



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

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

**HONGOS MICORRÍDICOS ARBUSCULARES NATIVOS Y LA
CALIDAD DE FRUTO DE *Cucurbita pepo* VAR. GREY
ZUCCHINI Y *Cucurbita moschata***

REPOSITORIO

Que presenta:

José Alberto Gío Trujillo

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable

Director de tesis:

Dr. Carlos Juan Alvarado López

Conkal, Yucatán, México

Octubre. 2024



TecNM



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

**HONGOS MICORRÍCICOS ARBUSCULARES NATIVOS Y LA
CALIDAD DE FRUTO DE *Cucurbita pepo* VAR. GREY
ZUCCHINI Y *Cucurbita moschata***

REPOSITORIO

Que presenta:

José Alberto Gío Trujillo

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable

Director de tesis:

Dr. Carlos Juan Alvarado López

Conkal, Yucatán, México

Octubre, 2024



TecNM



Conkal, Yucatán, México, a 04 de octubre de 2024

El comité de tesis del candidato a grado: José Alberto Gío Trujillo. Constituido por el Dr. Carlos Juan Alvarado López, Dra. Neith Aracelly Pacheco López, Dr. Jairo Cristóbal Alejo, Dr. Arturo Reyes Ramírez y Dr. Juan Candelero de la Cruz, habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: **Hongos micorrícicos arbusculares nativos y la calidad de fruto de *Cucurbita pepo* var. Grey Zucchini y *Cucurbita moschata***, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable, según lo establece el Capítulo 2, inciso 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentada en el examen de grado correspondiente.

ATENTAMENTE


Dr. Carlos Juan Alvarado López
Director de Tesis


Dra. Neith Aracelly Pacheco López
Asesora de tesis


Dr. Arturo Reyes Ramírez
Asesor de Tesis


Dr. Jairo Cristóbal Alejo
Asesor de Tesis


Dr. Juan Candelero de la Cruz
Asesor de Tesis



Conkal, Yucatán, México a 04 de octubre de 2024.

DECLARATORIA DE PROPIEDAD

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

M.C. José Alberto Gío Trujillo

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, esposa (Gabriela) e hijos (Leonardo, Gabriel y Natalia) por su paciencia durante esta etapa académica de mi vida. Así como tu apoyo para que pueda alcanzar cada uno de mis logros.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por brindarme el apoyo económico durante el transcurso de mis estudios de posgrado.

A los docentes del Tecnológico Nacional de México, campus Conkal y División de Estudios de Posgrado e Investigación por el apoyo otorgado y por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en sus instalaciones.

Al Dr. Carlos Juan Alvarado López por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto. Agradeciendo a cada uno de mis asesores, Doctora Neith y Doctores Jairo, Arturo y Juan.

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres (Gustavo Gío y Bertha Trujillo) y hermanos, mi esposa, Laura Gabriela López García y a mis hijos, Leonardo, Gabriel y Natalia, por brindarme su apoyo en cada momento.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
INDICE DE CUADROS Y FIGURAS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
1. CAPITULO 1. INTRODUCCION GENERAL	1
1.1. INTRODUCCION	1
1.2. ANTECEDENTES	3
1.2.1. Cultivos agrícolas-consorcios microbianos del suelo	3
1.2.2. Simbiosis micorrícica	4
1.2.2.1. Hongos micorrícicos arbusculares	4
1.2.2.2. Proceso de micorrización	4
1.2.2.3. Hongos micorrícicos-homeostasis de metales del suelo	6
1.2.2.4. Hongos micorrícicos-transportadores de minerales	7
1.2.2.5. Hongos micorrícicos-seguridad alimentaria	8
1.2.3. Calabaza	10
1.2.3.1. Calidad nutrimental de la calabaza	11
1.2.4. Importancia de la calabaza en México	12
1.2.4.1. <i>Cucurbita moschata</i>	13
1.2.4.2. <i>Cucurbita pepo</i>	14
1.3. HIPOTESIS	15
1.4. OBJETIVOS	15
1.4.1. Objetivo general	15
1.4.2. Objetivos específicos	15
1.5. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL	16
1.6. LITERATURA CITADA	17
II. CAPITULO 2. Comportamiento de <i>Cucurbita pepo</i> L. var. “Grey Zucchini”, en la propagación de hongos micorrizógenos arbusculares nativos de suelos con diferente manejo.	32
III. Capítulo 3. Calidad de fruto de <i>Cucurbita moschata</i> y <i>Cucurbita pepo</i> var. “Grey Zucchini” asociada a hongos micorrícicos arbusculares	34

INDICES DE CUADROS Y FIGURAS

	Página
CAPITULO 1	
Cuadro 1. Revisión de las principales contribuciones de la asociación micorrícica arbuscular con cultivos alternativos en relación a la calidad nutrimental, sensorial y rendimiento en cosecha (tamaño y peso).	9
Cuadro 2. Composición mineral, carotenoides, flavonoides y ácidos fenólicos presentes en <i>Cucurbita moschata</i> y <i>Cucurbita pepo</i> .	12
Figura 1. Procedimiento experimental propuesto para el desarrollo del proyecto de tesis doctoral	16

RESUMEN

Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) asociados a cultivos agrícolas son considerados un método novedoso para incrementar la calidad nutricional de los alimentos. Al intervenir en la producción, rendimiento del fruto y composición nutricional (mineral y nutraceutica) de las cosechas agrícolas. El estudio planteó el objetivo de evaluar el efecto de la inoculación de HMA nativos sobre la producción, calidad de cosecha (peso, diámetro) y poscosecha (atributos organolépticos) en frutos calabacita *Cucurbita pepo*, variedad “Grey Zucchini” y *Cucurbita moschata*. La metodología experimental del trabajo de tesis doctoral se dividió en dos fases: I) Evaluar a *Cucurbita pepo* variedad “Grey Zucchini” en la propagación de HMA nativos de tres diferentes fuentes de inóculo micorrícico (sistema agrícola, sistema multipropósito y vegetación secundaria) y II: Determinar en campo la influencia de la inoculación de HMA nativos y un inoculante micorrícico comercial (GLUMIX) en la producción, calidad de la cosecha y atributos poscosecha de fruto (propiedades organolépticas) de *Cucurbita pepo* “Grey Zucchini” y *Cucurbita moschata*. En la primera fase experimental, la multiplicación de esporas nativas de HMA, nos indica que *Cucurbita pepo*, presenta una compatibilidad funcional, al determinar que el inoculante conformado de consorcios de HMA nativos presentó el mayor incremento (>50 %) en comparación a la formulación comercial (<30 %). Finalmente, para la segunda fase, la calidad de cosecha en peso y tamaño (diámetro ecuatorial y polar) fue significativa en plantas asociadas con HMA nativos y cepas comerciales + 50 % de fertilización química, en comparación a plantas con el 100 % de fertilización convencional. Asimismo, esta fase nos indicó que la inoculación micorrícica, estuvo ligada al incremento de parámetros organolépticos. *Cucurbita pepo*, presentó variaciones en textura, colorimetría, acidez titulable y grosor del fruto. Para *Cucurbita moschata*, las variaciones estadísticas se observaron en sólidos solubles, acidez titulable, textura y colorimetría del fruto.

ABSTRACT

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) associated with agricultural crops are considered a novel method to increase the nutritional quality of foods. By intervening in the production, fruit yield and nutritional composition (mineral and nutraceutical) of agricultural crops. The study aimed to evaluate the effect of inoculation of native AMF on production, harvest quality (weight, diameter) and postharvest (organoleptic attributes) in zucchini fruits *Cucurbita pepo*, variety “Grey Zucchini” and *Cucurbita moschata*. The experimental methodology of the doctoral thesis work was divided into two phases: I) Evaluate *Cucurbita pepo* variety “Grey Zucchini” in the propagation of native AMF from three different sources of mycorrhizal inoculum (agricultural system, multipurpose system and secondary vegetation) and II: Determine in the field the influence of the inoculation of native AMF and a commercial mycorrhizal inoculant (GLUMIX) in the production, harvest quality and postharvest fruit attributes (organoleptic properties) of *Cucurbita pepo* “Grey Zucchini” and *Cucurbita moschata*. In the first experimental phase, the multiplication of native AMF spores indicates that *Cucurbita pepo* presents functional compatibility, determining that the inoculant made up of native AMF consortia presented the greatest increase (>50%) compared to the commercial formulation (<30%). Finally, for the second phase, the harvest quality in weight and size (equatorial and polar diameter) was significant in plants associated with native AMF and commercial strains + 50% chemical fertilization, compared to plants with 100% conventional fertilization. Likewise, this phase indicated to us that mycorrhizal inoculation was linked to the increase in organoleptic parameters. *Cucurbita pepo*, presented variations in texture, colorimetry, titratable acidity and thickness of the fruit. For *Cucurbita moschata*, statistical variations were observed in soluble solids, titratable acidity, texture and colorimetry of the fruit.

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.

1.1.INTRODUCCIÓN.

La insuficiencia alimentaria a nivel mundial afecta a cerca de un tercio de la población. Lo que implica que más de 735 millones de personas de la población mundial presenta deficiencia o poca accesibilidad a alimentos con alto valor nutricional (FAO, 2023b). En particular ricos en vitaminas (vitamina A) y compuestos minerales como el fósforo (P), magnesio (Mg), hierro (Fe), cobre (Cu), yodo (I), manganeso (Mn), selenio (Se) y zinc (Zn) (Wakeel *et al.*, 2018). Esta problemática, se ha denominado “Hambre Oculta”, considerada responsable actualmente de un creciente déficit socio-económico, generando factores de riesgo relacionados con la salud pública, salud mental e índices bajos de bienestar en zonas vulnerables de la población (IUP y FAO, 2021).

En este contexto, los suelos, considerados el núcleo del sistema alimentario mundial, son el principal factor determinante en la productividad, accesibilidad y calidad nutricional de los alimentos, al constituir el origen de cerca del 95 % de los alimentos (FAO, 2022). El agotamiento de nutrientes en el suelo (suelos marginales) y las predominantes estrategias agrícolas convencionales como la excesiva fertilización inorgánica, agricultura extensiva, uso de pesticidas agrícolas, etc., influyen directamente en la biodisponibilidad mineral (macro y micro elementos) de los suelos y su dinámica con los sistemas agroalimentarios (FAO, 2021; FAO, 2023a). Lo anterior compromete la calidad de las cosechas agrícolas y su valor nutricional, al disminuir la biodisponibilidad de elementos minerales en el suelo y la capacidad de las plantas de absorber, transferir y acumular nutrientes en los tejidos vegetales (raíz, hojas, tallos, frutos, semillas) para el consumo humano, indispensables para la dieta y salud nutricional de la población mundial (Das *et al.*, 2019; Ahmed *et al.*, 2024).

Para abordar la problemática de la seguridad alimentaria y nutrición mundial, se han desarrollado diversos programas de apoyo para erradicar la malnutrición y sus efectos adversos, fomentando la denominada “agricultura regenerativa”, principalmente en zonas vulnerables. Promoviendo actividades sostenibles para mantener la salud de los suelos, la producción de alimentos nutritivos, seguros (inocuos) y accesibles a toda la población mundial (IUP y FAO, 2021; FAO, 2023b). Uno de los pilares importantes de la “agricultura regenerativa” se basa en el desarrollo de estrategias que optimicen y transformen los sistemas agroalimentarios, encaminados al enriquecimiento nutricional de alimentos, tanto en su valor nutraceutico (fenoles, antioxidantes, etc.), compuestos esenciales (vitaminas y

aminoácidos) y composición mineral (Fe, Zn, Mn, I, Se, etc.). Frecuentemente aplicados a los cultivos básicos (arroz, maíz, trigo, frijol, etc.) y alternativos como frutas, legumbres, semillas oleaginosas, follajes comestibles y hortalizas (Kumari *et al.*, 2023).

