicos.



Figura 18. Aspectos del área foliar de plantas de café Var. Típica con roya y en los distintos tratamientos con los HMA (control sin HMA).

En las (Figuras 18 y 19), se observa claramente el efecto de los HMA en la bioprotección de las hojas de las plantas de la variedad Típica y Costa Rica 95. Las hojas de las plantas sin HMA, se presentan todas cloróticas por la falta de nutrientes, pequeñas, en menor cantidad y con altos niveles de severidad por roya. Con base en los resultados en esta investigación otro de los efectos positivos de los HMA, pueden ser debido a que los HMA, crean una barrera a los fitopatógenos, en el cual las hifas

crecen hacia afuera y hacia adentro de la raíz, esta red puede sintetizar compuestos como el diatretinenitrilo, con efectos antibióticos, para tolerar enfermedades no solo de las raíces si no también foliares (Buelvas y Peñates, 2008).



Figura 19. Aspecto del área foliar de plantas de café Var. Costa Rica 95 con roya y en los distintos tratamientos con los HMA (control sin HMA).

#### 4.4.4 Longitud de la raíz, peso seco de la raíz y volumen radical de las plantas de café

Dentro de las variables que se midieron se consideraron las del sistema radical; en el Cuadro 8, se puede observar que los mejores tratamientos fueron; Tc.Tip.Cr., Tc.Cr95.Sr., Tc.Fm.Cr. y Cr.Fm.Sr., obteniendo los mejores efectos en la longitud de las raíces, peso seco de la raíz y volumen radical con 28 cm, 4.3 g, 7.7 cm<sup>3</sup>; 27.5, 7.7g, 9.7cm<sup>3</sup>; 27.5 cm, 4.2 g, 6.3cm<sup>3</sup> y 27 cm, 5 g, 6.8 cm<sup>3</sup> respectivamente, sin diferencias significativas entre sí. Los tratamientos con menores resultados fueron; Cr.Shma.Cr., Tc.Shma.Cr. y Cr.Shma.Sr., obteniendo 15.2 cm, 1 g, 1.7 cm<sup>3</sup>; 17 cm, 1 g, 2.2 cm<sup>3</sup> y 19 cm, 1.2 g, 2.2 cm<sup>3</sup> respectivamente. Por lo que tuvo un efecto altamente significativo, con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Entre el tratamiento Tc.Tip.Cr. y Cr.Shma.Cr., presentaron aumento del 184 % longitud de la raíz, 430 % en el peso de la raíz y 452 % en el volumen de la raíz (Cuadro 8).

Cuadro 8. Desarrollo del sistema radical de las plantas de café por efecto de los HMA con y sin roya en condiciones de vivero a los 150 días después de la inoculación con las micorrizas.

No	Tramientos	Longitud de la raíz (cm)	Peso seco de la raíz (g)	Volumen de la raíz (cm <sup>3</sup> )
1	Cr.Cr95.Cr.	25ab	5.2bcd	7.8c
2	Cr.Cr95.Sr.	25ab	6.2cd	8.2c
3	Cr.Fm.Cr.	25ab	3.3abc	6.7c
4	Cr.Fm.Sr.	27a	5.0abcd	6.8c
5	Cr.Shma.Cr.	15.2b	1.0a	1.7 <sup>a</sup>
6	Cr.Shma.Sr.	19ab	1.2a	2.2ab
7	Cr.Tip.Cr.	23.7ab	5.5abcd	9.3c
8	Cr.Tip.Sr.	26ab	6.7cd	7.8c
9	Tc.Cr95.Cr.	25ab	4.2abcd	6.7c
10	Tc.Cr95.Sr.	27.5a	7.7d	9.7c
11	Tc.Fm.Cr.	27.5ab	4.2abcd	6.3bc
12	Tc.Fm.Sr.	26.5a	6.0cd	8.8c
13	Tc.Shma.Cr.	17ab	1.0a	2.2ab
14	Tc.Shma.Sr.	21ab	1.0a	2.3ab
15	Tc.Tip.Cr.	28a	4.3abcd	7.7c
16	Tc.Tip.Sr.	26a	6.8cd	10.2c

\*Letras distintas indican diferencias significativas, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

Los resultados de esta investigación fueron muy similares a los obtenidos por Douglass, (2020), quien inoculó HMA a plantas de café de la variedad Catuai y después de los 75 DDI, evaluó el crecimiento, las plantas sin HMA lograron 8.22 cm de la longitud de la raíz y 0.12 g y las plantas inoculadas con HMA alcanzaron 11.55 cm y 0.21 g, con diferencias significativas aumentando 140 % en la longitud y 175 % en el peso seco de la raíz. Por su parte Adriano *et al.* (2011) evaluaron la especie *Rhizophagus intraradices* en plantas de la variedad Bourbon a los 112 DDI, hallaron incrementos del 114 % en la longitud de la raíz con respecto a las plantas testigo.

En el peso seco de las plantas de café Del Aguilar *et al.* (2018) mencionaron que observaron incrementos del 203.22 %. Romero (2019) reportó un incremento del 206

%, datos inferiores a los obtenidos en esta investigación, sin embargo existen más investigaciones donde los resultados fueron superiores a esta investigación como los obtenidos por Guzmán y Rivillas, (2007), ya que inocularon con HMA (*G. manihotis* y *G. fasciculatum*), a plantas de café de la variedad Caturra, evaluaron el peso seco de la raíz, comparando con plantas sin HMA, con la especie *Glomus manihotis* obtuvo 5.32 g y con *Glomus fasciculatum* 5.21 g, en tanto el testigo tuvo solo 0.50 g, aumentando 1,064 %. En otra investigación obtuvieron datos muy superiores aumentando 1063 % con la especie *R. intraradices* (Hernández *et al.*, 2018). Trejo *et al.* (2018), reportaron incrementos superiores al utilizar consorcios nativos en la variedad Garnica, con el mejor consorcio de HMA produjeron 9.48 g y con el consorcio con menor efecto obtuvieron 0.65 g, aumentando 1,458 % entre consorcios de HMA.

Los resultados obtenidos en esta investigación en el volumen radical, son similares a los obtenidos en otros cultivos en los que se ha demostrado la efectividad de los HMA en plantaciones frutales; se demostró el efecto de la inoculación con HMA, en el enraizamiento de estacas de ciruelo (*Prunus salicina* cv. Methley), a los 200 DDI, se midió el volumen radical, y las plantas sin HMA obtuvieron 0 cm<sup>3</sup>, mientras que con las plantas micorrizadas generaron 0.77 cm<sup>3</sup> (Alarcón y Ferrera, 1999). En el cultivo de papaya (*Carica papaya*), se inocularon HMA y al medir este mismo parámetro se encontró que las plantas sin HMA obtuvieron 0.73 cm<sup>3</sup> y las plantas con HMA 51.77 cm<sup>3</sup> (Quiñones *et al.*, 2012).

Los resultados que se presentan en esta investigación con las plantas micorrizadas, se deben a que los HMA, ayudan absorber de manera eficiente principalmente el fósforo (López *et al.*, 2015). El fósforo desempeña un papel importante en la fotosíntesis, la respiración, transferencia de energía, la división y crecimiento celular, promueve la rápida formación y crecimiento de las raíces, mejora la calidad de los granos y está involucrado en la transferencia de características hereditarias de una generación a la siguiente (Munera, 2012).

Por otro lado, los consorcios de HMA contienen más de siete especies micorriza arbuscular que lo integran, se habla que la utilización de consorcios nativos de HMA en la elaboración de biofertilizantes, presentan mayores efectos en las plantas ya que están adaptados a las condiciones edafoclimáticas de cada región (Quiñones *et al.*,

2019). En el Cuadro 8, se puede observar que las plantas que fueron inoculadas con roya, no presentaron diferencias significativas con las plantas que no fueron infestadas de este patógeno, esto se debe a que la asociación con ciertos géneros micorrízicos, permite controlar la incidencia o severidad de ciertos patógenos, por ejemplo, la inoculación de plantas de café con el género *Rhizophagus* sp. redujo la incidencia de *Fusarium* (Rezaccva *et al.*, 2017).

