

EN

Systematic review on arbuscular mycorrhizal fungi and their ecological importance

ES

Revisión sistemática en torno a los hongos micorrízicos arbusculares y su importancia ecológica

Sonia Herrera-Monroy*; Mariana Herrera-Monroy; Juan Manuel Rivera-Ramírez

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Apan-Calpulalpan s/n, Chimalpa Tlalayote, Hgo. México.

*Corresponding author:
sonia_herrera@uaeh.edu.mx

Received: December 14, 2022 /
Accepted: March 28, 2023

DOI:
10.5154/r.chsagt.2022.03.07

Abstract

The taxonomic classification of arbuscular mycorrhizal fungi is still under discussion, however, thanks to the progress of molecular tools, the criteria for grouping have diversified. Therefore, the objective of the present research was to review the state of art in relation to these organisms, being the informative documentary review the main research technique used to identify the works related to the subject, as well as to relate the different researches found. First, a review of fungal diversity was carried out and then some novelties in relation to their taxonomic classification at world level were discussed, as well as the advances that have been made in our country. Finally, we concluded by highlighting the importance of these organisms in nutrition, growth and resistance to biotic and abiotic stress of the plants associated to them, as well as their influence on the formation of soil aggregates.

Keywords: Diversity, soil, taxonomy (thesaurus), environment, plants.

Resumen

La clasificación taxonómica de los hongos micorrízicos arbusculares aún se encuentra en discusión, no obstante, gracias al avance de las herramientas moleculares, los criterios para el agrupamiento se han diversificado. Por ello, el objetivo de la presente investigación fue revisar el estado del arte con relación a dichos organismos, siendo la revisión documental informativa la principal técnica de investigación utilizada para identificar los trabajos afines a la temática, así como para relacionar las distintas investigaciones encontradas. Primero se realizó una revisión sobre la diversidad fúngica y posteriormente se abordaron algunas novedades en relación con su clasificación taxonómica a nivel mundial, así como los avances que en nuestro país se han efectuado. Por último, se concluye resaltando la importancia de estos organismos en la nutrición, crecimiento y la resistencia al estrés biótico y abiótico de las plantas que se asocian a ellos, así como su influencia en la formación de agregados del suelo.

Palabras clave: Diversidad, suelo, taxonomía (tesauro) ambiente, plantas.

Introduction

Arbuscular mycorrhizal fungi are defined as fungal organisms of rhizosphere that establish symbiotic relationships with approximately 92 % of plant species (Brundrett and Tedersoo, 2018). On the other hand, once a mutualist and trophic relationship has been established between these fungi and chlorophytic and achlorophytic plant (such as albino araucaria) it is called mycorrhizal (Guzmán-Plazola and Ferrera-Cerrato, 1990; González-Ramírez and Pupo-Feira, 2017).

The taxonomic classification of these organisms is still under discussion, but in recent years, due to the use of molecular tools, they have been placed within the *Phylum Mucoromycota* with three classes (Tedersoo et al., 2018), 11 families, 25 genera, approximately, 250 species identified and 343 described (Redecker et al., 2013; Schübler and Walker, 2010), of which 105 species have been identified in Mexico.

Arbuscular mycorrhizal fungi belonging to the class *Glomeromycetes* are the most studied, because they establish an obligated symbiosis to obtain organic carbon from plants in exchange for water, nitrogen, phosphorous and other beneficial compounds for the host (Diagne et al., 2020) that directly favor agricultural production.

These organisms have gained importance recently thanks to the advantages they provide when associated with crops, which, when combined with traditional practices, allow them to adapt to cope with the impacts of climatic change, which result in difficulties in the survival of life on planet (Bárcena et al., 2021), as well as the increase in the prices of agricultural inputs (Camarena-Gutierrez, 2012; Diagne et al., 2020; Leveau, 2015; Suárez, 2022).

For all these reasons, it is of interest to obtain a document that gathers and punctuates the information generated on arbuscular mycorrhizal fungi during the last 10 years, in such a way as to facilitate its study for those who are new to the subject. Thus, the research question is related to what are the contributions made on arbuscular mycorrhizal fungi reported during the last decade? Meanwhile, the general objective was to gather the knowledge generated so far on these organisms, related to their ecological importance, defining it according to the participation in plant nutrition and survival, as well as their contributions to the dynamics of soil formation (Carrillo-Saucedo et al., 2022).

In order to respond to the above, a survey of the diversity and novelties in relation to its taxonomic classification at world level, in addition to the

Introducción

Los hongos micorrízicos arbusculares son definidos como organismos fungos de la rizosfera que establecen relaciones simbióticas con aproximadamente el 92 % de las especies vegetales (Brundrett y Tedersoo, 2018). Por otro lado, una vez que se ha establecido una relación mutualista y trófica entre estos hongos y plantas clorofíticas o aclorofíticas (como la araucaria albina) se le llama micorriza (Guzmán-Plazola y Ferrera-Cerrato, 1990; González-Ramírez y Pupo-Feira, 2017).

La clasificación taxonómica de estos organismos aún se encuentra en discusión, pero en años recientes, debido al uso de herramientas moleculares, se han ubicado dentro del *Phylum Mucoromycota* con tres clases (Tedersoo et al., 2018), 11 familias, 25 géneros, aproximadamente, 250 especies identificadas y 343 descritas (Redecker et al., 2013; Schübler y Walker, 2010), de las cuales 105 especies se han identificado en México.

Los hongos micorrízicos arbusculares pertenecientes a la clase *Glomeromycetes* son los más estudiados, debido a que establecen una simbiosis obligada para obtener carbono orgánico de plantas a cambio de agua, nitrógeno, fósforo y otros compuestos benéficos para el hospedante (Diagne et al., 2020) que favorecen directamente la producción agrícola.