Por su valor nutricional y composición mineral, las especies vegetales de la familia Cucurbitaceas como las calabazas (Adnan *et al.*, 2017; Men *et al.*, 2021), son incluidas en iniciativas de programas agrícolas y sociales orientados a la seguridad alimentaria y nutrición, principalmente en zonas prioritarias para su atención (Wan Shafiin *et al.*, 2021; Buzigi *et al.*, 2022). Sin embargo, su composición mineral y nutraceútica, fluctúa de acuerdo al manejo agronómico del cultivo, fertilización y factores edáficos (Sedano-Castro *et al.*, 2011). En México, las calabazas *Cucurbita moschata* y la calabacita *Cucurbita pepo*, se encuentran entre los primeros 10 cultivos de valor agrícola. Derivado de sus altos rendimientos en campo, rentabilidad para el agricultor, valor en el mercado y su aceptación por parte del consumidor (Aguilar-Cárpio *et al.*, 2022). Estudios anteriores han reportado un perfil inferior en composición mineral en frutos de calabaza (Jacobo-Valenzuela *et al.*, 2011; Chi-Sánchez *et al.*, 2020). Comparados con patrones minerales estructurales procedentes de diferentes regiones del mundo (Gomes *et al.*, 2020; Enneb *et al.*, 2020).

En este sentido, es importante proponer prácticas eficientes en el manejo de los cultivos agrícolas, específicamente en promover la nutrición mineral, para un mayor desarrollo vegetal e incrementar la calidad de cosecha (Upadhayay *et al.*, 2022; Dhiman *et al.* 2023). La asociación de comunidades microbianas benéficas del suelo es considerada una estrategia novedosa para mejorar la calidad de los alimentos de origen vegetal (Kaur *et al.*, 2020;). Upadhayay *et al.* (2019), menciona al uso de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) como un prometedor método para incrementar la calidad nutricional de los alimentos. Al intervenir durante la interface simbiótica en los procesos de biodisponibilidad de nutrientes en el suelo, fitoextracción y translocación mineral del suelo hacia la planta (Ferrol *et al.*, 2016). Lo anterior implica, un mayor transporte de minerales del suelo generado por un efecto positivo en la nutrición mineral de las plantas, facilitando la acumulación de minerales en la biomasa vegetal de los cultivos agrícolas asociados (Lehmann *et al.*, 2014; Lehmann y Rillig, 2015). Por lo antes expuesto, el trabajo de tesis doctoral plantea el objetivo fue evaluar el efecto de la inoculación de HMA nativos sobre la producción, calidad de cosecha (peso, diámetro) y poscosecha (atributos organolépticos) en frutos de *Cucurbita pepo*, Var. “Grey Zucchini” y *Cucurbita moschata*.

1.2. ANTECEDENTES.

1.2.1. Cultivos agrícolas-consorcios microbianos del suelo

El uso eficiente de fertilizantes químicos es sin duda la principal problemática de los cultivos en la agricultura moderna, dado que, sobresatura el suelo con minerales y su uso no garantiza la absorción adecuada de las plantas y la distribución eficiente hacia los tejidos vegetales consumibles para el humano (Kutman *et al.*, 2023). Por su eficiente manejo en la nutrición mineral de los cultivos, directamente relacionados con el crecimiento, desarrollo y productividad de las cosechas, la asociación de microorganismos rizófilos, es considerado una potencial herramienta agrícola e importante recurso edáfico de las comunidades vegetales, que influyen en la producción sostenible de alimentos de origen vegetal (Kaur *et al.*, 2020; Kumari *et al.*, 2023). Por lo anterior, la asociación con microorganismos del suelo como hongos y/o bacterias, pueden ser tomados en cuenta como prometedores bioestimulantes de la nutrición vegetal a través de sus diferentes mecanismos de acción con los cultivos hospedantes, con expectativas en mejorar la composición nutricional y fitoquímica de los alimentos (Agnolucci *et al.*, 2020; Sun y Shahrajabian, 2023).

Se ha documentado un efecto sinérgico entre la inoculación dual de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, plant growth-promoting rhizobacteria, por su acrónimo en inglés) + hongos micorrícicos arbusculares (HMA), potencializando los efectos positivos de la interacción microbiana con cultivos hospedantes (Emmanuel y Babalola, 2020; Yu *et al.*, 2022). Actualmente, las expectativas del uso de consorcios microbianos en la agricultura moderna están orientada a los beneficios otorgados en la calidad de las cosechas agrícolas y la producción de alimentos con mayores aportes nutrimentales (Melini *et al.*, 2023).

En este sentido, la inoculación dual entre HMA+PGPR, han reportado un mayor contenido mineral en la producción de cultivos básicos. Autores como Yadav *et al.*, (2020) y Yadav *et al.*, (2021), determinaron que esporas de HMA + *Bacillus subtilis*, incrementaron el perfil mineral en grano de trigo y maíz, principalmente en las concentraciones de fósforo, nitrógeno, hierro y zinc. Asimismo, la co-inoculación de HMA-bacterias solubizantes de microelementos en el suelo (Selenobacterias, bacterias solubizantes de Zn, entre otras), induce efectos positivos en la producción de cereales, principalmente en el incremento en la concentración de Se en trigo (Durán *et al.*, 2018) y el contenido de Zn en granos de maíz, constituyendo en un incremento de hasta el 10 % (Suganya *et al.*, 2020).

En la producción hortícola y frutícola, se han reportado los mismos hallazgos en relación a

la calidad nutrimental de la cosecha. En frutos de *Solanum lycopersicum*, se reportan incrementos en los valores de fitoquímica y contenidos de azúcares (Bona *et al.*, 2017) y un aumento en la composición mineral en fruto (fósforo y calcio) y vitamina C (Ordookhani *et al.*, 2013), al emplear un consorcio de cepas de HMA y PGPR (*Pseudomonas putida*, *Azotobacter chroococcum* y *Azospirillum lipoferum*). En otros cultivos hortícolas, Gamboa-Angulo *et al.* (2020), determinaron mayores concentraciones de lípidos y proteínas en frutos de *Capsicum annuum*, asociado con HMA + consorcio bacteriano de *Bacillus megaterium* *Pseudomonas fluorescens*, *Azospirillum brasilense* y *Azotobacter chroococcum*. Bona *et al.* (2015), determinaron en *Fragaria X ananassa* co-inoculada con HMA + *pseudomonas*, un incremento del contenido de azúcares y de su fitoquímica (ácidos ascórbico y fólico). Estos beneficios responden a los efectos sinérgicos entre los HMA y las comunidades bacterianas de la rizosfera, al estimular el metabolismo de las plantas (Chávez-González *et al.*, 2024) y favorecer su nutrición mineral, produciendo ácidos orgánicos que presentan una función de bioestimulante vegetal/efecto coadyuvante (solubilización) de minerales en el suelo, que permiten a la planta un mayor aprovechamiento de los nutrientes (Yu *et al.*, 2022; Melini *et al.*, 2023).

1.2.2. Simbiosis micorrícica

A la interacción simbiótica entre el micelio de una gran variedad de hongos biótros obligados (simbiontes obligados) y el sistema radicular de una amplia variedad de plantas terrestres se le denomina micorriza, considerándolos los microorganismos rizófilos de mayor importancia para su uso agrícola. Puesto que, los HMA representan cerca del 10 % de la biomasa microbiana de los suelos (Giovannetti *et al.*, 2020; Tedersoo *et al.*, 2020).

1.2.2.1. Hongos micorrícicos arbusculares

El sub-grupo de hongos micorrícicos de mayor importancia es la endomicorriza denominada hongos micorrícicos arbusculares (HMA), del phylum Glomeromycota, clase Glomeromycetes, de las cuales se dividen en cuatro órdenes y 11 familias (Brundrett y Tedersoo, 2018). Las HMA aproximadamente colonizan cerca de 200,000 especies y cerca del 92% de las familias de plantas terrestres, principalmente de interés agrícola como herbáceas, solanáceas, gramíneas, leguminosas, especies arbóreas de interés frutícola y forestal, desarrollando diferentes grados de dependencia (Tedersoo *et al.*, 2020).

1.2.2.2. Proceso de micorrización

La asociación micorrícica da inicio por medio de percepciones de señales recíprocas entre

el hongo y la planta hospedera, denominada fase pre-simbiótica. Al momento que las raíces potencialmente hospedantes emiten señales fitoquímicas conocidas como señales elicitor (elicitor endógeno) hacia las hifas germinadas de las esporas latentes en el suelo. Estas señales detonan reacciones fisiológicas en las plantas en respuesta a las señales elicitor (elicitor exógeno) emitidas por el hongo. Posteriormente, inician los mecanismos de reconocimiento recíproco por medio de reacciones enzimáticas (reducción de catalasas y peroxidasa) para su transducción y no ser reconocido por la planta como un patógeno por los mecanismos reguladores de defensa de la planta (Camarena-Gutiérrez, 2012; Giovannetti *et al.*, 2020). La producción y liberación de estrigolactonas (SL), fitohormonas vegetales relacionadas directamente como moléculas de señalización de las plantas en respuesta a la deficiencia de fósforo en el suelo, son claves durante la simbiosis raíz-hongo micorrízico, jugando un rol importante para la estimulación y ramificación de hifas extraradicales y su extensa red micelial en el suelo (Boyno *et al.*, 2023).

Finalizado el proceso de señales y reconocimiento rápido de moléculas se inicia la fase de formación de células simbióticas. Generando un apresorio o ensanchamiento en su extremo, el cual funciona como puente entre la planta y el micelio de la espora germinada, iniciando la infección y colonización micorrízica por parte de las hifas intracelulares. Donde se promueve la morfogénesis diferencial (ramificación de hifas y red micelial) y su proliferación en el suelo (Camarena-Gutiérrez, 2012). Intracelularmente la penetración del micelio tiene partida desde el punto de entrada del apresorio, hacia la epidermis, corteza y periciclo del tejido vegetal. Por otro lado, los hongos micorrízicos arbusculares, por medio del micelio externo, incrementan considerablemente el área de absorción de las raíces, al extender el sistema radicular (a razón de, por cada centímetro de raíz micorrizada se extiende unos 80 cm de hifas externas) Lo que implica una mejora en la capacidad exploratoria en el suelo para su beneficio mutuo. A esta área de influencia de la raíz micorrizada por el micelio se le denomina “hifosfera” (Jacott *et al.*, 2017).

A partir de la extensión de la red del micelio inter e intracelularmente (morfogénesis diferencial), entre los 12 a 14 días se da inicio de la denominada interfase simbiótica, en la cual comienza la formación de los arbuscúlos (Jacott *et al.*, 2017). Los arbuscúlos son conocidos como la microestructura que sirve como el principal sitio de intercambio de nutrientes, agua y materiales orgánicos entre la planta y el hongo, comenzando la activación de expresiones de genes transportadores para su transcripción como los

transportadores de fosfatos, Cu, Mn, Ca, Zn, Fe, etc. (Camarena-Gutiérrez, 2012). Este órgano específico de los HMA se forma entre el periciclo y endodermis del tejido vegetal. De modo que la translocación de nutrientes se genera a nivel xilema. Posteriormente, al dar inicio a la interfase simbiótica se desarrolla el intercambio bidireccional de minerales y agua entre el hongo-planta. Inversamente inicia el transporte de compuestos carbonados (fotosintatos y ácidos grasos). Durante la interfase simbiótica se generan otra microestructura específica, con un rol funcional de reserva (almacenamiento de energía) y propágulo fúngico o reproductivo, denominada vesículas (Jacott *et al.*, 2017).

1.2.2.3. Hongos micorrícicos-homeostasis de metales del suelo

Los hongos micorrícicos arbusculares son considerados uno de los principales componentes microbianos incidentes en la homeostasis de minerales en el suelo, al desempeñar una función clave como interfaz entre las plantas hospederas, la dinámica y solubilidad de nutrientes como el fósforo, nitrógeno, hierro y zinc (Bhantana *et al.*, 2021).

En este contexto, se han documentado la participación de diferentes mecanismos y estrategias de regulación para la homeostasis de minerales poco móviles en el suelo, principalmente por medio de procesos a nivel proteico (quelación a nivel proteico) mediante glutatión, fitoquelatinas, metalotioneínas y metalochaperonas. La quelación de metales pesados puede verse favorecida por la presencia de la glomalina, excretada por algunos géneros de HMA, principalmente los pertinentes a la familia Glomeraceae, estabilizan la presencia de minerales en el suelo (Ferrol *et al.*, 2016). Por otro lado, el proceso de fitorremediación vía micorrícica, se desarrolla a nivel celular, por medio de una estrategia de protección a la planta hospedera para una mayor respuesta y tolerancia por contaminación de metales pesados, tales como el arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu) y zinc (Zn) (Tan *et al.*, 2023). Alvarado-López *et al.* (2019), determinaron mayores concentraciones de Pb en raíces micorrizadas de *Daucus carota*, establecidas en suelos con altas dosis de Pb. Lo que indica, una redistribución de los minerales hacia las paredes de alta afinidad de los HMA (específicamente las paredes de las esporas) y microestructuras como vacuolas, vesículas e hifas extraradicales. Asimismo, Okon *et al.* (2018), evaluaron la inoculación de *Rhizophagus intraradices* en *Cucurbita máxima*, como regulador de la tasa de fitoextracción y fitorremediación de suelos contaminados por minerales poco móviles (Cu, Zn, Pb, Cr, Cd), fungiendo como amortiguador y redistribuidor de estos elementos hacia diferentes partes del tejido vegetal.