Al utilizar los HMA no solo se puede contribuir al incremento de la resistencia al estrés abiótico y biótico, sino que también a reducir los niveles de toxicidad por metales (Garzón, 2015), ya que estimulan el engrosamiento de la pared celular y producen un aumento en compuestos fenólicos, clorofila, arginina y citrulina, a nivel genómico, hay secuencias de aminoácidos que codifican la expresión de proteínas homólogas a las metalotioneínas, que le permiten la captura de metales pesados que afecten a la toxicidad de las plantas como *Gigaspora rosea* (*Op cit*).

Callejas *et al.* (2008), mencionaron que los HMA influyen en el la longitud de la raíz, el peso seco de las raíces y el volumen radical, ya que pueden incrementar la intensidad de ramificación de las mismas. Lo que puede explicar este aumento del peso seco del sistema radical en los tratamientos inoculados (Barrer, 2009).

Callejas *et al.* (2008), mencionaron que los HMA no influyen en la longitud de las raíces, si no en la absorción de nutrientes esenciales, pero en las (Figuras 20 y 21), se observa que los HMA incrementaron el crecimiento en la longitud, volumen y apariencia de las raíces en las variedades Típica y Costa Rica 95 con roya y sin roya. Y la ventaja de que una planta desarrolle raíces más grandes, es que la planta estará más anclada al suelo, evitará el acame por los efectos bióticos, además de que la raíz pivotante explorara el suelo para obtener agua y nutrientes (Calderón, 2012). Por otro lado, el papel clave de las micorrizas radica en que las hifas del hongo extienden el campo de absorción de la raíz más allá de la zona de goteo (en 1-5 mm), permitiendo a la raíz incrementar su superficie de absorción y explorar un volumen de suelo mayor del que lo hacen las raíces no micorrizadas, concretamente hasta 7 cm. de la superficie radicular (Buelvas y Peñates, 2008). Otros datos indican que puede aumentar hasta 40 veces más con la micorriza llegando a extenderse a más de un metro (Peña y Cardona, 2010).



Figura 20. Aspecto del crecimiento del sistema radical de las plantas de café de la variedad Costa Rica 95 y Típica con roya en condiciones de vivero a los 150 días después de la inoculación con los HMA.



Figura 21. Aspecto del desarrollo radical de las plantas de café de la variedad Típica y Costa Rica 95 sin roya en condiciones de vivero a los 150 días después de la inoculación con los HMA.

#### 4.4.5 Área foliar total de las plantas de café de la variedad Típica y Costa Rica 95

El aumento de biomasa de un vegetal se realiza a partir del área foliar expandida como fuente de producción de fotoasimilados (Benedetto y Tognett, 2016), por lo que se

tomó en consideración medir este parámetro; la (Figura 22), se puede observar que los mejores tratamientos fueron; Tc.Cr95.Sr., Cr.Fm.Sr., Cr.Cr95.Sr., Cr.Tip.Sr. y Tc.Fm.Sr., obteniendo los mejores efectos en el desarrollo del área foliar con; 570.08, 550.24, 490.56, 484.30 y 463 cm<sup>2</sup>, respectivamente sin diferencias significativas entre estos tratamientos.

Los tratamientos con menor crecimiento fueron aquellos sin micorrización; Cr.Shma.Cr., Tc.Shma.Cr., Tc.Shma.Sr. y Cr.Shma.Sr. obteniendo 77.21, 78.15, 131.32 y 171.05 cm<sup>2</sup>, comparado con las plantas micorrizadas se observó un efecto altamente significativo, en la comparación de medias con la prueba de (Tukey p≤0.05). La inoculación con los HMA aumentó el área foliar en 729 % en la variedad Típica y en 712 % en la variedad Costa Rica 95 comparadas con las plantas sin HMA de cada variedad.

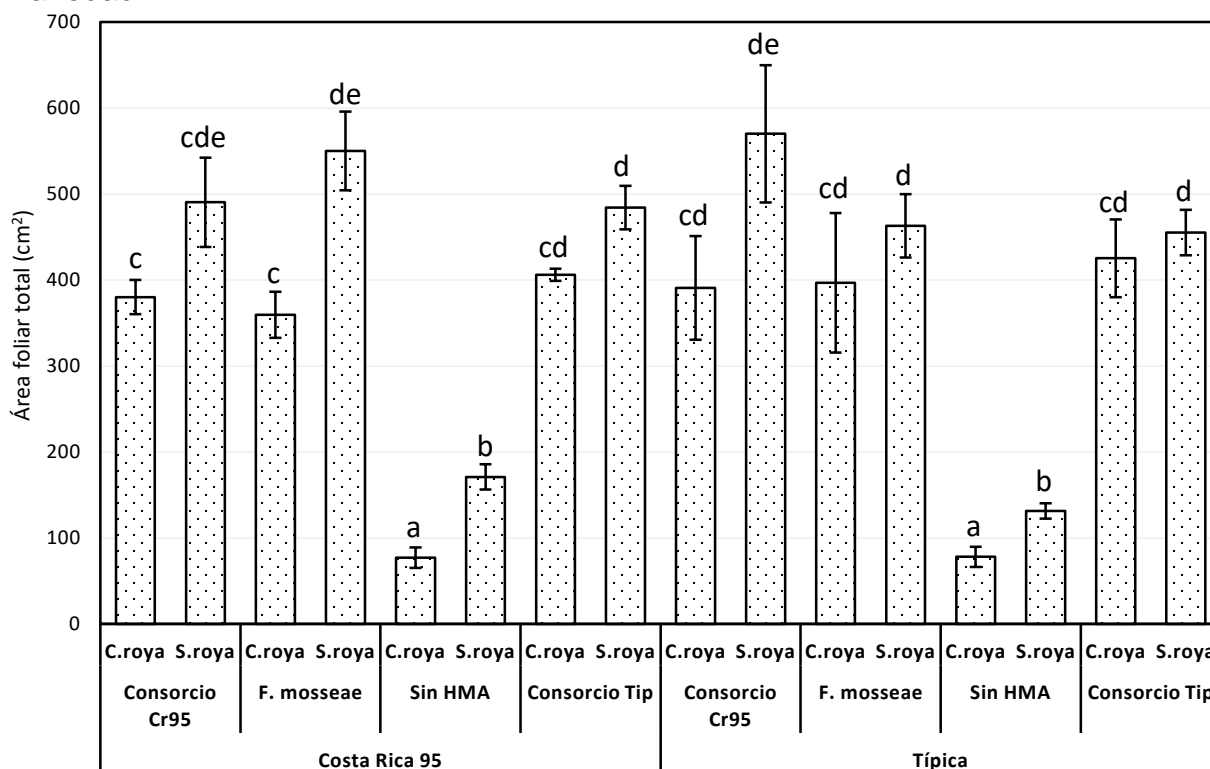


Figura 22. Efecto de los HMA en el área foliar de las plantas de café en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio ± el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo un análisis ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P = 6.79746E^{-7}$ ) e intervalos de confianza de la mediana del 95 %.

Como se observa en la (Figura 22), los resultados de esta investigación fueron sobresalientes al compararlos con otras investigaciones en el cultivo del café, Fernández *et al.* (2005) obtuvieron grandes resultados aumentando 207 % comparadas con las plantas sin HMA., Del Aguilar *et al.* (2018) en plantas de café de la variedad Caturra, reportaron aumentos del 239.31 %. Por su parte Romeo (2019), reportó un incremento del 249 %., Sánchez *et al.* (2011) observaron incrementos significativos en el área foliar de 287 %. Sánchez (2000)., reportó aumentando de 306 %. Trejo *et al.* (2018) evaluaron los HMA nativos, en la variedad Garnica, hubo un aumento del 383 %. Saboya (2018), quien reportó los mejores resultados, indicó un aumento del 462 %. Estos incrementos, corroboran la alta dependencia micorrízica del café.

Los resultados de esta investigación demuestran que los HMA si influyeron sobre el área foliar en las plantas de café en las variedades Típica y Costa Rica 95 con roya y sin roya, ya que la micorrización del hongo-planta generan incrementos de las tasas fotosintéticas, logrando plantas con mayor crecimiento vegetativo en el área foliar, como lo mencionó Torres *et al.* (2020).

En la (Figura 22), se puede observar que los tratamientos que se inocularon con la roya comparados con los tratamientos sin roya, no presentaron diferencias significativas, esto se debe a que la interacción de café con hongos micorrízicos arbusculares, presentan una tendencia a disminuir los efectos de las enfermedades por hongos, virus, bacterias y nematodos, debido a que las plantas con HMA mejoran la eficiencia respiratoria de la planta e influyen en la distribución de biomasa entre órganos y en el rendimiento de fruto (Sandoval, 2019).