1.2.2.4. Hongos micorrícicos-transportadores de minerales

Durante la fase simbiótica entre la planta y un hongo micorrícico arbuscular se desarrolla un importante flujo bidireccional de nutrientes (minerales) entre el hongo y la planta, regulada por un mecanismo de transcripción genómica y activación-expresión de genes transportadores que permiten a la planta adquirir minerales poco solubles o insolubles en el suelo (Rajapitamahuni *et al.*, 2023). Por ejemplo, el fósforo, el principal mineral movilizado por la simbiosis, es transferido en forma de fosfatos (Pi) por transportadores de alta afinidad. A su vez, el nitrógeno por medio de transportadores de amonio o nitratos (Camarena-Gutiérrez, 2012). Tamayo *et al.* (2014), identificó la principal presencia de actividad transcripcional de los transportadores de minerales se da entre el micelio extraradical y la pared celular de los pelos radiculares de las plantas (que van desde las células epidérmicas, capa cortical y periciclo), a través de la membrana plasmática de la extensa red micelial formada por la interacción hongo-raíz de la planta como primera fase, seguida de la movilidad vía estructuras intracelulares (hifas intraradicales, arbuscúlos, membrana periarbuscular), hasta la transferencia de minerales a la planta.

Recientemente, se han identificado la participación de una variedad de genes transportadores fúngico-planta de alta afinidad, regulando la absorción de minerales absorbidos del suelo hacia la planta (Rahman *et al.*, 2020; Rajapitamahuni *et al.*, 2023). Autores como Kabir *et al.*, (2020), reportan que la colonización micorrícica (red micelial) tiene un efecto positivo en la absorción del Fe en el suelo, mediante la expresión de genes HaFRO1, HaNramp1 y HaIRT1. Además, se han reportado en la expresión de otros grupos de reductasas férricas (permeasas) y ferroxidasa como NRAMP, RISMf1, RISMf2, RISMf3.1, RISMf3.2 (Li *et al.*, 2018; López-Lorca *et al.*, 2022), SbDMAS2, SbNAS2 y SbYS1 (Prity *et al.*, 2020). Así como, ZmNAS1, ZmNAS3 y ZmYS1, que interviene en la solubilidad y absorción de Zn/Fe en las plantas (Chorianopoulou *et al.*, 2015),

En *Rhizophagus irregularis* se han detectado cerca de 30 genes transportadores de minerales como el Fe, Zn, Cu y Mn. De los cuales se identifican ocho familias principales de genes transportadores de minerales, como CTR (Cu), P1b-ATPasa (Cu), SIT (SIT-Fe), OFET (Fe), VIT (Fe/Mn), ZIP (Zn, Mn), CDF (Fe, Zn, Mn) y NRAMP (Fe, Mn, Fe/Mn) (Tamayo *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2021). En otros estudios, Ferrol *et al.* (2016), nos mencionan los principales grupos participantes de transportadores de Mn-Fe (SMF1), Cu fúngico (CTR), Cu vegetal (COPT), Cu-ATPasa (CCC2), Fe-Mn (CCC1.3), Fe permeasa

(FTR1), Zn (ZRT1), permeasa Zn–Fe (ZIP, algunos también transportan Mn) y CDF (Cation Diffusion Facilitador). Por lo antes expuesto, estos mecanismos regulados por medio de un intermediario como los HMA (vía micorrícica), potencialmente influyen en los procesos de fitoextracción-translocación de minerales, acumulando una mayor concentración de nutrientes en las plantas, redistribuyéndolos con mayor eficiencia hacia los tejidos y biomasa vegetal. Lo anterior implica una mejor distribución y concentración de nutrientes minerales en la biomasa y tejido vegetal como frutos, tallos, follaje, brotes y semillas (Tisserant *et al.*, 2013; Ferrol *et al.*, 2016).

1.2.2.5. Hongos micorrícicos-seguridad alimentaria

La inoculación de cultivos agrícolas con hongos micorrícicos arbusculares (HMA) se ha mencionado como una estrategia viable para afrontar la problemática de la inseguridad e insuficiencia alimentaria, transformando a los sistemas agroalimentarios hacia prácticas agrícolas sostenibles (Upadhyay *et al.*, 2019). Los hongos micorrícicos participan directamente en la nutrición mineral de los cultivos asociados, desempeñando un importante rol como biofertilizante o bioestimulante vegetal (Sun y Shahrajabian, 2023). Principalmente por la liberación y estimulación estrigolactonas (SL), Fitohormona, clave para un mayor flujo en el transporte, distribución y equilibrio de minerales en las plantas. Reflejando un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo morfológico de su hospedero (Bhantana *et al.*, 2021). Dicha sinergia entre los HMA y las SL incrementan diversos aspectos agronómicos en su fitosanidad (mayor resistencia a condiciones adversas, plagas y enfermedades), vigorosidad y productividad agrícola (Boyno *et al.*, 2023).

En la última década, se han documentado la intervención de los HMA como reguladores de la calidad en la producción de alimentos, centrándose en incrementar las concentraciones minerales de Zn, Fe, Cu y Mn en tejidos vegetales aprovechables para el consumo humano (Lehmann *et al.*, 2014; Lehmann y Rillig, 2015). Hallazgos recientes, reportan en cultivos básicos una influencia positiva en la calidad de granos agrícolas (Zhang *et al.*, 2019), incrementando el perfil mineral de N, P, Zn y Fe en cereales como sorgo (Nakmee *et al.*, 2016), garbanzo (Pellegrino y Bedini, 2014; Golubkina *et al.*, 2020a), arroz (Gontia-Mishra *et al.*, 2017), cebada (Coccina *et al.*, 2019), trigo (Pellegrino *et al.*, 2015; Ercoli *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2019; Gupta *et al.*, 2022) y maíz (Subramanian *et al.*, 2013; Suganya *et al.*, 2020). En particular, las perspectivas de la asociación de cultivos agrícolas con HMA se han encaminado a mejorar la calidad de las cosechas para una buena aceptación en el

mercado y un valor añadido, al incrementar los principales atributos sensoriales (sabor, color, olor, textura) y nutrimentales en cultivos alternativos, como leguminosas, semillas oleaginosas, forrajes comestibles, frutas y hortalizas (Rouphael *et al.*, 2015; Noceto *et al.*, 2021). En el Cuadro 1 se recopilan estudios relacionados con la calidad de las cosechas agrícolas asociados con HMA, en relación a su composición mineral, nutracéutica, peso, tamaño, parámetros sensoriales y organolépticos.

Cuadro 1. Revisión de las principales contribuciones de la asociación micorrícica arbuscular con cultivos alternativos en relación a su incremento de su fitoquímica, la calidad nutrimental, sensorial y rendimiento en cosecha (tamaño y peso).

Especie	Efecto principal	Referencias
Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	Mejora el desarrollo de peso y tamaño en fruto; Incremento la composición de fenoles, flavonoides, solidos solubles y capacidad antioxidante en fruto	Alvarado-Carillo <i>et al.</i> , 2018; López-Morales <i>et al.</i> , 2022
Frijol negro (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Incrementa el contenido de P, K, Cu y Zn	Carrara <i>et al.</i> , 2023
Calabacita Zucchini (<i>Cucurbita pepo</i>)	Mejora el desarrollo del fruto (peso y tamaño).	Alvarado-Carillo <i>et al.</i> , 2018
Calabaza (<i>Cucurbita moschata</i>)	Mejora el desarrollo del fruto (peso y tamaño).	Carrara y Heller, 2022
Achicoria común (<i>Cichorium intybus</i> ,)	Incrementa el contenido de Fe, Zn, fructuosa, inulina y compuestos carotenoides	Pepe <i>et al.</i> , 2022
Fresa (<i>Fragaria X ananassa</i>)	Incrementa la composición de fenoles, flavonoides, solidos solubles y Se	Cecatto <i>et al.</i> , 2016, Todeschino <i>et al.</i> , 2018; Antoniou <i>et al.</i> , 2021
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Mejora el desarrollo del fruto (peso y tamaño). Incrementa las concentraciones de N, P, Cu, capacidad antioxidante y contenido de carotenoides (licopeno). Mejora la textura, pH, contenido de sólidos solubles, fenoles y ácidos orgánicos del fruto	Di Martino <i>et al.</i> , 2019 Mohammed <i>et al.</i> , 2023; Mena-Echeverría <i>et al.</i> , 2024; Pellegrino <i>et al.</i> , 2024
Piña (<i>Ananas comosus</i>)	Aumenta el peso y tamaño en fruto	Dora-Trejo <i>et al.</i> , 2021 Campos-Mota <i>et al.</i> , 2004
Frambuesa (<i>Rubus idaeus</i>)	Incrementa el contenido de azúcares y ácidos orgánicos	Golubkina <i>et al.</i> , 2020b; Yang <i>et al.</i> , 2021; Pabrita y John, 2024
Ajo (<i>Allium sativum</i>)	Incrementa la composición de Se	
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	Incrementa la composición de Se, Ca, ácido ascórbico (vitamina C), tiamina (vitamina B1), actividad antioxidante y ácidos orgánicos	Rozpądek, <i>et al.</i> , 2016; Golubkina <i>et al.</i> , 2020b; Pabrita y John, 2024
Puerros silvestres (<i>Allium tricocum</i>)	Mejora el desarrollo del fruto (peso y tamaño). Incrementa en los valores nutraceúticos y composición mineral	Pabrita y John, 2024

Chile pimiento (<i>Capsicum annuum</i>)	Incrementa de clorofila, Fe, Zn, N y P en follaje. Mejora el desarrollo del fruto (peso y tamaño).	Díaz-Franco <i>et al.</i> , 2013
Chile piquín (<i>Capsicum annuum</i> var. <i>Glabriusculum</i>)	Incrementa en el contenido de fenoles, sólidos solubles y vitaminas	Mendoza-Villarreal <i>et al.</i> , 2021
Papaya (<i>Carica papaya</i>)	Aumenta en el contenido de azúcares	Vázquez-Hernández <i>et al.</i> , 2011
Melón (<i>Cucumis melo</i>)	Incrementa el espesor de pulpa, grosor de cáscara (textura), contenido de azúcares, concentraciones de proteínas, polifenoles, flavonoides, carotenoides y ácido ascórbico. Aumento de peso y tamaño en fruto.	Benkebboura <i>et al.</i> , 2023; Miceli <i>et al.</i> , 2023
Moringa (<i>Moringa oleífera</i>)	Incrementa su composición de Cu, Zn y glucosinolatos en follaje	Cosme <i>et al.</i> , 2014
Poléo (<i>Mentha pulegium</i>)	Incrementa el contenido de azúcares, compuestos carotenoides, fenoles, flavonoides y ácidos orgánicos	Gashgari <i>et al.</i> , 2020
Perejil (<i>Petroselinum hortense</i>)	Mejora el contenido de carotenoides, fenoles, flavonoides y ácidos orgánicos	Gashgari <i>et al.</i> , 2020
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	Incrementa el contenido de fenoles	Avio <i>et al.</i> , 2017
Apio (<i>Apium graveolens</i>)	Incrementa el contenido de Se en tallos y follaje	Huang <i>et al.</i> , 2024
Mandarino (<i>Citrus reticulata</i>)	Mejora el desarrollo del fruto (peso y tamaño). Incrementa el contenido de azúcares, vitamina C, fenoles, flavonoides totales	Zheng <i>et al.</i> , 2014
Naranja (<i>Citrus × sinensis</i>)	Mejora el desarrollo del fruto. Incrementa el contenido de azúcares, vitamina C, fenoles, flavonoides totales	Zheng <i>et al.</i> , 2014
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	Aumenta las concentraciones de Fe, Zn, S, Ca y P en follaje	Rahman <i>et al.</i> , 2020

1.2.3. Calabaza

El género *Cucurbita*, perteneciente a la familia *Cucurbitaceae*, alberga una alta diversidad genética y morfológica en América (centro y sur de América), considerada centro de origen y de su domesticación, asociando su consumo con más de 1000 años de antigüedad (Chomicki *et al.*, 2020). De modo que, cultivada o silvestre, se presenta una amplia diversidad en formas de frutos y semillas (redondas, oblongos, aplanados, ovalados, largas), colores (verdes, naranjas, opacas, pintas), grosor y sabor de la pulpa (Paris, 2016a).