En las (Figuras 23 y 24), se puede observar el efecto los HMA en el desarrollo vegetativo de las hojas (área foliar) y se resalta que la especie *Funneliformis mosseae*, que produce los mismos efectos que los consorcios nativos, esto puede deberse a que esta especie genera en su hospedante una mayor tolerancia/resistencia frente a distintos estreses bióticos, puede conferir tolerancia a patógenos del suelo, ya sea por competencia por los sitios de colonización o por activar mecanismos de defensa en la planta huésped (Ruscitti *et al.*, 2019) la importancia de obtener mayor área foliar, es



que presenta una mayor tasa fotosintética y mayor será la síntesis de carbohidratos, clave de la producción del café y para la simbiosis con los HMA (Douglass, 2020).

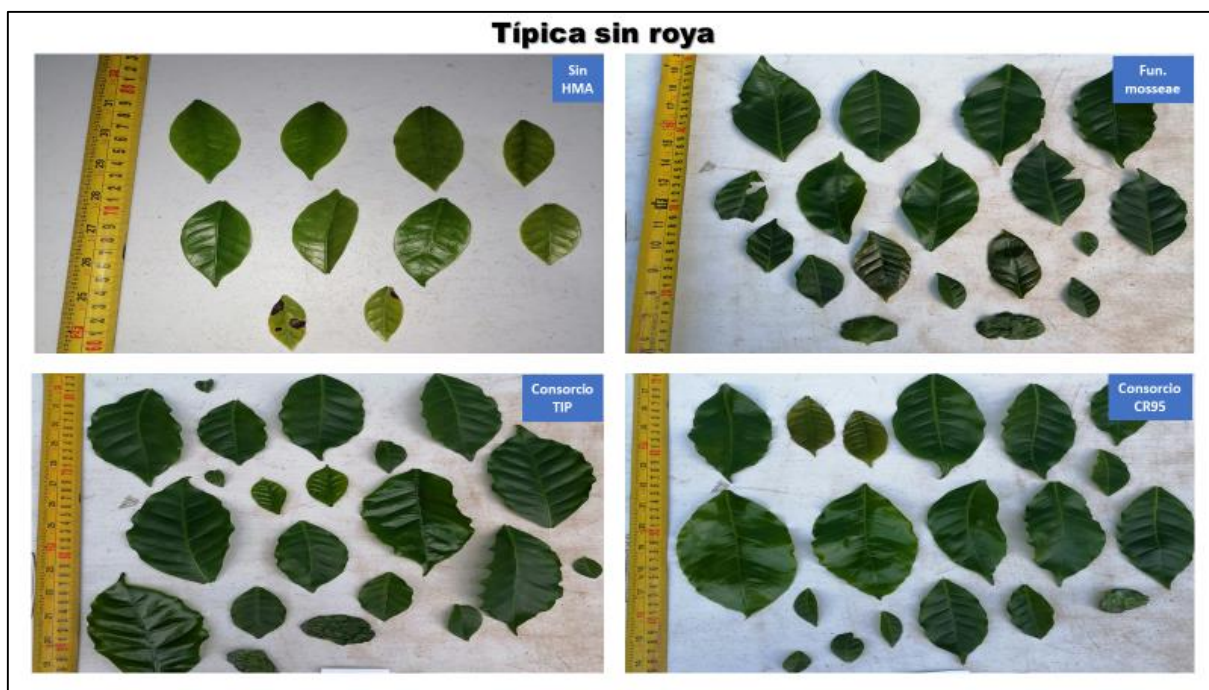


Figura 23. Aspecto del área foliar de plantas de café de la variedad Típica sin roya, con diferentes inoculos de HMA.



Figura 24. Aspecto del área foliar de plantas de café de la variedad Costa Rica 95 sin roya, con diferentes inoculos de HMA.

#### 4.4.6 Peso seco de la parte aérea de las plantas de café inoculadas con HMA en condiciones de vivero

El crecimiento es definido generalmente como un incremento irreversible en las dimensiones de la planta y el peso seco de la parte aérea indica el crecimiento total que ha logrado una planta (Benedetto y Tognett, 2016). En la (Figura 25) se puede observar el peso de la parte aérea de las plantas de café; el análisis estadístico mostró un efecto altamente significativo entre los tratamientos sin HMA y micorrizadas (en la comparación de medias con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ )). Los mejores tratamientos fueron; Tc.Cr95.Sr., Cr.Tip.Sr. y Tc.Tip.Sr., con 18.5, 17.5 y 17g, respectivamente sin diferencias significativas entre estos tratamientos. Los tratamientos con menor ganancia de peso fueron; Cr.Shma.Cr., Tc.Shma.Cr., Tc.Shma.Sr. y Cr.Shma.Sr., con 1, 2, 2 y 3 g, respectivamente.

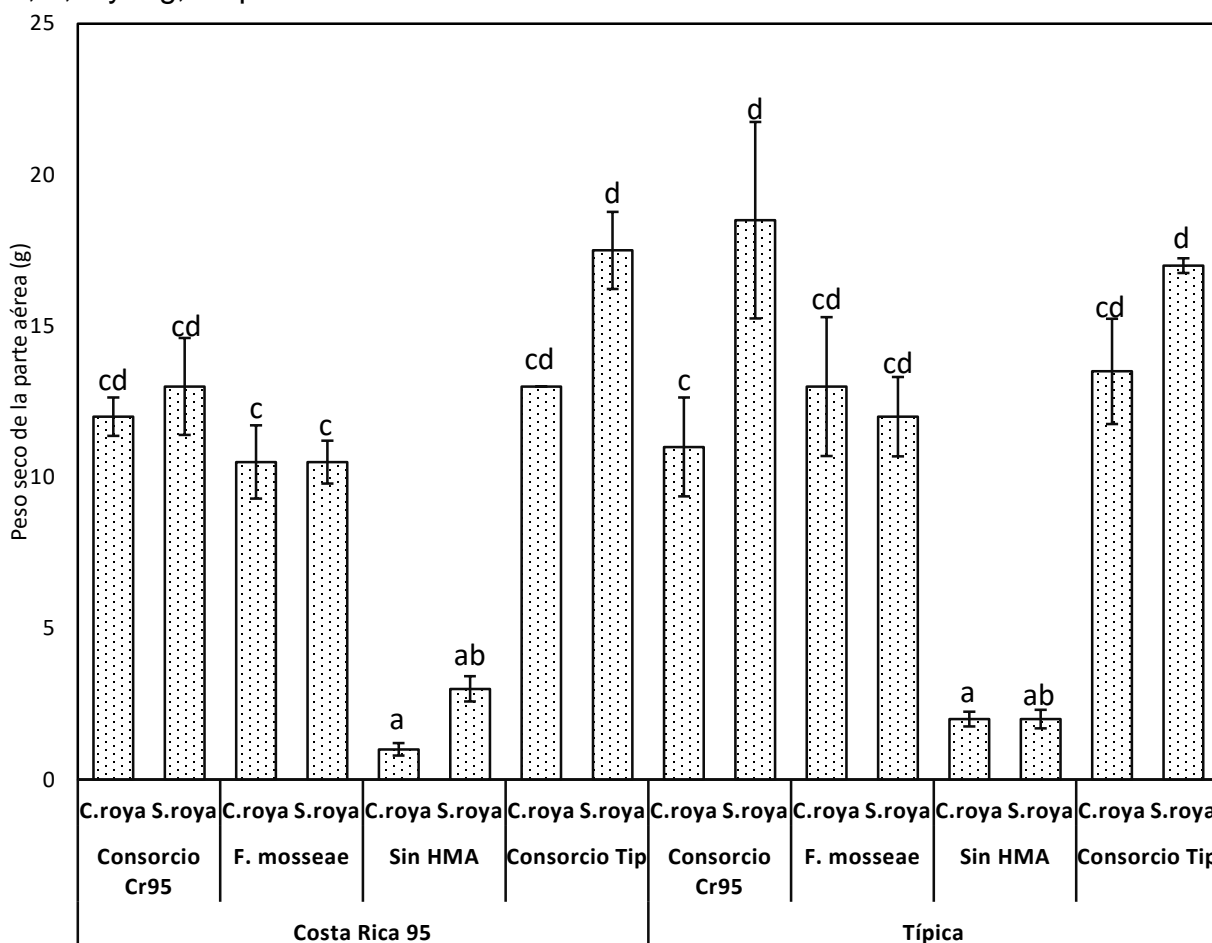


Figura 25. Peso seco de la parte aérea de las plantas de café inoculado con HMA en condiciones de vivero a los 150 DDI. Las barras indican el promedio  $\pm$  el error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo un análisis ANOVA no

paramétrico de Kruskal-Wallis ( $P = 2.03857E^{-7}$ .) e intervalos de confianza de la mediana del 95%.