Según su época de cosecha, las calabazas se clasifican en dos grupos: Calabazas de verano (*C. pepo*) y calabazas de invierno (*C. moschata*, *C. maxima*, *C. fictifolia*), (Chomicki *et al.*, 2020). Las calabazas de verano, son consideradas entre los principales 10 productos agrícolas de interés económico (con cerca de 27,000 000 ton/por año de producción), principalmente para el consumo de frutos (maduros e inmaduros), semillas y flores,

generalmente para su uso en la industria alimentaria y uso medicinal (Salehi *et al.*, 2019). En Asia (59.8 %) y Europa (16.8 %), se registran las zonas con mayor producción de especies de calabaza y calabacines. China representa el país con la mayor producción, con más de 7.8 millones de ton al año, representando cerca del 26.6% de la producción mundial. Seguido de la India con el 18.13% (5,073,678 ton por año) (FAOSTAT, 2023). Las especies de calabazas (*Cucurbita* spp.) más cultivada en el mundo son la calabacita *Cucurbita pepo* y las calabazas *Cucurbita máxima*, *Cucurbita ficifolia*, *Cucurbita angyosperma* y *Cucurbita moschata*. No obstante, la comercialización y superficie sembrada en el mundo se expresa mayormente subespecies (subsp.) y variedades mejoradas agrónomicamente, mencionando a la *C. pepo* subsp. *pepo* Var. Grey Zucchini, Cocozelle, morfotipos Scallop, Spaghetti, Crookneck, Acorn, Delicata, Straightneck y *C. pepo* subespecie *ovifera* Var. Texano (Paris *et al.*, 2012). Por sus altos rendimientos, naturaleza prematura ideal para anticipar cosechas (rentabilidad para el productor) y aceptabilidad del consumidor, *C. pepo* “Grey Zucchini”, denominada calabacita italiana, es considerada la especie económicamente de mayor importancia, al ser ampliamente cultivada en el mundo con más de 23 millones de ton producidas por año (FAOSTAT, 2023). Por otro lado, en datos presentados por Gomes *et al* (2020), la calabaza *C. mostacha*, representa la segunda calabaza con mayor importancia económica en el mundo. En China, India y Sri Lanka se registran la mayor relevancia en producción de toneladas por año. Brasil y México, son las regiones en América latina con mayor producción.

1.2.3.1. Calidad nutrimental en calabaza

Las calabazas son un importante producto agrícola, consideradas uno de los 50 alimentos del futuro, por su alto valor nutritivo, accesibilidad y bajo impacto ambiental que genera su cultivo (Wan Shafiin *et al.*, 2021). Además, presenta un importante nicho en la industria agroalimentaria (pastas, mermeladas, semillas, harinas, enlatados, etc.) y perspectivas de uso en el sector farmacológico (propiedades antidiabéticas, actividad antihelmíntica, antifúngica y bacteriana, etc.) (Salehi *et al.*, 2019; Gomes *et al.*, 2020). Recientemente, han tomado relevancia como un alimento para combatir los problemas de seguridad nutricional en sectores vulnerables de la población (Buzigi *et al.*, 2021). Principalmente por sus contenidos en proteína, fibra, antioxidantes, ácidos grasos, compuestos carbonados funcionales (carbohidratos), esteroides, su bajo valor energético (kcal), lípidos y la presencia de ácidos orgánicos como el ácido ascórbico y cítrico (Adnan *et al.*, 2017; Gomes *et al.*,

2020). Diferentes estudios han determinado en cáscara, pulpa y semilla un perfil mineral constituido de macro y micro minerales esenciales y la presencia de compuestos bioactivos, destacando vitaminas A (retinol), B1, C, E (α - y β -tocoferol), fitoquinona, folatos y los 20 aminoácidos esenciales como la alanina, arginina, ácido aspártico, ácido glutámico, valina, prolina, etc. (Kostecka-Gugała *et al.*, 2020). Asimismo, se reporta la presencia de compuestos carotenos (pigmentos), flavonoides y ácidos fenólicos (Kulczynski y Gramza-Michałowska, 2019; Kostecka-Gugała *et al.*, 2020; Men *et al.*, 2021) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Composición mineral, carotenoides, flavonoides y ácidos fenólicos presentes en *Cucurbita moschata* y *Cucurbita pepo*.

	Minerales	Compuestos bioactivos	Referencia
<i>Cucurbita moschata</i>			
Cáscara	Mg, Mn, Na, Cu, Zn, K, Fe	β -caroteno, β -criptoxantina, luteína, quercetina, acacetina, ácido quínico, ácido p-coumarico, cirsiliol, cirsilineol, apigenina, naringina y luteolina	Kim <i>et al.</i> , 2012; Armesto <i>et al.</i> , 2020; Enneb <i>et al.</i> , 2020; Men <i>et al.</i> , 2021
Pulpa	Mn, Mg, Na, Fe, Zn, Ca, Cu	luteína, β -caroteno, β -criptoxantina, zeaxantina, α -caroteno, rutina, ácido gálico, quercetina, acacetina, ácido quínico, ácido p-coumarico, kaempferol, isoquercetina, astrágalo, miricetina, ácido protocatequico, ácido 4-hidroxibenzoico, ácido vanílico, ácido clorogénico, ácido cafeico, ácido P-cumárico, ácido ferúlico, ácido sinápico, cirsiliol, cirsilineol, apigenina, naringina y luteolina	Jacobo-Valenzuela <i>et al.</i> 2011; Priori <i>et al.</i> , 2016; Enneb <i>et al.</i> , 2020; Armesto <i>et al.</i> , 2020; Chi-Sánchez <i>et al.</i> , 2020; Kostecka-Gugała <i>et al.</i> , 2020; Men <i>et al.</i> , 2021
Semilla	Mn, Mg, P, K, Fe, Zn, Ca, Cu	quercetina, acacetina, ácido quínico, ácido p-coumarico, cirsiliol, cirsilineol, apigenina, naringina y luteolina	Chi-Sánchez <i>et al.</i> , 2020; Enneb <i>et al.</i> , 2020
<i>Cucurbita pepo</i>			
Cáscara	Ca, Mg, Mn, Na, Cu, Zn, K, Fe	β -caroteno; β -criptoxantina	Kim <i>et al.</i> , 2012; Martínez-Valdivieso <i>et al.</i> , 2015
Pulpa	Ca, Mg, Mn, P, K, Na, Cu, Zn, K, Fe	β -caroteno; β -criptoxantina, zeaxantina, luteína, ácido gálico, kaempferol, isoquercetina, astrágalo, miricetina, ácido protocatequico, ácido vanílico, ácido clorogénico, ácido cafeico, ácido P-cumárico, ácido ferúlico, ácido sinápico, cirsilineol, apigenina, naringina y luteolina	Kim <i>et al.</i> , 2012; Martínez-Valdivieso <i>et al.</i> , 2015; Kostecka-Gugała <i>et al.</i> , 2020
Semilla	Ca, Mg, Mn, Na, Cu, Zn, K, Fe	catequina, ácido vanílico, ácido gálico, ácido p-hidroxibenzoico, epicatequina, ácido p-cumárico, el ácido cafeico, ácido ferúlico, rutina	Elinge <i>et al.</i> , 2012; Peirretti <i>et al.</i> , 2017; Peng <i>et al.</i> , 2021

1.2.4. Importancia de la calabaza en México

Las calabazas representan un importante recurso fitogenético en México, considerado su centro de origen primario (Chomicki *et al.*, 2020). Asimismo, constituyen un componente

importante en los sistemas de producción tradicionales, ocupando el segundo lugar de importancia como cultivo estructural del sistema tradicional “milpa”, frecuentemente asociadas al maíz y leguminosas como el frijol (Ruelas-Hernández *et al.*, 2015). Por su valor económico, representa una fuente importante de alimentos accesibles (1.6 kg per cápita) para la familia y un pequeño respaldo a la economía local de los pequeños productores (Salazar-Barrientos *et al.*, 2016). Para su producción se aprovechan las especies domesticadas *Cucurbita moschata* (calabaza), *Cucurbita pepo* (calabacita), *Cucurbita argyrosperma* (calabaza pipiana), *Cucurbita ficifolia* (calabaza chilacayote) y *Cucurbita máxima* (calabaza kabosha/Butter) (Ruelas-Hernández *et al.*, 2015).

En México, existe una diversidad de hábitos de crecimiento y aspectos morfológicos en relación a calabazas. *Cucurbita moschata* o calabaza, representa la de mayor variación genética tanto en frutos (tamaño, calidad de fruto y pulpa), semillas, flores, crecimiento morfológico y ciclo biológico (comportamiento), observando diferentes respuestas en sus características morfológicas y de producción de acuerdo a su comportamiento (Paris, 2016a). En su morfología, se caracteriza por tener semilla pequeña de color blanco a marrón claro, cortezas no lignificadas y dureza moderada, de precocidad de intermedia a tardía, frutos de medianos a grandes (globulares a oblatos, lisas o surcadas), el color del fruto maduro por lo general no es brillante, con mayor frecuencia es de color café, a veces amarillo o verde oscuro, su mesocarpio (pulpa) es gruesa, no amarga, no fibrosa, con coloración anaranjado intenso (Canul-Ku *et al.*, 2005). Al respecto de *C. pepo*, existe una amplia variabilidad morfológica con respecto a forma, color y tamaño de fruto (Paris, 2016b). Los frutos pueden ser ovalados, cilíndricos, aplanados, globulares, festoneado, fusiforme con un cuello curvo/recto en uno o ambos extremos, de endocarpio suave a duro, diverso en colores (desde amarillo, verde claro a oscuro, crema y/o naranja). La pulpa puede ser desde un color blanco, amarillo o naranja (Canul-Ku *et al.*, 2005).

1.2.4.1. *Cucurbita moschata*

La *Cucurbita moschata* Duch, es considera una de las calabazas de importancia a nivel regional, puesto que más del 90 % de su producción es consumida localmente (Ruelas-Hernández *et al.*, 2015). En México, existen pocos datos referentes acerca de la producción, rendimientos y valor económico de la calabaza *C. moschata* (calabaza de castilla). En el 2022, se registró una superficie sembrada de 1,760.87 hectáreas, con una producción de 30, 857.57 ton por año y un valor 220,609.27 pesos mexicanos, exportando cerca el 5.84 % de

su producción. Sonora y Michoacán representan los mayores productores al registrar más del 80 % de su producción (SIAP, 2023). Además, en varias regiones de México su importancia socio-cultural se expresa directamente en su consumo versátil, desde consumir las semillas tostadas y molidas para la preparación de platillos tradicionales, hasta el aprovechamiento de las flores, frutos como verdura (inmaduros) y frutos ya maduros para dulces (Ruelas-Hernández *et al.*, 2020). En el sureste (Yucatán, Campeche y Quintana Roo), su uso no solo se contempla para consumo humano, reportando en varias comunidades mayas como alimento animal para cerdos y gallinas (Canul-Ku *et al.*, 2005).

1.2.4.2. *Cucurbita pepo*

La calabacita *Cucurbita pepo* Linn, criolla y la variedad mejorada “Grey Zucchini” se consideran las variedades de mayor relevancia e interés económico en México (Aguilar-Carpio *et al.*, 2022). La calabacita criolla reportó una producción mayor a las 20,400 ton por año y un valor superior a los 125,900 pesos. *C. pepo* variedad “Grey Zucchini” (calabacita italiana), es considerada una importante hortaliza por su alto valor económico, su consumo y su calidad para su exportación. En el 2022, se reportó una producción mayor a 531,000 toneladas, con un valor de 3,315,906.99 pesos mexicanos. Para el 2023, se reportaron un valor de producción mayor a los 3,443,000.00. De los 118 países que la cultivan *C. pepo* “Grey Zucchini”. México se ubica en el 5to lugar productor a nivel mundial, al representar el 2.6 % de la producción mundial. Exportando a Estados Unidos, Japón y Canadá, el primero, representando más del 95 % de su producción (SIAP, 2023).