Los resultados obtenidos en esta investigación en la variedad Costa Rica con el mejor consorcio de HMA incrementaron 1,750 % al comparar con las plantas sin HMA a los 150 DDI, estos resultados fueron muy similares a los obtenidos por Guzmán y Rivillas (2007), ya que inocularon con HMA a plantas de café de la variedad Caturra, obtuvieron con la especie *Glomus manihotis* 10.68 g y *Glomus fasciculatum* 10.26 g y el testigo 0.69 g, con un aumento del 1,547 % en las plantas micorrizadas. Hernández (2020) reportó un incremento del 1,362 %.

En la variedad Típica de esta investigación al comparar las plantas sin HMA con el mejor consorcio de HMA el incremento en estas últimas fue del 925 %, resultados muy superiores a los obtenidos por Saboya (2018), quien reportó un aumento del 298 %. Trejo *et al.* (2018) utilizaron consorcios nativos en la variedad Garnica, después de los 240 DDI, reportaron 9.87 g con el mejor consorcio de HMA y 3.45 g con el consorcio con menor efecto, con un incremento de 286 %. Y de igual manera Del Aguilar *et al.* (2018), mencionaron que los tratamientos inoculados con HMA incrementaron 201.64 %. Romero (2019), reportó un incremento del 184 % y Sánchez (2000) encontró que a los 210 DDI, aumentaron 181 % comparada con las plantas no micorrizadas.

El incremento de biomasa fresca y follaje observado, se pudo deber a una mejor captación de nutrientes y agua, facilitado por la simbiosis micorrízica, lo que trae consigo plantas de mayor tamaño y peso (Montoya, 2014).

El cultivo del café arábica bajo un manejo agronómico donde se combine, el uso eficiente de los HMA nativos, podría reducir la pérdida de la producción por problemas fitopatológicos (Prates *et al.*, 2019). Los estudios han demostrado que la abundancia y diversidad de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) decrecen en sistemas agrícolas convencionales de alta tecnología (Douglass, 2020). Y como consecuencia aumentan la presencia de agentes patógenos que generan cambios fisiológicos en la raíz de las plantas infectadas (Herrera *et al.*, 2019).

Por lo que la utilización de los HMA en la caficultura convencional en procesos de certificación en transición (sistemas de producción convencional a orgánico), existe la

posibilidad de acortar los tiempos de la certificación orgánica, ya que los HMA promueven un incremento en la diversidad, desarrollo y actividad de los microorganismos benéficos y de algunos de vida libre, los cuales forman simbiosis con las raíces de la mayoría de las plantas de interés agrícola (Ramos *et al.*, 2012).

Desde el punto de vista económico en México, hay un interés sobre los inoculantes microbianos como los HMA, para el beneficio de la producción agrícola, como una herramienta biotecnológica para promover la sustentabilidad de los cultivos, para disminuir la aplicación de los fertilizantes químicos granulados y foliares (Chinchay, 2016), agroquímicos, uso de energía (Sanchez, 2015) y conservación de los recursos naturales (Quiñones *et al.*, 2019).

Además, se mantiene la capacidad productiva del sistema, se preserva la biodiversidad y se contribuye con una producción más estable a largo plazo en equilibrio con el entorno, debido a esto, la presencia de los HMA en un suelo de cultivos es importante y favorece en el sistema agrícola (Sánchez, 2015).

Desde el punto de vista ecológico, el uso de pesticidas y fertilizantes inorgánicos ha generado problemas ambientales por la contaminación de los cuerpos de agua. En el Salvador, Guatemala y México, para el año 2050 las fincas cafetaleras podrían perder el 81 % de su producción actual, dependiendo de las estrategias preventivas y correctivas que apliquen contra el cambio climático y sus efectos derivados (Herrera, 2020).

Por lo que la utilización de los HMA debe incorporarse inmediatamente para resolver problemas ambientales y restaurar ecosistemas degradados (Acosta, 2019). Además de esto la planta vegetal suplementa al hongo con carbohidratos provenientes de la fotosíntesis, pueden recibir hasta el 20 % del carbono fijado fotosintéticamente por las plantas (Piñon, 2009), a nivel mundial se estima que cerca de 5 billones de toneladas de carbono por año son consumidos por el hongo micorrízico, mejorando la ecología microbiana del suelo, por lo tanto, con los HMA, se contribuye a mitigar el cambio climático a través de la captura de carbono e influenciar en la productividad en los ecosistemas terrestres (Pérez *et al.*, 2015).

Pero se conocen pocos estudios referentes a la diversidad funcional y morfológica de los HMA nativos, para aplicaciones biotecnológicas en la producción comercial de plantas (cultivos ornamentales, cultivos frutícolas, forestales) (Acosta, 2019). Dado lo anterior, es importante continuar fomentando la investigación acerca de las micorrizas en otros campos de estudio, como la selección de microorganismos nativos de alguna región, que puedan ser utilizados en la restauración ambiental y biorremediación, en la producción de metabolitos secundarios en las plantas de uso medicinal y el efecto como biofertilizantes y controlador de fitopatógenos sobre las plantaciones de interés económico de nuestro país (Camargo *et al.*, 2012).

## 5. CONCLUSION

El estudio demostró la importancia que tienen los hongos micorrizicos arbusculares, debido a su efecto positivo sobre el crecimiento en altura, diámetro del tallo, número de hojas, longitud de la raíz, peso seco de la raíz, volumen radical, área foliar y materia seca de la parte aérea de las plantas de café de las variedades Típica y Costa Rica 95.

Además, se demostró la efectividad de los HMA en la disminución de la sintomatología de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*), ya que disminuyó el nivel de severidad y el porcentaje de incidencia en ambas variedades de café. La efectividad biológica en el control de la roya varió según la proveniencia de los HMA, siendo los más eficientes los consorcios de HMA nativos que fueron recolectados de los cafetales convencionales de ambas variedades.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta P. D. 2019. Aplicación de hongos micorrízicos arbusculares en la producción de plantas de selva baja caducifolia con fines de reforestación. Tesis. Maestría en Manejo de Recursos Naturales. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Centro de Investigaciones Biológicas. <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/713/AOPDXN05T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Consultado el 28 de diciembre de 2021.
- Adriano A., M. L., R. Jarquín G., C. Hernández R., M. Salvador F. y C. Monreal V. 2011. Biofertilización de café orgánico en etapa de vivero en Chiapas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2: 417-431.
- Alarcón, A., R. Ferrera C. 1999. Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Rev. Terra Latinoamericana.* Vol. 17 (3). 179-191 pp.
- Anacafe. 2016. El potencial genético contribuye a la productividad de una plantación. Primera Edición. <https://www.anacafe.org/uploads/file/9a4f9434577a433aad6c123d321e25f9/Gu%C3%ADa-de-variedades-Anacaf%C3%A9.pdf>. Consultado el 12 de noviembre de 2021.
- Arcila J. P., F. Fartán, V., B. Moreno, A. 2007. Sistemas de producción de café en Colombia. *Cenicafé.* P.19.
- Artega A. E. 2019. Identificación de la diversidad y colonización de Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) nativos, en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.), en cuatro provincias (El Dorado, Lamas, San Martín y Moyobamba) en la región San Martín. Tesis licenciatura. Universidad Nacional de San Martín. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3529>. Consultado el 10 de mayo de 2021.
- Avelino J. y G. Rivas G. P. 2013. La roya anaranjada del cafeto. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>. Consultado el 29 de diciembre de 2021.