A nivel nacional, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) menciona a la variedad “Grey Zucchini” entre los primeros 10 cultivos hortícolas de relevancia en producción, representando el 3.5 % de participación agrícola (con una superficie sembrada de 26,067.19 hectáreas). La calabacita presenta un rendimiento promedio a nivel nacional de 21.22 ton por hectárea y una producción de 551,885.55 ton por año. Los estados de Sonora, Sinaloa, Puebla, Hidalgo, Michoacán, y Zacatecas, se consideran los de mayor importancia en producción. Donde, Sonora, aporta el 26.23 % de la producción nacional con 144,781.27 toneladas por año. En el estado de Yucatán, la producción de calabacita italiana se ubica entre los primeros 10 productores a nivel nacional con una producción mayor a los 18,400 ton por año y un valor superior a los 129,000,00 pesos mexicanos. Las zonas con mayores índices de producción se ubican en la zona poniente del estado (Ticul, Oxxutzcab y Tekax), con más del 70 % de su producción (SIAP, 2023).

1.3. HIPÓTESIS

La asociación de hongos micorrícicos arbusculares mejora la extracción, translocación y transferencia de elementos minerales del suelo hacia la planta. Lo que implicaría, un efecto favorable en el crecimiento morfológico del cultivo, calidad de cosecha, (peso, diámetro polar y ecuatorial) y mejora en los atributos poscosecha (aspectos fisicoquímicos) en frutos de *Cucurbita pepo* Linn, de la variedad “Grey Zucchini” y *Cucurbita moschata* Duch.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la inoculación de hongos micorrícicos arbusculares nativos sobre la calidad de cosecha y en los atributos poscosecha en frutos de calabacita *Cucurbita pepo* variedad “Grey Zucchini” y calabaza *Cucurbita moschata*.

1.4.2. Objetivos específicos

- I. Determinar el comportamiento de *Cucurbita pepo*, variedad “Grey Zucchini” como medio de propagación de hongos micorrícicos arbusculares nativos inoculados en suelos con distinto manejo de uso del suelo (sistema agrícola, sistema multipropósito y vegetación secundaria).
- II. Determinar la influencia de la inoculación de hongos micorrícicos arbusculares nativos y un inoculante micorrícico comercial en relación al crecimiento morfológico del cultivo, calidad de cosecha y atributos poscosecha en frutos de *Cucurbita pepo*, variedad “Grey Zucchini” y *Cucurbita moschata*, bajo condiciones de campo.

1.5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.



Figura 1. Procedimiento experimental propuesto para el proyecto de tesis doctoral.

Etapa I: El inóculo nativo de HMA se obtuvo en un sistema agrícola, multipropósito y sistema natural. *Etapa II:* Se estableció un diseño de parcelas divididas (seis tratamientos y 14 de repeticiones): T1-Cepa nativa 1 de HMA (sistema agrícola) +50% de fertilización química; T2-Cepa nativa 2 (sistema multipropósito) de HMA+50% de fertilización química; T3-Cepa nativa 3 (vegetación secundaria) de HMA+50% de fertilización química; T4-GLUMIX® +50% de fertilización química; T5-100% de fertilización química (160N-100P-160 K) y testigo (sin inoculación y fertilización). Para el análisis poscosecha los parámetros fueron: pH, acidez titulable, colorimetría, textura, % de humedad y ceniza. Para la evaluación micorrizica se empleó la determinación de colonización de Phillips and Hayman (1970), % de colonización de Newman, 1966 y extracción de esporas de Gerdemann and Nicolson (1963), método de cuadrantes (Sieverding, 1990).

LITERATURA CITADA.

- Adnan M, Gul S, Batool S, Fatima B, Rehman A, Yaqoob A, Shabir H, Yousaf T, Mussarat S, Ali N, Khan SN, Rahman H, Aziz MA. 2017. A review on the ethnobotany, phytochemistry, pharmacology and nutritional composition of *Cucurbita pepo* L. J Phytopharmacol 6(2):133-139. <https://doi.org/10.31254/phyto.2017.6211>
- Aguilar-Carpio C, Cervantes-Adame YF, Sorza-Aguilar P J, Escalante-Estrada JSA. 2022. Crecimiento, rendimiento y rentabilidad de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) fertilizada con fuentes químicas y biológicas. Terra Latinoamericana 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1059>.
- Agnolucci M, Avio L, Palla M, Sbrana C, Turrini A, Giovannetti M. 2020. Health-Promoting Properties of Plant Products: The Role of Mycorrhizal Fungi and Associated Bacteria. Agronomy 10: 1864. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121864>
- Alvarado-Carrillo M, Díaz-Franco A, Alejandro-Allende F. 2018. Gallinaza, micorriza arbuscular y fertilización química reducida en la productividad de calabacita y pepino. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 34(2): 273-279. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.02.08>
- Alvarado-López CJ, Dasgupta-Schubert N, Ambriz JE, Arteaga-Velazquez JC, Villegas J A. 2019. Lead uptake by the symbiotic *Daucus carota* L.–*Glomus intraradices* system and its effect on the morphology of extra-and intraradical fungal microstructures. Environmental Science and Pollution Research, 26: 381-391. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3569-7>
- Ahmed N, Zhang B, Chachar Z, Li J, Xiao G, Wang Q, Hayat F, Deng L, Narejo MN, Bazdar B, Tu, P. 2024. Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. Scientia Horticulturae, 323: 112512. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512>
- Antoniou O, Chrysargyris A, Xylia, P, Tzortzakis N. 2021. Effects of selenium and/or arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on strawberry grown in hydroponic trial. Agronomy, 11(4): 721. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040721>
- Armesto J, Rocchetti G, Senizza B, Pateiro M, Barba FJ, Domínguez R, Lucini L, Lorenzo JM. 2020. Nutritional characterization of Butternut squash (*Cucurbita moschata* D.): Effect of variety (Ariel vs. Pluto) and farming type (conventional vs. organic)

- Food Research International 132: 109052.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109052>
- Avio L, Sbrana C, Giovannetti M, Frassinetti S. 2017. Arbuscular mycorrhizal fungi a effect total phenolics content and antioxidantactivity in leaves of oak leaf lettuce varieties. Scientia Horticulturae 224: 265–271.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.06.022>
- Benkebboura A, Zoubi B, Akachoud O, Gholam C, Qaddoury A. 2023. Field inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi improves quality attributes and yield of melon (*Cucumis melo*). The Journal of Horticultural Science and Biotechnology: 1-17.
<https://doi.org/10.1080/14620316.2023.2272150>
- Bhantana P, Rana MS, Sun XC, Moussa MG, Saleem MH, Syaifundin M, Shah A, Poudel A, Pun AB, Bhat MA, Mandal DL, Shah S, Zhihao D, Tan Q, Hu, CX. 2021.. Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. Symbiosis 84: 19-37.
<https://doi.org/10.1007/s13199-021-00756-6>
- Brundrett MC, Tedersoo L. 2018. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. New Phytologist, 220(4): 1108-1115.
<https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- Bona E, Cantamessa S, Massa N, Manassero P, Marsano F, Copetta A, Lingua G, D'Agostino G, Gamalero E, Berta G. 2017. Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting pseudomonads improve yield, quality and nutritional value of tomato: a field study. Mycorrhiza 27: 1–11.
<https://doi.org/10.1007/s00572-016-0727-y>
- Bona E, Lingua G, Manassero P, Cantamessa S, Marsana F, Todeschini V, Copetta A, D'Angostino G, Massa N, Gamalero E, Berta G. 2015. AM fungi and PGP pseudomonads increase flowering, fruit production, and vitamin content in strawberry grown at low nitrogen and phosphorus levels. Mycorrhiza 25: 181–193.
<https://doi.org/10.1007/s00572-014-0599-y>
- Boyno G, Rezaee Danesh Y, Demir S, Teniz N, Mulet JM, Porcel R. 2023. The Complex Interplay between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Strigolactone: Mechanisms, Sinergies, Applications and Future Directions. International Journal Molecular. Sciencies 24: 16774. <https://doi.org/10.3390/ijms242316774>

- Buzigi E, Pillay K, Siwela M. 2021. Potential of pumpkin to combat vitamin A deficiency during complementary feeding in low and middle income countries: variety, provitamin A carotenoid content and retention, and dietary reference intakes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(22): 6103-6112. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1896472>
- Canul-Ku J, Ramírez-Vallejo P, Castillo-González F, Chávez-Servia JL. 2005. Diversidad morfológica de calabaza cultivada en el centro-oriente de Yucatán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28(4): 339-349. <https://doi.org/10.35196/rfm.2005.4.339>
- Camarena-Gutiérrez G. 2012. Interacción planta-hongos micorrizicos arbusculares. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(3): 409-421. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.11.093>
- Campos-Mota L, Baca-Castillo GA, Contreras DJ, Lúa AM, Hernández RA. 2004. Fertirriego y micorriza en frambuesa roja cultivada en tepetate. *Agrociencia*, 38(1): 75-83. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30238108.pdf> (Recuperado: 21 de mayo de 2022).
- Carrara JE, Heller WP. 2022. Arbuscular mycorrhizal species vary in their impact on nutrient uptake in sweet corn (*Zea mays*) and butternut squash (*Cucurbita moschata*). *Frontiers in Agronomy*, 4: 1040054. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.1040054>
- Carrara JE, Reddivari L, Heller WP. 2023. Inoculation of black turtle beans (*Phaseolus vulgaris*) with mycorrhizal fungi increases the nutritional quality of seeds. *Plant-Environment Interactions*:1–10. <https://doi.org/10.1002/pei3.10128>
- Cecatto AP, Ruiz FM, Calvete EO, Martínez J, Palencia P. 2016. Mycorrhizal inoculation affects the phytochemical content in strawberry fruits. *Acta Scientiarum. Agronomy* 38 (2): 227–237. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v38i2.27932>
- Chávez-González JD, Flores-Núñez VM, Merino-Espinoza IU, Partida-Martínez LP. 2024. Desert plants, arbuscular mycorrhizal fungi and associated bacteria: Exploring the diversity and role of symbiosis under drought. *Environmental Microbiology Reports*, 16(4): e13300. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13300>
- Chi-Sánchez FA, Alvarado-López CJ, Cristóbal-Alejo J, Reyes-Ramírez A. 2020. Características morfológicas y determinación de minerales por μ -xrf en fruto de

- calabaza (*Cucurbita moschata* DUCH). *Agrociencia* 54(5): 683-690. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i5.2125>
- Chomicki G, Schaefer H, Renner SS. 2020. Origin and domestication of cucurbitaceae crops: insights from phylogenies, genomics and archaeology. *New Phytologist* 226: 1240–1255. <https://doi.org/10.1111/nph.16015>
- Chorianopoulou SN, Saridis YI, Dimou M, Katinakis P, Bouranis DL. 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters the expression patterns of three key iron homeostasis genes, ZmNAS1, ZmNAS3, and ZmYS1, in S deprived maize plants. *Frontiers in Plant Science* 6:257. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00257>
- Coccina A, Cavagnaro TR, Pellegrino E, Ercoli L, McLaughlin MJ, Watts-Williams S. 2019. The mycorrhizal pathway of zinc uptake contributes to zinc accumulation in barley and wheat grain. *BMC Plant Biology* 19: 133. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1741-y>
- Cosme M, Franken P, Mewis I, Baldermann S, Wurst S. 2014. Arbuscular mycorrhizal fungi affect glucosinolate and mineral element composition in leaves of *Moringa oleifera*. *Mycorrhiza* 24: 565-570. <https://doi.org/10.1007/s00572-014-0574-7>
- Das S, Green A, Fan MX. 2019. Zinc deficiency in Indian soils is associated with low crop productivity and crop quality. *Better Crops–South Asia*, 11: 11-14. [http://www.ipni.net/publication/bca.nsf/0/FB4685DE3819A56E852583CB00625D31/\\$FILE/BCSA%202019-1-11.pdf](http://www.ipni.net/publication/bca.nsf/0/FB4685DE3819A56E852583CB00625D31/$FILE/BCSA%202019-1-11.pdf). (Recuperado: marzo de 2023)
- Dhiman K, Sharma D, Kumari R, Tomar P. 2023. Biofortification of crops using microbes—a promising sustainable agriculture strategy. *Journal of Plant Nutrition* 46(12): 2912-2935. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2160755>
- Díaz-Franco A, Alvarado-Carrillo M, Ortiz-Chairez F, Grageda-Cabrera O. 2013. Nutrición de la planta y calidad de fruto de pimiento asociado con micorriza arbuscular en invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 4(2):315-321. <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i2.1251>
- Di Martino C, Fioretto A, Palmieri D, Torino V, Palumbo G. 2019. Influence of Tomato plant mycorrhization on nitrogen metabolism, Growth and Fructification on P-Limited Soil. *Journal of Plant Growth Regulation* 38: 1183–1195. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09923-y>
- Durán P, Viscardi S, Acuña JJ, Cornejo P, Azcón R, Mora M. 2018. Endophytic

- selenobacteria and arbuscular mycorrhizal fungus for Selenium biofortification and *Gaeumannomyces graminis* biocontrol. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 18(4): 1021-1035. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005002902>
- Elinge CM, Muhammad A, Atiku FA, Itodo AU, Peni IJ, Sanni OM, Mbongo AN. 2012. Proximate, mineral and anti-nutrient composition of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds extract. International Journal of Plant Research 2(5):146-150. <https://doi.org/10.5923/j.plant.20120205.02>
- Emmanuel OC, Babalola OO. 2020. Productivity and quality of horticultural crops through co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting bacteria. Microbiological Research 239:126569. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126569>
- Enneb S, Drine S, Bagues M, Triki T, Boussora F, Guasmi F, Nagaz K, Ferchichi A. 2020. Phytochemical profiles and nutritional composition of squash (*Cucurbita moschata* D.) from Tunisia. South African Journal of Botany 130: 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.011>
- Ercoli L, Schüssler A, Arduini I, Pellegrino E. 2017. Strong increase of durum wheat iron and zinc content by field-inoculation with Arbuscular mycorrhizal fungi at different soil nitrogen availabilities. Plant and Soil 419:153–167. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3319-5>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2021. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021. FAO, ONU, FAOSTAT. Roma, Italia. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2022. Soils for nutrition: state of the art. Roma, Italia. FAO, ONU. <https://doi.org/10.4060/cc0900en>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2023a. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023. Roma, Italia. <https://doi.org/10.4060/cc8166en>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2023b. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023. Urbanización, transformación de los sistemas agroalimentarios y dietas saludables a lo largo del continuo rural-urbano. Roma, Italia. FAO, FIDA, OMS, PMA, UNICEF. <https://doi.org/10.4060/cc3017es>
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). 2023. Base

- de datos, cultivos (producción). Food and agriculture Organization of the United
<https://www.fao.org/faostat/es/?#data/QCL/visualize> (Recuperado: marzo de 2023)
- Ferrol N, Tamayo E, Vargas P. 2016. The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: from mechanisms to biotechnological applications. *Journal of Experimental Botany* 67 (22): 6253–6265. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw403>
- Gamboa-Angulo J, Ruíz-Sánchez E, Alvarado-López C, Gutiérrez-Miceli F, Ruíz-Valdiviezo VM, Medina-Dzul K. 2020. Efecto de biofertilizantes microbianos en las características agronómicas de la planta y calidad del fruto del chile xcat'ik (*Capsicum annuum* L.). *Terra Latinoamericana* 38: 817-826. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.716>
- Gashgari R, Selim S, Abdel-Mawgoud M, Warrad M, Habeeb TH, Saleh, AbdElgawad H. 2020. Arbuscular mycorrhizae induce a global metabolic change and improve the nutritional and health benefits of pennyroyal and parsley. *Acta Physiol Plant* 42: 102. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03091-3>
- Gerdemann JW, Nicolson TH. 1963. Spores of mycorrhizal Endogone species ex-tracted from soil by wet sieving and decanting', *Transactions of the British Mycological Society* 46: 235-244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- Giovannini L, Palla M, Agnolucci M, Avio L, Sbrana C, Turrini A, Giovannetti M. 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi and associated microbiota as plant biostimulants: Research strategies for the selection of the best performing inocula. *Agronomy* 10: 106. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010106>
- Golubkina N, Amagova Z, Matsadze V, Zamana S, Tallarita A, Caruso G. 2020b. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on yield, biochemical characteristics, and elemental composition of garlic and onion under selenium supply. *Plants* 9(1): 84. <https://doi.org/10.3390/plants9010084>
- Golubkina N, Gomez, LD, Kekina H, Cozzolino E, Simister R, Tallarita A, Torino V, Koshevarov A, Cuciniello A, Maiello R, Cenvinzo V, Caruso, G. 2020a. Joint selenium–iodine supply and Arbuscular Mycorrhizal fungi inoculation affect yield and quality of chickpea seeds and residual biomass. *Plants* 9(7): 804. <https://doi.org/10.3390/plants9070804>
- Gomes RS, de Almeida CF, Chagas RR, Júnior RM, Fara JS, da Silva DJH. 2020. Winter squash (*Cucurbita moschata* D.) displays promising nutritional aspects in fruits,

- seeds and in the seed oil. *Journal of Plant Biochemistry & Physiology* 8(2): 248:1-5. <https://doi.org/10.35248/2329-9029.20.8.248>
- Gontia-Mishra I, Sapre S, Tiwari S. 2017. Zinc solubilizing bacteria from the rhizosphere of rice as prospective modulator of zinc biofortification in rice. *Rhizosphere* 3: 185-190. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.04.013>
- Gupta S, Thokchom SD, Koul M., Kapoor R. 2022. Arbuscular Mycorrhiza mediated mineral biofortification and arsenic toxicity mitigation in *Triticum aestivum* L. *Plant Stress* 5: 100086. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100086>
- Huang Z, Wang L, Meng S, Song X, Long R, Huang H, Tang Y, Zhou X, Li, H. 2024. The physiological responses of celery (*Apium graveolens* L.) and its ability to accumulate selenium when inoculated with *Funneliformis mosseae*. *Scientia Horticulturae* 326: 112752. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112752>
- Jacobo-Valenzuela N, de Jesús Zazueta-Morales J, Gallegos-Infante JA, Aguilar-Gutierrez F, Camacho-Hernández IL, Rocha-Guzman NE, Gonzalez-Laredo RF. 2011^a. Chemical and physicochemical characterization of winter squash (*Cucurbita moschata* D.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 39: 34-4. <https://doi.org/10.15835/nbha3915848>
- Jacott CN, Murray JD, Ridout CJ. 2017. Ridout, Trade-offs in arbuscular mycorrhizal symbiosis: disease resistance, growth responses and perspectives for crop breeding. *Agronomy* 7(4): 75. <https://doi.org/10.3390/agronomy7040075>
- Kaur T, Lata Rana K, Kour, D, Sheikh L, Yadav N, Nath Yadav A, Singh Dhaliwal H, Kumar Saxena A. 2020. Microbe-mediated biofortification for micronutrients: present status and future challenges. In *Trends of microbial biotechnology for sustainable agriculture and biomedicine systems: perspectives for human health*. Elsevier, Amsterdam: 1-17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820528-0.00002-8>
- Kabir AH, Debnath T, Das U, Prity SA, Haque A, Rahman MM, Parvez MS. 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate Fe-deficiency symptoms in sunflower by increasing iron uptake and its availability along with antioxidant defense. *Plant Physiology and Biochemistry* 150: 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.03.010>
- Kim MY, Kim EJ, Kim YN, Choi C, Lee BH. 2012. Comparison of the chemical compositions and nutritive values of various pumpkin (Cucurbitaceae) species and

- parts. Nutrition Research and Practice 6(1): 21-27.
<https://doi.org/10.4162/nrp.2012.6.1.21>
- Koske RE, Gemma JN. 1989. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas, Mycological Research 92(4):486–505.
[https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(89\)80195-9](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(89)80195-9)
- Kostecka-Gugała A, Kruczek M, Ledwożyw-Smoleń I, Kaszycki P. 2020. Antioxidants and health-beneficial nutrients in fruits of eighteen Cucurbita cultivars: Analysis of diversity and dietary implications. Molecules 25(8): 1792.
<https://doi.org/10.3390/molecules25081792>
- Kulczynski B, Gramza-Michałowska A. 2019. The Profile of Secondary Metabolites and Other Bioactive Compounds in *Cucurbita pepo* L. and *Cucurbita moschata* Pumpkin Cultivars. Molecules. 24: 2945.
<https://doi.org/10.3390/molecules24162945www>
- Kumari K, Patra A, Sahu KP, Dilawari R, Mehta S. 2023. Nutritional Biofortification of Crops by Microbes. En Sustainable Agriculture Reviews 60: Microbial Processes in Agriculture Cham: Springer Nature Switzerland. pp: 269-292.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-24181-9_11
- Kutman UB. 2023. Mineral nutrition and crop quality. In Marschner's Mineral Nutrition of Plants. Academic Press. pp 419-444. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00020-4>
- Lehmann A, Veresoglou SD, Leifheit EF, Rillig MC. 2014. Arbuscular mycorrhizal influence on zinc nutrition in crop plants—A meta-analysis. Soil 69: 121-131.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.001>
- Lehmann A, Rillig MC. 2015. Arbuscular mycorrhizal contribution to copper, manganese and iron nutrient concentrations in crops—A meta-analysis. Soil Biology and Biochemistry 81:147–58. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.013>
- Li M, Wang R, Tian H, Gao Y. 2018. Transcriptome responses in wheat roots to colonization by the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis*. Mycorrhiza, 28: 747–759. <https://doi.org/10.1007/s00572-018-0868-2>
- López-Morales ML, Leos-Escobedo L, Alfaro-Hernández L, Morales-Morales AE. 2022. Impacto de abonos orgánicos asociados con micorrizas sobre rendimiento y calidad nutraceutica del Pepino. Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas 13

(5):785-98. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.2868>.

- López-Lorca VM, Molina-Luzón MJ, Ferrol N. 2022. Characterization of the NRAMP Gene Family in the Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Rhizophagus irregularis*. *Journal of Fungi* 8(6): 592. <https://doi.org/10.3390/jof8060592>
- Ma X, Luo W, Li J, Wu F. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi increase both concentrations and bioavailability of Zn in wheat (*Triticum aestivum* L) grain on Zn-spiked soils. *Applied Soil Ecology*, 135: 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.11.007>
- Martínez-Valdivieso D, Gómez P, Font R, Río-Celestino MD. 2015. Mineral composition and potential nutritional contribution of 34 genotypes from different summer squash morphotypes. *European Food Research and Technology* 240: 71-81. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2308-7>
- Melini F, Melini V, Luziatelli F, Abou-Jaoudé R, Ficca AG, Ruzzi M. 2023. Effect of microbial plant biostimulants on fruit and vegetable quality: current research lines and future perspectives. *Frontiers in Plant Science* 14: 1251544. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1251544>
- Mena-Echevarría A, Ramírez-Tobias HM, Méndez-Cortés H, Rojas-Velázquez ÁN, López-Palacios C, Hipólito-Piedras RP. 2024. The Origin and Type of Inoculum Determine the Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Tomato under Different Irrigation Regimes. *Agronomy* 14: 1687. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081687>
- Men X, Choi SI, Han X, Kwon GY, Jang GW, Choi YE, Park SM, Lee OH. 2021. Physicochemical, nutritional and functional properties of *Cucurbita moschata*. *Food Science Biotechnology* 30: 171-183. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00835-2>
- Mendoza-Villarreal R, Robledo-Torres V, Pérez-Rodríguez MÁ, Guillén-Enríquez RR, Martínez-Cueto V, Paredes-Jácome JR. 2021. Impacto de cubierta, ecotipo y endomicorriza en morfología y calidad de chile piquín. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12(2): 193-204. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2847>
- Miceli A, Vetrano F, Torta L, Esposito A, Moncada A. 2023. Effect of Mycorrhizal Inoculation on Melon Plants under Deficit Irrigation Regimes. *Agronomy* 13(2): 440. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020440>