- Barrer S. E. 2009. El uso de hongos micorrizicos arbusculares como una alternativa para la agricultura. Escuela de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Industrial de Santander. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v7n1/v7n1a14.pdf>. Consultado el 10 de noviembre de 2021.
- Benedetto D. y J. Tognetti. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. Rev. Revisiones. [http://ria.inta.gob.ar/sites/default/files/revisiones/di-benedetto-castellano-4\\_1.pdf](http://ria.inta.gob.ar/sites/default/files/revisiones/di-benedetto-castellano-4_1.pdf). Consultado el 20 de diciembre de 2021.
- Bertolini V., N. Montaña M., B. Salazar O., E. Chimal S. y L. Varela. 2020. Diversidad de hongos micorrizógenos arbusculares en plantaciones de café (*Coffea arabica*) del volcán Tacaná, Chiapas, México. Rev. Acta Botánica Mexicana 27: e1602. DOI: 10.21829/abm127.2020.1602
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T. & Malajczuk, N. 1996. Working with Mycorrhizas in Forestry and Agriculture. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberr.
- Buevas R. O. J. y W. Peñates H. 2008. Caracterización de géneros de hongos formadores de micorrizas arbusculares (h.m.a) y vesículo arbusculares (h.m.v.a) nativas, asociadas con el pasto angleton (*Dichanthium aristatum*), bajo diferentes fuentes de abonamiento en la hacienda casanare, municipio de Tolú, Sucre. Universidad de Sucre. Facultad de Ciencias Agropecuarias. <https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/handle/001/429/633.202B928.pdf?sequence=2>. Consultado el 05 de noviembre de 2021.
- Calderón E. G. C. 2012. Epidemiología de la roya del café causada por *Hemileia vastatrix* Berk. & Br., en las regiones central y sur occidental de Guatemala, C.A. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de agronomía. Págs. 7, 13-23. Guatemala.
- Callejas B. A. R., A. Castillo G., M. Colinas L., M. González C., J. Pineda P. y L. Valdez A. 2008. Sustratos y hongos micorrizicos arbusculares en la producción de nochebuena. Rev. Chapingo Serie Horticultura. Vol. 15(1). 57-66 pp.



- Camarena G. G. 2012. Interacción planta-hongo micorrízicos arbusculares. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 18 (3). Universidad Autónoma Chapingo, México. Pág. 411. Consultado 22 de marzo del 2021.
- Camargo R. S. L., N. Montaña M., C. De la Rosa M. y S. Montaña A. 2012. Micorrizas: una gran unión debajo del suelo. Revista Digital Universitaria. Vol. 13 (7). <http://www.revista.unam.mx/vol.13/num7/art72/art72.pdf>. Consultado el 20 de diciembre de 2021.
- Carballar H. S., L. Hernández V. C., A. Alarcón y R. Ferrera C. 2020. Microbiología aplicada a la agricultura y agroecosistemas. Técnicas básicas para el estudio de los micorrízicos arbusculares. Edi. Primera. 93-106 pp.
- Carreón A. Y., N. Gómez D. y M. Martínez T. 2008. Las micorrizas arbusculares en la protección vegetal. Rev. Biológicas. No. 10. 60-70 pp.
- CENICAFE.2008. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. No. 32. [chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.cenicafe.org%2Fes%2Fpublications%2Fbot032.pdf&clen=1000184&chunk=true](https://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.cenicafe.org%2Fes%2Fpublications%2Fbot032.pdf&clen=1000184&chunk=true). Consultado el 10 de enero de 2022.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA), 2020. Los apoyos directos a los productores de café y sus resultados. La importancia de la producción del café. [http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/44Appoyo\\_productores\\_Cafe.pdf](http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/44Appoyo_productores_Cafe.pdf)
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSCA). 2018. El café en México diagnóstico y perspectiva. Producción nacional. Pág. 5. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/30EI%20caf%C3%A9%20en%20M%C3%A9xico:%20diagn%C3%B3stico%20y%20perspectiva.pdf>. Consultado el 20 de febrero de 2020.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSCA). 2019. Propuestas para reactivar la producción y comercialización de café en México 2019-1014. Palacio Legislativo San Lázaro. Ciudad de México, Estado de México. Págs. 2 y 5.

<http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/96Las%20propuestas%20para%20reactivar%20la%20producci%C3%B3n%20y%20comercializaci%C3%B3n%20de%20Caf%C3%A9%202019%2008.pdf>. Consultado el 24 de noviembre de 2019.

Chávez D. I. F., L. X. Zelaya M., C. I. Cruz C., E. Rojas A., S. Ruiz R. y S. De los Santos V., 2020. Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro-biotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* .11 (6):1426. Consultado el 19 marzo del 2021.

Chinchay R. D. O. 2016. Efecto de hongos micorrízicos arbusculares nativos sobre el nematodo agallador de raíces (*Meloidogyne* spp.) en plantones de café (*Coffea arabica*) variedad caturra en la región san martín". Tesis Licenciatura. Universidad Nacional de San Martín. Facultad de Ciencias Agrarias. [https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/580/TFCA\\_11.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/580/TFCA_11.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Consultado el 25 de noviembre de 2021.

Colmenárez. B. F.A. y J. Pineda B. 2006. Relación entre micorrizas en cafeto y la antracnosis por *Colletotrichum gloeosporioides* penz. VII Congreso SEAE Zaragoza. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Posgrado de Agronomía de Venezuela. <https://www.agroecologia.net/recursos/publicaciones/publicaciones-online/2006/CD%20Congreso%20Zaragoza/Ponencias/179%20Colmen%C3%A1rezBetancourt%20Com-%20Relaci%C3%B3n.pdf>. Consultado el 11 de octubre de 2019.

Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Veracruz (CESAVE). 2020. Roya del Cafeto (*Hemileia vastatrix*). Xalapa, Veracruz. <http://www.cesvver.org.mx/roya-del-cafe-hemileia-vastatrix/>. Consultado el 20 de enero de 2020.

Cornejo, P. E. 2006. Influencia de la cobertura vegetal sobre la diversidad y estructura de las comunidades de hongos micorrícicos y sus efectos en la estabilización de suelos degradados. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Facultad de Ciencias. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Granada. 266 pag.

- Cuervo A., J. y G. Rivas P. 2007. Cuantificación de hongos micorrízicos en muestras de suelo en plantaciones de *Tabebuia rosea* y *Cordia alliodora*. *Rev. Nova - Publicación científica*. Vol. 5(7): 38-41 pp.
- Del Águila K. M., G. Vallejos T. L. A. Arévalo, A. G. Becerra. 2018. Inoculación de Consorcios Micorrízicos Arbusculares en *Coffea arabica*, Variedad Caturra en la región San Martín. *La Serena*. Vol. 29 (1). Lima, Perú.
- Devine G. J., D. Eza, E. Oigusuku, M. Furlong. 2008. Uso de insecticidas: contexto y consecuencias ecológicas. *Rev. Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*. Vol. 25 (1). <http://www.scielo.org.pe/pdf/rins/v25n1/a11v25n1.pdf>. Consultado el 11 de enero de 2021.
- Douglass A. R. C. 2020. Efecto de la inoculación de micorrizas en el desarrollo de plantas de café en etapa de vivero en san Martín de Pangoa – Satipo. Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Agronomía. [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6435/T010\\_45907380\\_T.pdf?sequence=1](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6435/T010_45907380_T.pdf?sequence=1). Consultado el 10 de enero de 2022.
- Espinoza B. D. y E. Sancho B. 2020. Respuesta productiva de dos variedades de café Costa Rica 95 y Obatá bajo fertilización orgánica en Barva, Heredia. *Rev. Campesina*. <http://agroecologia.org/respuesta-productiva-de-dos-variedades-de-cafe-costa-rica-95-y-obata-bajo-fertilizacion-organica-en-barva-heredia/>. Consultado el 20 de septiembre de 2020.
- Esquivel Q. R. 2020. Propagación de hongos micorrizógenos arbusculares nativos y su influencia en la producción de maíz Amiláceo en Paquecc-Ayacucho. Primera parte: Propagación en cultivos asociados en invernadero. *Rev. Journal of the Selva Andina Biosphere*. Vol. 8(1). 42-52pp.
- Fajardo L., G. Cuenca, P. Arrindell, R. Capote y Z. Hasmy. 2011. El uso de los hongos micorrízicos arbusculares en las prácticas de restauración ecológica. *Interciencia* 36 (12). Pag. 931. Caracas, Venezuela. Consultado el 22 de marzo del 2021.

- FAO. 2015. Manejo agroecológico memorias del seminario científico internacional de la roya del café. <http://www.fao.org/3/a-i5137s.pdf>. Consultado el 20 de marzo de 2020.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2019. Costa Rica 95- Catimor y Roya, Tips del Profesor Yarumo. <https://www.youtube.com/watch?v=IXFLvbrRyAM&t=53s>. Consultado el 10 de noviembre de 2021.
- Feng, J., Z. Huang, Y. Zhang, W. Rui, X. Lei y Z. Li. 2021. Beneficial Effects of the Five Isolates of *Funnelformis mosseae* on the Tomato Plants Were Not Related to Their Evolutionary Distances of SSU rDNA or PT1 Sequences in the Nutrition Solution Production. Rev. Plant. No. 10. <https://doi.org/10.3390/plants10091948>.
- Fernández M. F., A. Rivera E., A. Hernández J., A. Herrera P., y K. Fernández S. 2005. Inoculación de hongos micorrízicos arbusculares y diferentes relaciones suelo: humus de lombriz sobre el crecimiento del cafeto (*Coffea arabica* L.) cv. Catuaí bajo la etapa de vivero. Rev. Chapingo serie horticultura. Vol. 11 (1). 175-184 PP.
- Flores C. G., J. González P., J. Arzola y O. Morgan. 2010. Efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares nativos y una especie seleccionada en los pastos *Brachiaria decumbens* vc. Basilisk y *Panicum maximum* vc. Mombaza. Rev. Cubana de Ciencia Agrícola. vol. 44 (3). 307-313 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). 2016. La producción de café en México: Periodo 2007-2017. <http://www.fao.org/faostat/es/?#data/QC>. Consultado el 28 de noviembre del 2019.
- García N. G. y E. Hidalgo J. 2019. Efficacy of indigenous and commercial *Simplicillium* and *Lecanicillium* strains for controlling *Hemileia vastatrix*. Mexican Journal of Phytopathology 37(2). DOI: 10.18781/R.MEX.FIT.1810-4

- García R. M. y R. Pérez L. 2003. Fitoalexinas: Mecanismo de defensa de las plantas. Rev. Chapingo. Serie forestales y del ambiente. Universidad Autónoma de Chapingo. Vol. 9 (01). 5-10 pp.
- Garzón, P. L. 2014. Importancia de las Micorrizas Arbusculares (MA) para un uso sostenible del suelo en la Amazonia Colombiana. Universidad de Caidas. Luna Azul. Num. 42. <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n42/n42a14.pdf>. Consultado el 11 de Diciembre del 2020.
- Gerdemann, J.W. y T. Nicolson H. 1963. Spores of mycorrhizal Endogone species extracted by wet sieving and decanting. Transactions of the British Mycological Society 46: 235-244.
- Grajales, M., R. De la Piedra, y J. López. 2008. Diagnóstico biofísico y socioeconómico de la parte media y alta de la Subcuenca de Cohatán, Chiapas. Avances en Investigación Agropecuaria. 12(1): 28-44
- Grosso J. 2020. Interacción de micorrización y biofumigación como herramientas de prevención y control de *Nacobbus aberrans*. Facultad en Ciencias Agrarias y Forestales.  
[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/105956/Documento\\_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/105956/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Consultado el 20 de septiembre de 2021.
- Guzmán P. O. y Rivillas O. C. 2007. Relación de *Glomus manihotis* y *G. fasciculatum* con el crecimiento de plantas de café y la severidad de la mancha de hierro. Cenicafé: 58(3):236-257.  
[https://www.cenicafe.org/es/publications/arc058\(03\)236-257.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc058(03)236-257.pdf). Consultado el 08 de febrero de 2021.
- Henderson T. P. 2019. La roya y el futuro del café en Chiapas. Cafetales más vulnerables a la roya. Rev. Mexicana de sociología. Vol. 81 (2).
- Hernández A. E., D. Trejo A., A. Rivera F. y R. Ferrera C. 2020. La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café. Terra Latinoamericana Número Especial 38-3: 613-628. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.659>. Consultado el 04 de septiembre de 2019.

- Hernández A. E., J. Banuelos, J. y D. Trejo A. 2021. Revisión: Distribución y efecto de los hongos micorrízicos en el agroecosistema de café. *Rev. de Biología Tropical*, Vol.69(2). 445-461 pp.
- Hernández A. J. 2010. Incidencia de enfermedades foliares del café bajo diversos tipos de sombra y manejo de insumos, en sistemas agroforestales, Turrialba, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5723/incidencia-enfermedades-follares-caf%C3%A9.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Consultado el 12 de enero de 2021.
- Hernández E. A. D. Trejo A., R. Ferrera C., A. Rivera F. Y M. González C. 2018. Hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) variedades Garnica, Catimor, Caturra y Catuaí. *Rev. Agroproductividad*. Vol. 11 (4). 61-67 pp.
- Herrera M. S. 2020. Diversidad de endomicorrizas y hongos filosféricos en cafetos infestados con roya (*Hemileia vastatrix*). Tesis doctora en ciencias. Universidad autónoma de Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/907>. Consultado el 10 de diciembre de 2020.
- Herrera S. M., Castro, B. R., Pérez, M. J. y Valdés V. E. 2019. Diversidad endomicorrízica en plantas de café (*Coffea arabica* L.), infectadas con roya (*Hemileia vastatrix*). *Nova Scientia* 11 (1): 101-104, 109 y 119.
- INEGI. 2014. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Marco Geoestadístico. Versión 3.1. Frailesca, Chiapas.
- Instituto Estatal del Café en Chiapas (INCAFECH). 2019. Datos importantes del café. Pág. 2. <https://incafech.gob.mx/assets/media/documentos/Datos%20cafe.pdf>. Consultado el 22 de noviembre de 2019.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2019. Manual de producción sostenible de café. Santo Domingo, República Dominicana. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/8726/BVE20037756e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Consultado el 18 de noviembre de 2021.

- Jakobsen, I. and E. C. Hammer. 2015. Nutrient dynamics in arbuscular mycorrhizal networks. pp. 91-131. In: T. R. Horton (ed.). Mycorrhizal networks. Ecological studies (Analysis and synthesis). Springer. Dordrecht, Netherlands. Print ISBN: 978-94-017-7394-2.
- Jaramillo, R. 2011. La micorriza arbuscular (MA) centro de la rizósfera: comunidad microbiológica dinámica del suelo. Rev. Contactos. No. 81. 17-23 pp.
- Jiménez I. J., M. Ramírez, B. Petit, C. Colmenares e I. Parra. 2017. Efecto de hongos micorrízicos arbusculares y estiércol de bovino en el crecimiento inicial y pigmentación en *Capsicum frutescens* L. Rev. Biagro. Vol. 29 (2). 137-144 pp.
- Jones, S. 1987. Sistemática vegetal. 2 ed. México, McGraw Hill. Pág.527.
- Julca, O. A., G. Alarcón, Á., L. Alvarado, H., R. Borjas, V., V. Castro, C. 2018. comportamiento de tres cultivares de café (catimor, colombia y Costa Rica 95) en el valle del perené, junín, Perú. Chil. j. agric. anim. sci. Vol.34 (3). Lima, Perú. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-389020>.
- Kirk, P., J Cannon., JA. Stalpers. 2008. Ainsworth & Bisbys dictionary of the fungi. Great Britain, CAB. Pág. 771.
- López G. B., A. Alarcón., R. Quintero L. y A. Lara H. 2015. Selección de cepas de hongos micorrízicos arbusculares en dos sistemas de producción de chile. Rev. Mex. Ciencias Agrícolas. Vol.6 (6). [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342015000600005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000600005). Consultado el 14 de abril de 2020.
- López G. F., E. Escamilla P., A. Zamarripa C. y J. Cruz C. 2016. Producción y calidad en variedades de café (*Coffea arabica* L.). en Veracruz, México. Rev. Fitotec. Mex. Vol. 39 (3): 297 – 304.
- Medina M. J A., Ruiz N. R. E., Gómez C. J. C., Sánchez Y. J. M., Gómez A. G., Pinto M. O. 2016. Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca. Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Instituto de Investigaciones Químico Biológicas. Revista Ciencia UAT. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Pág. 34