- Mohammed HA, Aljabary AMAO, Halshoy HS, Hama JR, Rashid HA, Rashid HW. 2023. Soil-borne microbes, natural stimulants, and post-harvest treatments alter quality and phytochemicals of tomato fruit. *International Journal of Vegetable Science* 29 (6):1-13. <https://doi.org/10.1080/19315260.2023.2272838>
- Nakmee PS, Techapinyawat S, Ngamprasit S. 2016. Comparative potentials of native arbuscular mycorrhizal fungi to improve nutrient uptake and biomass of *Sorghum bicolor* Linn. *Agriculture and Natural Resources* 50:173e178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anres.2016.06.004>
- Newman, E.I. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *Journal of Applied Ecology* 3:139-145. <https://doi.org/10.2307/2401670>
- Noceto AP, Bettenfeld P, Boussageon R, Hériché M, Sportes A, van Tuinen D, Courty PE, Wipf. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi, a key symbiosis in the development of quality traits in crop production, alone or combined with plant growth-promoting bacteria. *Mycorrhiza* 31:655–669. <https://doi.org/10.1007/s00572-021-01054-1>
- Okon OG, Okon JE, Eneh GDE. 2018. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) as Buffer for Heavy Metals Phytoextraction by *Cucurbita maxima* Duch. Grown on Crude Oil Contaminated Soil. *Journal of Horticulture and Plant Research* 3: 1-12. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/JHPR.3.1>
- Ordookhani K, Moezi A, Khavazi K, Rejali F. 2013. Effect of plant growth promoting rhizobacteria and mycorrhiza on tomato fruit quality. *Acta Horticulturae*. 989: 91-96. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.989.9>
- Pabitra A, John F. 2024. Meta-Analysis: Impact of AMF Colonization on Allium Species. *Archives of Agriculture Research and Technology* 5: 1073. <https://doi.org/10.54026/AART/1073>
- Paris HS, Lebeda A, Křistkova E, Andres TC, Nee MH. 2012. Parallel evolution under domestication and phenotypic differentiation of the cultivated subspecies of *Cucurbita pepo* (Cucurbitaceae). *Economic Botany* 66: 71–90 <https://doi.org/10.1007/s12231-012-9186-3>
- Paris HS. 2016a. Genetic Resources of Pumpkins and Squash, *Cucurbita* spp. In: Grumet, R., Katzir, N., Garcia-Mas, J. (eds) *Genetics and Genomics of Cucurbitaceae*. *Plant Genetics and Genomics: Crops and Models*, 20, pp: 111-141. Springer,

- Cham. https://doi.org/10.1007/7397_2016_3
- Paris HS. 2016b. Germplasm enhancement of *Cucurbita pepo* (pumpkin, squash, gourd: Cucurbitaceae): progress and challenges. *Euphytica* 208: 415–438. <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1605-y>
- Philips JM, Hayman DS. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55:158-161. [https://doi.org/10.1016/s0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/s0007-1536(70)80110-3)
- Peiretti PG, Meineri G, Gai F, Longato E, Amarowicz R. 2017. Antioxidative activities and phenolic compounds of pumpkin (*Cucurbita pepo*) seeds and amaranth (*Amaranthus caudatus*) grain extracts. *Natural Product Research* 31(18): 2178-2182. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1278597>
- Pellegrino E, Arcidiacono M, Francini A, Ercoli L. 2024. Arbuscular mycorrhizal fungi with contrasting life-history strategies differently affect health-promoting compounds in field-grown tomato by changing arbuscule occurrence and mycorrhizal assemblages in roots *Biology and Fertility of Soils* 60:115–136. <https://doi.org/10.1007/s00374-023-01778-6>
- Pellegrino E, Bedini S. 2014. Enhancing ecosystem services in sustainable agriculture: biofertilization and biofortification of chickpea (*Cicer arietinum* L.) by arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry* 68: 429-439. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.030>
- Pellegrino E, Öpik M, Bonari Ercoli EL. 2015. Responses of wheat to arbuscular mycorrhizal fungi: a meta-analysis of field studies from 1975 to 2013. *Soil Biology and Biochemistry* 84:210–217. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.020>
- Peng M, Lu D, Liu J, Jiang B, Chen J. 2021. Effect of roasting on the antioxidant activity, phenolic composition, and nutritional quality of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds. *Frontiers in Nutrition* 8: 647354. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.647354>
- Pepe A, Di Baccio D, Magnani E, Giovannetti M, Sbrana C. 2022. Zinc and Iron Biofortification and Accumulation of Health-Promoting Compounds in Mycorrhizal *Cichorium intybus* L. *Journal Soil Science Plant Nutrition* 22: 4703-4716. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00953-2>

- Priori D, Valduga E, Villela JCB, Mistura CC, Vizzotto M, Valgas, R, Barbieri RL. 2016. Characterization of bioactive compounds, antioxidant activity and minerals in landraces of pumpkin (*Cucurbita moschata*) cultivated in Southern Brazil. Food Science and Technology 37: 33-40. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.05016>
- Prity SA, Sajib SA, Das U, Rahman MM, Haider SA, Kabir AH. 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi mitigate Fe deficiency symptoms in sorghum through phytosiderophore-mediated Fe mobilization and restoration of redox status. Protoplasma 257: 1373-1385. <https://doi.org/10.1007/s00709-020-01517-w>
- Rajapitamahuni S, Kang BR, Lee TK. 2023. Exploring the Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant–Iron Homeostasis. Agriculture 13 (10): 1918. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101918>
- Rahman MA, Parvin M, Das U, Ela EJ, Lee SH, Lee KW, Kabir AH. 2020. Arbuscular mycorrhizal symbiosis mitigates iron (Fe)-deficiency retardation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) through the enhancement of Fe accumulation and sulfur-assisted antioxidant defense. International Journal of Molecular Sciences 21(6): 2219. <https://doi.org/10.3390/ijms21062219>
- Rouphael Y, Franken P, Schneider C, Schwarz D, Giovannetti M, Agnolucci M, De pascale S, Bonini P, Colla, G. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. Scientia Horticulturae, 196: 91-108. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.002>
- Rozpądek P, Rapała-Kozik M, Wężowicz K, Grandin A, Karlsson S, Ważny R, Anielska T, Turnau K. 2016. Arbuscular mycorrhiza improves yield and nutritional properties of onion (*Allium cepa*). Plant Physiology and Biochemistry, 107: 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.006>
- Ruelas Hernández PG, Aguilar Castillo JA, García Paredes JD, Valdivia Bernal R, López Guzmán GG. 2015. Diversidad morfológica de especies cultivadas de calabaza (*Cucurbita* spp.) en el estado de Nayarit. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 6(8): 1845-1856. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i8.500>
- Salehi B, Sharifi-Rad J, Capanoglu E, Adrar N, Catalkaya G, Shaheen S, Jaffer M, Giri L, Suyal M, Jugran AK, Calina D, Docea AO, Kamiloglu S, Kregiel D, Antolok H, Pawlikowska E, Sen S, Acharya K, Bashiry M, Selamoglu Z, Martowell M, Sharopov F, Martins N, Namiesnik J, Cho WC. 2019. Cucurbita plants: from farm

- to industry. *Applied Sciences* 9(16): 3387. <https://doi.org/10.3390/app9163387>
- Salazar-Barrientos LDL, Magaña-Magaña MA, Aguilar-Jiménez AN, Ricalde-Pérez MF. 2016. Factores socioeconómicos asociados al aprovechamiento de la agrobiodiversidad de la milpa en Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3(9): 391-400. <https://doi.org/10.19136/era.a3n9.724>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2023. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Cierre de la producción agrícola. Ciudad de México, México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Recuperado: enero de 2023).
- Sedano-Castro G, González-Hernández VA, Saucedo-Veloz C, Soto-Hernández M, Sandoval-Villa M, Carrillo-Salazar JA. 2011. Rendimiento y calidad de frutos de calabacita con altas dosis de N y K. *Terra latinoamericana* 29(2):133-142. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57321257003.pdf> (Recuperado: junio de 2022)
- Sieverding E. 1990. Ecology of VAM fungi in tropical agrosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 29(1-4): 369-390. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(90\)90303-U](https://doi.org/10.1016/0167-8809(90)90303-U).
- Subramanian KS, Balakrishnan N, Senthil N. 2013. Mycorrhizal symbiosis to increase the grain micronutrient content in maize. *Australian Journal of Crop Science* 7, 900–910. http://www.cropj.com/subramanian_7_7_2013_900_910.pdf (Recuperado: octubre de 2023)
- Suganya A, Saravanan A, Baskar M, Pandiyarajan P, Kavimani R. 2021. Agronomic biofortification of maize (*Zea mays* L.) with zinc by using of graded levels of zinc in combination with zinc solubilizing bacteria and Arbuscular mycorrhizal fungi, *Journal of Plant Nutrition*, 44 (7):988-994, <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1845383>
- Sun W, Shahrajabian MH. 2023. The application of arbuscular mycorrhizal fungi as microbial biostimulant, sustainable approaches in modern agriculture. *Plants* 12(17): 3101. <https://doi.org/10.3390/plants12173101>
- Tan Q, Guo Q, Wei R, Zhu G, Du C, Hu H. 2023. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on bioaccumulation and bioavailability of As and Cd: A meta-analysis. *Environmental Pollution* 316: 120619. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120619>
- Tamayo E, Gómez-Gallego T, Azcón-Aguilar C, Ferrol N. 2014. Genome-wide analysis of

- copper, iron and zinc transporters in the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis*. *Frontiers in Plant Science* 5: 547. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00547>
- Tedersoo L, Bahram M, Zobel M. 2020. How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science* 367(6480): eaba1223. <https://doi.org/10.1126/science.aba1223>
- Tisserant E, Malbreil M, Kuo A. 2013. Genome of an arbuscular mycorrhizal fungus provides insight into the oldest plant symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110:20117-20122. <https://doi.org/10.1073/pnas.1313452110>
- Todeschini V, AitLahmidi N, Mazzucco E, Marsano F, Gosetti F, Robotti E, Bona E, Massa N, Bonneau L, Marengo E, Wipf D, Berta G, Lingua G. 2018. Impact of Beneficial microorganisms on Strawberry Growth, Fruit Production, Nutritional Quality, and Volatilome. *Frontiers In Plant Science* 9:1611. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01611>
- Trejo D, Sangabriel-Conde W, Gavito-Pardo ME, Banuelos J. 2021. Mycorrhizal inoculation and chemical fertilizer interactions in pineapple under field conditions. *Agriculture* 11(10): 934. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100934>
- UIP, FAO. 2021. Nutrición y sistemas alimentarios. Manual para parlamentarios No 32. UIP. FAO. Roma. <https://doi.org/10.4060/cb2005es>
- Upadhayay VK, Singh J, Khan A, Lohani S, Singh AV. 2019. Mycorrhizal Mediated Micronutrients Transportation in Food Based Plants: A Biofortification Strategy. En: Varma A, Choudhary D. (eds) *Mycorrhizosphere and Pedogenesis*, Springer, Singapore. pp: 1-14. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6480-8_1
- Upadhayay VK, Singh AV, Khan A, Sharma A. 2022. Contemplating the role of zinc-solubilizing bacteria in crop biofortification: An approach for sustainable bioeconomy. *Frontiers In Agronomy* 4:903321. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.903321>
- Vázquez-Hernández M.V, Arévalo-Galarza L, Jaen-Contreras D, Escamilla-García JL, Mora-Aguilera A, Hernández-Castro E, Cibrián-Tovar J, Téliz-Ortiz D. 2011. Effect of *Glomus mosseae* and *Entrophospora colombiana* on plant growth, production, and fruit quality of ‘Maradol’ papaya (*Carica papaya* L.). *Scientia Horticulturae* 128(3):255-260. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.01.031>

- Wakeel, A, Farooq, M., Bashir, K, Ozturk, L. 2018. Micronutrient malnutrition and biofortification: recent advances and future perspectives. Plant micronutrient use efficiency: 225-243. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812104-7.00017-4>
- Wan Shafiin WNS, Ablah NL, Nur Fatihah NH, Alam A, Ma'Arup R, Jahan MS, Mustafa KA, Alias N. 2021. Breeding strategies for enhancing nutrient content and quality in Cucurbitaceae: a review. International Journal of Vegetable Science 1-24. <https://doi.org/10.1080/19315260.2020.1833125>.
- Yadav R, Ror P, Rathore P, Ramakrishna, W. 2020. Bacteria from native soil in combination with arbuscular mycorrhizal fungi augment wheat yield and biofortification. Plant Physiology and Biochemistry 150: 222-233. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.039>
- Yadav R, Ror P, Rathore P, Kumar S, Ramakrishna W. 2021. *Bacillus subtilis* CP4, isolated from native soil in combination with arbuscular mycorrhizal fungi promotes biofortification, yield and metabolite production in wheat under field conditions, Journal of Applied Microbiology 131 (1): 339–359, <https://doi.org/10.1111/jam.14951>
- Yang F.,Pan Y, Ali A, Zhang S, Li X, Qi X, Liu H, Meng H, Cheng, Z. 2021. Agronomic biofortification of garlic through selenium and arbuscular mycorrhizal fungi application. Horticulturae 7(8):230. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080230>
- Yu L, Zhang H, Zhang W, Liu K, Liu M, Shao X. 2022. Cooperation between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria and their effects on plant growth and soil quality. PeerJ 10: e13080. <https://doi.org/10.7717/peerj.13080/supp-1>.
- Zhang S, Lehmann A, Zheng W, You Z, Rillig MC. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain yields: A meta-analysis. New Phytologist 222(1): 543-555.<https://doi.org/10.1111/nph.15570>
- Zeng L, Li J, Liu J, Wang M 2014. Effects of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on citrus fruit quality under nature conditions. Southwest China Journal of Agricultural Sciences 27(5):2101–2105. <https://doi.org/10.16213/j.cnki.scjas.2014.05.067>
- Zhou X.; LJ, Tang N, Xie H, Fan X, Chen H; Tang M, Xie X. 2021. Genome-Wide Analysis of Nutrient Signaling Pathways Conserved in Arbuscular Mycorrhizal Fungi. Microorganisms 9(8): 557. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081557>

II. CAPITULO 2. Comportamiento de *Cucurbita pepo* L. var. “Grey Zucchini”, en la propagación de hongos micorrizógenos arbusculares nativos de suelos con diferente manejo.

Behavior of *Cucurbita pepo* L. var. “Grey Zucchini”, in the propagation of native arbuscular mycorrhizal fungi in soils with different management.

José Alberto Gío-Trujillo^{1*}, Carlos Juan Alvarado-López², Neith Aracely Pacheco-López³, Jairo Cristóbal-Alejo¹, Arturo Reyes-Ramírez¹, Juan Candelero-de la Cruz⁴

¹Tecnológico Nacional de México, campus Conkal, Avenida Tecnológico s/n C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México.

²Cátedras-CONACYT. Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal. Avenida Tecnológico s/n C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México.

³Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Unidad sureste. Tablaje Catastral 31264, Kim. 5.5, Carretera. Sierra Papacal-Chuburna Puerto. Parque Científico. Tecnológico de Yucatán. C.P. 97302. Mérida, Yucatán, México.

⁴Tecnológico Nacional de México, Campus Tizimín. Final Aeropuerto Cupul s/n, Col. Santa Rita, CP 97700, Tizimín, Yucatán, México

*Autor para correspondencia: José Alberto Gío-Trujillo.

E-mail: DD20800277@conkal.tecnm.mx

Artículo publicado en Biotecnia, 2024. Volumen 26 (1): enero - diciembre

Cita recomendada: Gio Trujillo, J. A., Alvarado López, C. J., Pacheco López, N. A., Cristóbal Alejo, J., Reyes Ramírez, A., & Candelero de la Cruz, J. (2024). Comportamiento de *Cucurbita pepo* L. var. “Grey Zucchini”, en la propagación de hongos micorrizógenos arbusculares nativos de suelos con diferente manejo. Biotecnia, 26 (1), 128–135. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v26.1972>

RESUMEN

La simbiosis entre los hongos micorrizícos arbusculares (HMA) y las plantas, representa una alternativa importante para incrementar los rendimientos en los cultivos agrícolas. El objetivo del estudio fue evaluar la propagación de HMA aislados de suelos

con diferente manejo e inoculado en *Cucurbita pepo* var. “Grey Zucchini”. Se estableció un cultivo trampa como medio de propagación de HMA. Se empleó un diseño en bloques (cinco tratamientos x15 repeticiones). Los HMA nativos fueron provenientes de tres sistemas (T1= vegetación secundaria; T2= sistema multipropósito; T3= sistema agrícola). Se usó un control positivo (CP= GLUMIX®MICORRIZAS) y control negativo (CN= sin inoculación). La inoculación micorrízica inició en semillero, empleando Peat Moss-suelo estéril (50:50 v/v). Se empleó como método de inoculación el método por sustrato con 12.5 g de inoculante nativo (T1= 46 esporas; T2= 32 esporas y T3= 22 esporas). En CP empleó 5 g de producto 100 esporas. Los resultados indican que la mayor propagación micorrízica se presentó en el CP y T1, con una multiplicación de esporas de 135.20 ± 26.24 y 74.67 ± 5.56 esporas en 10 g de suelo. Identificando un consorcio nativo conformado de esporas de HMA de las familias Glomaceae y Gigasporaceae. En conclusión, *C. pepo* representa un prometedor hospedero para el trampeo y multiplicación de los HMA.

Palabras Clave: Hongos micorrízicos, cultivo trampa, esporas, colonización, inoculación

ABSTRACT

The symbiosis between arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plants represents an important alternative to increase yields in agricultural crops. The objective of the study was to evaluate the propagation of AMF isolated from soils with different management and inoculated in *Cucurbita pepo* var. “Gray Zucchini.” A trap culture was established as a means of AMF propagation. A block design was used (five treatments x15 repetitions). The native AMF came from three systems (T1= secondary vegetation; T2= multipurpose system; T3= agricultural system). A positive control (CP= GLUMIX®MICORRIZAS) and negative control (CN= no inoculation) were used. Mycorrhizal inoculation began in the seedbed, using Peat Moss-sterile soil (50:50 v/v). The substrate method with 12.5 g of native inoculant (T1 = 46 spores; T2 = 32 spores and T3 = 22 spores) was used as the inoculation method. In CP, 5 g of product 100 spores were used. The results indicate that the greatest mycorrhizal propagation occurred in CP and T1, with a spore multiplication of 135.20 ± 26.24 and 74.67 ± 5.56 spores in 10 g of soil. Identifying a native consortium made up of AMF spores from the Glomaceae and Gigasporaceae families. In conclusion, *C. pepo* represents a promising host for the trapping and multiplication of AMF.

Keywords: Mycorrhizal fungi, trap culture, spores, colonization, inoculation

III. Capítulo 3. Calidad de fruto de *Cucurbita moschata* y *Cucurbita pepo* var. “Grey Zucchini” asociada a hongos micorrícicos arbusculares
Fruit quality of *Cucurbita moschata* and *Cucurbita pepo* var. “Grey Zucchini” associated with arbuscular mycorrhizal fungi

José Alberto Gío-Trujillo^{1‡} (<http://orcid.org/0000-0003-4598-2282>), Carlos Juan Alvarado-López² (<http://orcid.org/0000-0001-7442-8171>), Neith Aracely Pacheco-López³ (<http://orcid.org/0000-0002-4637-2657>), Jairo Cristóbal-Alejo¹ (<http://orcid.org/0000-0001-9354-1129>), Arturo Reyes-Ramírez¹ (<http://orcid.org/0000-0003-2348-5146>), Juan Candelero-de la Cruz⁴ (<http://orcid.org/0000-0003-2404-1045>), Ernesto Castañeda-Hidalgo⁵ (<http://orcid.org/0000-0001-9296-1439>)

¹ Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal.

² Cátedras-CONAHCYT. Avenida Tecnológico s/n, Conkal. 97345, Conkal, Yucatán, México; (J.A.G.T.), (J.C.A.), (A.R.R.), (C.J.A.L.).

³ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Unidad sureste. Tablaje Catastral 31264, km 5.5, Carretera Sierra Papacal Chuburna Puerto Parque Científico, Tecnológico de Yucatán. 97302. Mérida, Yucatán, México; (N.A.P.L.).

⁴ Tecnológico Nacional de México, Campus Tizimín. Final Aeropuerto Cupul s/n, Col. Santa Rita. 97700, Tizimín, Yucatán, México; (J.C.C.).

⁵ Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca. Ex-hacienda de Nazareno s/n, Centro. 71230. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México; (E.C.H.).

‡ Autor para correspondencia: DD20800277@conkal.tecnm.mx

Artículo publicado en la revista Terra Latinoamericana, volumen 42 (2024).

Cita recomendada: Gío-Trujillo, J. A., Alvarado-López, C. A., Pacheco-López, N. A., Cristóbal-Alejo, J., Reyes-Ramírez, A., Candelero-de la Cruz, J., & Castañeda-Hidalgo, E. (2024). Calidad de Fruto de *Cucurbita moschata* y *Cucurbita pepo* var. “Grey Zucchini” Asociada a Hongos Micorrícicos Arbusculares. Terra Latinoamericana, 42, 1-16. e1826. <https://doi.org/10.28940/terra>.

RESUMEN

Los hongos micorrícicos arbusculares, un método prometedor para incrementar la calidad de cosecha agrícolas, pueden hacer frente a la creciente demanda de alimentos con altos aportes nutrimentales. El objetivo fue evaluar el efecto de la inoculación micorrícica nativa y comercial en *Cucurbita moschata* y *Cucurbita pepo*, var. “Grey Zucchini”, sobre variables de crecimiento morfológico, calidad de cosecha y postcosecha del fruto. La inoculación micorrícica inició en etapa de semillero con 60 esporas/tratamiento. En campo, se estableció un diseño de parcelas divididas (seis tratamientos-14 repeticiones): T1: Cepa nativa 1 (sistema agrícola) + 50 % de fertilización química; T2: Cepa nativa 2 (sistema multipropósito) + 50 % de fertilización química; T3: Cepa nativa 3 (vegetación secundaria) + 50 % de fertilización química; T4: Cepa comercial + 50 % de fertilización química; T5: Sin inoculación/100 % de fertilización química; Testigo: Sin inoculación/fertilización. Las variables evaluadas fueron: altura, grosor, brotes/flores; número de frutos, peso y diámetro; para calidad postcosecha: color, grosor de cáscara, textura, humedad, pH, cenizas, acidez titulable y sólidos solubles. *C. pepo*, representó la especie con mayor afinidad micorrícica. Asimismo, los resultados determinaron que las variables de crecimiento de los cultivos no presentaron diferencias estadísticas. Asimismo, en peso y tamaño del fruto se observó un efecto significativo entre la inoculación micorrícica nativa/comercial y el tratamiento con el 100% de fertilización. En calidad postcosecha, *C. pepo*, registró diferencias en textura, acidez titulable, colorimetría y grosor del fruto. *C. moschata*, en sólidos solubles, textura y colorimetría. En conclusión, la inoculación micorrícica arbuscular en ambas especies, reduce el uso de fertilizantes químicos durante su cultivo, influyendo positivamente en la calidad de cosecha (peso y diámetro) y en atributos poscosecha (propiedades físicas/químicas) del fruto, relevantes para el consumo humano. Al intervenir en los principales procesos de captación y distribución de nutrientes del suelo hacia la planta.

Palabras clave: calabaza, calabacita italiana, fertilización, inoculación micorrícica, micorrizas.

SUMMARY

Arbuscular mycorrhizal fungi, a promising method to increase the quality of agricultural crops, can address the growing demand for foods with high nutritional content. The objective was to evaluate the effect of native and commercial mycorrhizal inoculation on *Cucurbita moschata* and *Cucurbita pepo*, var. “Grey Zucchini”, on variables of

morphological growth, harvest quality and post-harvest of the fruit. Mycorrhizal inoculation began in the seedling stage with 60 spores/treatment. In the field, a divided plot design was established (six treatments-14 repetitions): T1: Native strain 1 (agricultural system) + 50% chemical fertilization; T2: Native strain 2 (multipurpose system) + 50% chemical fertilization; T3: Native strain 3 (secondary vegetation) + 50% chemical fertilization; T4: Commercial strain + 50% chemical fertilization; T5: No inoculation/100% chemical fertilization; Control: No inoculation/fertilization. The variables evaluated were: height, thickness, buds/flowers; number of fruits, weight and diameter; for postharvest quality: color, peel thickness, texture, humidity, pH, ash, titratable acidity and soluble solids. *C. pepo*, represented the species with the highest mycorrhizal affinity. Likewise, the results determined that the crop growth variables did not present statistical differences. Likewise, in fruit weight and size, a significant effect was observed between the native/commercial mycorrhizal inoculation and the treatment with 100% fertilization. In postharvest quality, *C. pepo* recorded differences in texture, titratable acidity, colorimetry and fruit thickness. *C. moschata*, in soluble solids, texture and colorimetry. In conclusion, arbuscular mycorrhizal inoculation in both species reduces the use of chemical fertilizers during cultivation, positively influencing harvest quality (weight and diameter) and postharvest attributes (physical/chemical properties) of the fruit, relevant for consumption. human. By intervening in the main processes of uptake and distribution of nutrients from the soil to the plant.

Index words: pumpkin, italian zucchini, fertilization, mycorrhizal inoculation, mycorrhizae.