- Medina R. V. E. (2017). Biogeografía de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en la región San Martín, Perú. Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto Facultad de Ciencias Agrarias Departamento Académico de Agrosilvo Pastoral Escuela Profesional de Agronomía. Tesis. Pag.87.
- Molina L. M., L. Mahecha, M. Medina. 2005. Importancia del manejo de hongos micorrizógenos en el establecimiento de árboles en sistemas silvopastoriles. Rev. Col Cienc Pec. Vol. 18 (2). <http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v18n2/v18n2a07.pdf>. Consultado el 06 de noviembre de 2021.
- Montoya M. A. C. 2014. Hongos micorrízicos como biofertilizante y agentes de control biológico contra *Fusarium oxysporum* en agave tequilana. Tesis. Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB\\_UMICH/1881/IIAF-M-2014-0456.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/1881/IIAF-M-2014-0456.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Consultado el 27 de octubre de 2021.
- Morales Y. 2019. Durabilidad de la Resistencia Genética a la Roya del Café (*Hemileia vastatrix*) en Variedades Mejoradas en Honduras al 2019. La roya del café. <http://apps.iica.int/pccmca/docs/MT%20Frutales%20y%20Cafe/Martes%2030%20abril/8Durabilidad%20de%20la%20Resistencia%20Gen%C3%A9tica%20a%20la%20Roya.pdf>. Consultado el 18 de octubre de 2021.
- Munera V. G. A. 2012. El fosforo elemento indispensable para la vida vegetal. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/7377066a-bac4-4402-a306-eb45caa49d1c/content>. Consultado el 13 de noviembre de 2021.
- Nicolas E., J. Maestre V., F. Pedrero, R. Alcobendas, J. Bayona, J. Alargón, J. Vicente S., A. Bernabé, F. Fernández, M. Sánchez J., J. Gómez M. 2013. Inoculación



y persistencia del hongo micorrízico arbuscular *Glomus iranicum* var *tenuihypharum*. Rev. Agroinforme. 674-678 pp.

Nogales G. A. M. 2006. Estudio de la interacción entre el hongo formador de micorrizas arbusculares *Glomus intraradices* Schenck y Smith y el hongo patógeno *Armillaria mellea* (Vahl:fr) P. Kuhn en Vib. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona.

[https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/953/AMNG\\_TESIS.pdf?](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/953/AMNG_TESIS.pdf?)

Consultado el 15 de febrero de 2021.

Ochoa C. D. C. Montoya, R. A. 2010. Consorcios microbianos: una metáfora biológica aplicada a la asociatividad empresarial en cadenas productivas agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. 29/11-2010. rev.fac.cienc.econ., Vol. XVIII (2), diciembre 2010, 55-74. Consultado el 13 de mayo del 2021.

Pacheco H. M., J. Reséndiz M y V. Arriola P. 2020. Organismos entomopatógenos como control biológico en los sectores agropecuario y forestal de México: una revisión. Rev. mexicana de ciencias forestales. Vol. 10 (56). <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v10n56/2007-1132-remcf-10-56-4.pdf>.

Consultado el 11 de enero de 2021.

Palomares R. Javier A., J. D. González S. 2012. Investigación Café orgánico en México. Facultad de Contaduría y Administración. Universidad Autónoma de México. Pág. 17 u 18.

Paramo, O. y Medina F. 2018. Cambio climático, roya y política afectan al café de Chiapas. UNAM Global, de la comunidad para la comunidad. <https://unamglobal.unam.mx/el-cafe-de-chiapas-afectado-no-solo-por-la-roya-y-el-cambio-climatico-sino-por-elementos-de-indole-politico/>. Consultado el 12 de diciembre 2021.

Pastrán A. 2021. Agronegocios. <https://www.agronegocios.co/agricultura/costos-de-produccion-agricola-subirian-hasta-40-por-alza-en-los-precios-de-insumos-3233181>. Consultado el 02 de enero de 2022.

Pérez E., Y. Rodríguez, K. Fernández y B. de la Noval M. 2015. Percepción de señales de los hongos micorrízicos arbusculares por plantas de tomate (*Solanum*

*lycopersicum* L.) en las fases iniciales del establecimiento de la simbiosis. Rev. Cultivos Tropicales. Vol. 36 (3). 40-44 pp.

Peña V. C. P. y G. Cardona I. 2010. Dinámica de los suelos amazónicos: Procesos de degradación y alternativas para su recuperación. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - Sinchi. 1ra. Edición.

Pérez I. Y., J. Álvarez S., J. Mendoza V., J. Pat F., R. Gómez À. y I. Cuevas. 2012. Diversidad de hongos micorrícicos arbusculares en maíz con cultivo de cobertura y biofertilizantes en Chiapas, México. Rev. Gayana Bot. Vol. 69(1). 46-56 pp.

Philippot, L., Raaijmakers J., Lemanceau P., van der Putten W. (2013). Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. Nat. Rev. Microbiol., 11:789-799. <https://www.nature.com/articles/nrmicro3109>. Consultado el 15 de febrero de 2021.

Piñon P. E. 2009. Potenciales de micorrización en suelos de bosque mesófilo de montaña con diferentes historias de uso. Tesis. Instituto Politécnico Nacional. Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. [http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx/jspui/bitstream/LITER\\_CIIDIROAX/381/1/Pi%C3%B1on%20Pensamiento%2C%20E..pdf](http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx/jspui/bitstream/LITER_CIIDIROAX/381/1/Pi%C3%B1on%20Pensamiento%2C%20E..pdf). Consultado el 28 de noviembre de 2021.

Prates P.J., B. Coutinho M., M. Soares C.S., T. Gomes R. V., S. Sturmer L., R. Alves B. F., E. Mendonca S. y M. Megumi C. K. 2019. Agroecological coffee management increases arbuscular mycorrhizal fungi diversity. PLoS ONE 14(1): e0209093 (1-19). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209093>. Consultado el 15 de julio de 2021.

Preuss A. 2019. Café arábica y café robusta: rasgos comunes, diferencias y calidad. <https://www.coffeeness.de/es/arabica-y-robusta/>. Consultado el 24 de noviembre de 2019.

- Quiñones A. E. E., E. Hernández A., G. Rincón E. y R. Ferrera C. 2012. Interacción de hongos micorrízicos arbusculares y fertilización fosfatada en papaya. *Rev. Terra Latinoamericana*. Vol. 30 (2). 165-176 pp.
- Quiñones A. E. E., L. Hernández C., L. López P. y G. Rincón E. 2019. Efectividad de hongos micorrízicos arbusculares nativos de rizósfera de Agave como promotores de crecimiento de papaya. *Rev. Terra Latinoamericana*. Vol. 37. 163-174 pp.
- Ramírez R. R. F., E. Castañeda H., C. Robles., G. M. Santiago M., M. I. Pérez L. y S. 2020. Efectividad de biofungicidas para el control de la roya en plántulas de café. *Rev. Mexicana Ciencias Agrícolas*. Vol 11 (6). 1403-1412 pp.
- Ramos H. L. Arozarena D. N. J. Reyna G. Y. Telo C. L. Ramírez P. M. Lescaille A. J. y Martín A. G. M. 2012. Hongos micorrízicos arbusculares, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megatherium* y FitoMas-E: una alternativa eficaz para la reducción del consumo de fertilizantes minerales en *Psidium guajava*, L. var. Enana Roja cubana. *Cultivos Tropicales*, 2013, 34 (1): 5.
- Rayner, R. 1972. Spore liberation and dispersal of coffee rust *Hemileia vastatrix* Berk & Br. *Nature*. 191(4789):245.
- Reyes T. A., E. E. Quiñones A., G. Rincón E. y L. López P. 2016. Micorrización en *Capsicum annuum* para promoción de crecimiento y bioprotección contra *Phytophthora capsici* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7 (4): 857-870.  
<http://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Agricolas/article/view/4883/4005>. Consultado el 27 de enero de 2020.
- Rezaccva V., T. Konvalinková, J. Jansa. 2017. Chapter 1: Carbon Fluxes in Mycorrhizal Plants in Varma, A., Prasad, R., Tuteja, N. 2017. *Mycorrhiza -Eco-Physiology, Secondary Metabolites, Nanomaterials*. Cuarta edición. Springer DOI 10.1007/978-3-319-57849-1.
- Rivillas, O.C., Serna, G.C. Cristancho, A.M. y Gaitán, B.A. 2011. La roya del Cafeto en Colombia (Impacto manejos y costos del control, resultados de investigación).

Centro Nacional de Investigación del Café (Cenicafe) Chinina, Cladas, Colombia. P. 53.

Rojo J. E. 2014. Café I (*G. Coffea*). Universidad Complutense de Madrid Departamento Biología Vegetal. Rev. Reduca. Vol. 7(2). 113-132 pp.

Romero C. L. E. 2019. Bioprotección de plantas de café a *Hemileia vastatrix*, aplicando consorcios de hongos micorrízicos arbusculares nativos, en vivero, provincia de Lamas. Universidad Nacional de San Martín–Tarapoto. Facultad de Ciencias Agrarias.  
<https://tesis.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3826/AGRONOM%C3%8DA%20-%20Lorena%20Romero%20Chavez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.  
Consultado el 28 de noviembre de 2021.

Ruscitti, M., C. Arango, S. Garita, V. Bernardo. 2019. Parámetros morfológicos y fisiológicos de plantas de pimiento inoculadas con *Funneliformis mosseae* en condiciones de hidroponía y con altas concentraciones de cobre. Revista de la Facultad de Agronomía, 118 (1). Pag. 79. La Plata, Argentina.

Saboya P. A. 2018. Evaluación del efecto bioprotector de hongos micorrízicos arbusculares nativos sobre roya (*Hemileia vastatrix*) en café (*Coffea arabica*) variedad caturra bajo condiciones de vivero en la Región San Martín. Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto. Facultad de Ciencias Agrarias. Tesis Licenciatura. Perú. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3272>. Consultado el 16 de noviembre de 2021.

Saldaña A.G. G., O. B. Herrera H., M. R. Parra V. y E. Escamilla P. 2020. La renovación de cafetales escenario para la experimentación campesina frente a la difusión de innovaciones. 17 (3). Págs. 490, 492 y 496. Consultado el 23 de marzo del 2021.

Sánchez C., R. Rivera, C. González, R. Cupull, R. Herrera y M. Varela. 2000. Efecto de la inoculación de hongos micorrizógenos (hma) sobre la producción de posturas de cafetos en tres tipos de suelos del macizo montañoso guamuhaya. Rev. Cultivos Tropicales. Vol. 21(3). 5-13pp.

- Sánchez E. C., Rivera-Espinosa R., Caballero-Bencosme D., Cupull-Santana R., González-Fernández C., Urquiaga-Caballero S. 2011. Abonos verdes e inoculación micorrízica de pasturas de café sobre suelos ferralsíticos rojos lixiviados. *Cult. Tropic.* 31: 11-17.
- Sánchez L. A. L. 2015. Variación de la población de hongos micorrízicos arbusculares en un suelo agrícola por efecto de la aplicación de vinazas de la industria del tequila. Tesis. Maestro en Ciencia y Tecnología en la especialidad de Ingeniería Ambiental. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/87/1/Ana%20Lorena%20S%C3%A1nchez%20Lizarraga.pdf>. Consultado el 28 de diciembre de 2021.
- Sandoval R. J. 2019. Efecto de tres consorcios específicos de hongos micorrízicos arbusculares nativos en la biofertilización de plantas de café (*Coffea arabica*) variedad Pache en las provincias de Moyobamba, Lamas y Huallaga de la Región San Martín. Universidad Peruana Unión. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/1925>. Consultado el 28 de diciembre de 2021.
- Schüßler, A., C. Walker, 2010. *The Glomeromycota. A species list with new families and new genera.* Gloucester.
- Schüßler, A., D. Schwarzott, C. Walker, 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. *Mycological Research* 105: 1413-1421.
- Secretaría de agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2017. *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. El café mexicano.* Ciudad de México, México. P. 2. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256426/B\\_sico-Caf\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256426/B_sico-Caf_.pdf). Consultado el 11 de noviembre de 2011.
- Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad,

salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreos y análisis. Segunda sección. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. Consultado el 20 de enero de 2020.

Servicio Nacional De Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). 2016. Roya del cafeto *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome. Ficha Técnica No.40. pág. 3. [http://www.cesaveson.com/files/docs/campanas/vigilancia/fichas2016/ROYAc\\_afeto.pdf](http://www.cesaveson.com/files/docs/campanas/vigilancia/fichas2016/ROYAc_afeto.pdf). Consultado el 20 de noviembre del 2019.

Servicio Nacional De Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). 2020. Plagas del café. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/plagas-del-cafeto>. Consultado el 3 de abril del 2021.

StatPoint Inc. 2005. Statgraphics® Centurion XVI Manual De Usuario. StatPoint Technologies, Inc. <https://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2015/03/Centurion-XVI-Manual-Principal.pdf> Consultado el 20 de octubre de 2019.

Torres, V.G., Saboya, A., Arévalo, L. 2020. Efecto Bioprotector de Micorrizas Arbusculares en la Reducción de Roya (*Hemileia vastatrix*) en la Región San Martín.

Trejo A. D., R. Ferrera C., W. Sangabriel C. y Y. Baeza. 2018. Efecto de la micorriza arbuscular en plantas de café (*Coffea arabica* L.) infectadas por el nematodo de la corchosis de la raíz. Rev. Agroproductividad. Vol. 11 (4). 98-104 pp.

Trejo D., R. Ferrera C., R. García., L. Valera, L. Lara y A. Alarcón. 2011. Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo. Rev. chil. hist. nat. vol.84 (1). <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000100002>. Consultado el 20 de febrero de 2021.

Trinidad C. J. 2014. Hongos micorrízicos arbusculares asociados a la rizósfera de *Agave cupreata*: Riqueza de especies, cultivo in vitro, promotores del crecimiento y agentes de control biológico. CIATEJ. Centro de Investigación y

Asistencia en Tecnología y diseño del Estado de Jalisco, A. C. Guadalajara Jalisco.

- Trinidad C. J. E. E. Quiñones, L. V. Hernández C., L. López P., G. Rincón E. 2017. Hongos micorrízicos arbusculares asociados a la rizósfera de *Agave cupreata*: Riqueza de especies, cultivo in vitro, promotores del crecimiento y agentes de control biológico. *Scientia Fungorum*. 45 (13-25). Pag. 15.
- Urgiles G. N., J. Guachanamá S., I. Granda M., Á. Robles C., M. Encalada C., P. Loján A., M. Avila S., L. Hurtado T., N. Poma L., y. Collahuazo R., S. Araujo A. y L. Quichimbo S. 2021. Caracterización morfológica de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) asociados al café en sistemas agroforestales de la provincia de Loja, Ecuador. *Rev. Bosques Latitud Cero*. Vol. 10 (2). 137-145 pp.
- Usuga O. C., D. Castañeda S. y A. Franco M. 2008. Multiplicación de hongos micorriza arbuscular (h.m.a) y efecto de la micorrización en plantas micropropagadas de banano (*musa aaa cv. gran enano*). *Rev. Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. Vol. 61(1). 4279-4290 pp.
- Vallegos T. G., L. Arévalo. I. Lliquin, R. Solís. 2019. Respuesta en campo de clones de café a la inoculación con Consorcios de Hongos Micorrizicos Arbusculares en la región de Amazonas, Perú. *Información Tecnológica*. Vol. 30(6), 73-84 (2019). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600073>. Consultado el 14 de diciembre del 2021.
- Vanegas F. 2016. El suelo óptimo para el cultivo de café. <https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/08/31/el-suelo-optimo-para-el-cultivo-de-cafe/>. Consultado el 10 de diciembre de 2021.
- Vásconez L. 2021. Crisis mundial de fertilizantes impactará producción de alimentos en Ecuador. El comercio. <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/crisis-fertilizantes-produccion-alimentos-ecuador.html>. Consultado el 14 de diciembre de 2021.
- Vital V. I., E. Quiñones A. E., L. Hernández C. V., G. Rincón E. 2020. Crecimiento de girasol ornamental en maceta a nivel de campo por efecto de hongos

micorrízicos arbusculares. Rev. Terra Latinoamericana. Vol. 38 (3). 679-692 PP.

World coffee research. 2019. Las variedades del café arábica. <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/content/3-releases/20190506-update-may-2019/las-variedades-del-cafe-arabica.pdf>. Consultado el 15 de febrero de 2020.

Zepeda J. I. 2018. Manejo sustentable de plagas agrícolas en México. Universidad de La Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo, México. Rev. Agricultura, sociedad y desarrollo. Vol. 15 (1). <http://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v15n1/1870-5472-asd-15-01-99.pdf>

Zitácuaro C. F. H. y A. Aparicio R. 2004. Variación de altura y diámetro de plántulas de *Pinus oaxacana* Mirov de tres poblaciones de México Foresta Veracruzana. Vol 6(1). 21-26 pp. Recursos Genéticos Forestales Xalapa, México.