Estos organismos han tomado importancia recientemente gracias a las ventajas que proporcionan al asociarse con cultivos, mismos que, al combinarse con prácticas tradicionales, permiten adaptarlas para sobrellevar los embates del cambio climático, los cuales derivan en dificultades en la supervivencia de la vida en el planeta (Bárcena et al., 2021), así como el incremento en los precios de insumos agrícolas (Camarena-Gutiérrez, 2012; Diagne et al., 2020; Leveau, 2015; Suárez, 2022).

Por todo lo expuesto, es de interés obtener un documento que reúna y puntualice la información generada sobre hongos micorrízicos arbusculares durante los últimos 10 años, de tal manera que facilite su estudio para quienes recién se adentran en la temática. Así, la pregunta de investigación versa en relación a ¿cuáles son los aportes hechos sobre los hongos micorrízicos arbusculares reportados durante la última década? En tanto, el objetivo general, fue reunir el conocimiento generado hasta el momento sobre estos organismos, relacionado a su importancia ecológica, definiendo esta, de acuerdo a la participación que tienen en la nutrición y sobrevivencia de las plantas, en su función trófica, así como sus aportes en la dinámica de formación de suelos (Carrillo-Saucedo et al., 2022).

advances that have been made in Mexico, based on the review of bibliographic resources. The role of these organisms in nutrition, growth, as well as resistance to biotic and abiotic stress of the plants associated with them was also discussed, in addition to their influence on the formation of soil aggregates, based on the information reported by approximately 30 authors. Finally, we concluded on the information reviewed and the number of articles available.

Methodological approach

Given the objective of the document, the main research technique employed was the documentary review, which according to Valencia-López (2016) allows to identify previously elaborated research, as well as delineate an object of study, build starting premises and make relationships between works. Likewise, Jurado Rojas (2005) defines it as follows:

Informative documentary research is that which aims to report everything related to a specific topic. This type of research describes the object of study in detail, and is responsible for ordering and systematizing the available information into a coherent body of ideas. It is usually distinguished by the way the information is systematized and by providing new approaches (p. 38).

In turn, the author states that once the topic has been identified it is necessary to “[...] define the sources needed for research on the basis of the following criteria: a) relevance, b) completeness, and c) timeliness” (p. 38). In summary, this tool made it possible to direct the research from two ways: first, by relating existing data from different sources, and second, by providing a systematic and panoramic view of the object of study in question. Therefore, the steps to be followed for the systematization and analysis of information were taken from the methodologic proposal proposed by Reyes-Ruiz and Carmona-Alvarado (2020) which are detailed in Figure 1.

For the survey of sources, the Google Scholar search engine was used, filtering the results with the advanced research option by publication period (2012 to 2022), in addition to using the criteria “Sort by relevance”, “Any language”, “Review articles”, “With all words”, “In the whole article” and the following key sentences written verbatim in the search engine: “hongos arbusculares”, with which 189 sources were obtained, subsequently, “hongos arbusculares micorrízicos” was typed, with which the results were reduced to 18 articles.

Since the number of sources was reduced when writing the sentences in Spanish, the publication period was

Para responder a lo anterior, se realizó un sondeo de la diversidad y de las novedades con relación a su clasificación taxonómica a nivel mundial, además de los avances que se han realizado en México, lo anterior, apoyándose en la revisión de fuentes bibliográficas. También se discutió el papel de estos organismos en la nutrición, crecimiento, así como la resistencia al estrés biótico y abiótico de las plantas que se asocian a ellos, además de su influencia en la formación de agregados del suelo, basándose en la información reportada por aproximadamente 30 autores. Finalmente, se concluye sobre la información revisada y la cantidad de artículos disponibles.

Enfoque metodológico

Dado el objetivo del documento, la principal técnica de investigación empleada fue la revisión documental de tipo informativa, la que según Valencia-López (2016) permite identificar las investigaciones elaboradas previamente, así como delinear un objeto de estudio, construir premisas de partida y hacer relaciones entre trabajos. Asimismo, Jurado-Rojas (2005) la define de la siguiente manera:

La investigación documental informativa es aquella que pretende informar todo lo concerniente a un tema específico. Este tipo de investigación describe el objeto de estudio en sus detalles, y se encarga de ordenar y sistematizar la información disponible en un cuerpo coherente de ideas. Suele distinguirse por la forma de sistematizar la información y por aportar nuevos enfoques (p. 38).

A su vez, dicha autora expresa que una vez identificado el tema es preciso “[...] definir las fuentes necesarias para la investigación sobre la base de los siguientes criterios: a) pertinencia, b) exhaustividad y c) actualidad” (p. 38). En síntesis, dicha herramienta permitió dirigir la investigación desde dos aspectos, primero, relacionando datos ya existentes que procedieron de distintas fuentes, y después brindando una visión sistemática y panorámica del objeto de estudio en cuestión. Por ello, los pasos a seguir para la sistematización y análisis de la información fueron retomados de la propuesta metodológica propuesta por Reyes-Ruiz y Carmona Alvarado (2020) los cuales se detallan en la Figura 1.

Para el arqueo de fuentes se utilizó el motor de búsqueda de Google Académico, filtrando los resultados con la opción de búsqueda avanzada por periodo de publicación (2012 a 2022), además de utilizar los criterios “ordenar por relevancia”, “Cualquier idioma”, “Artículos de revisión”, “Con todas las palabras”, “En todo el artículo” y las siguientes oraciones clave escritas

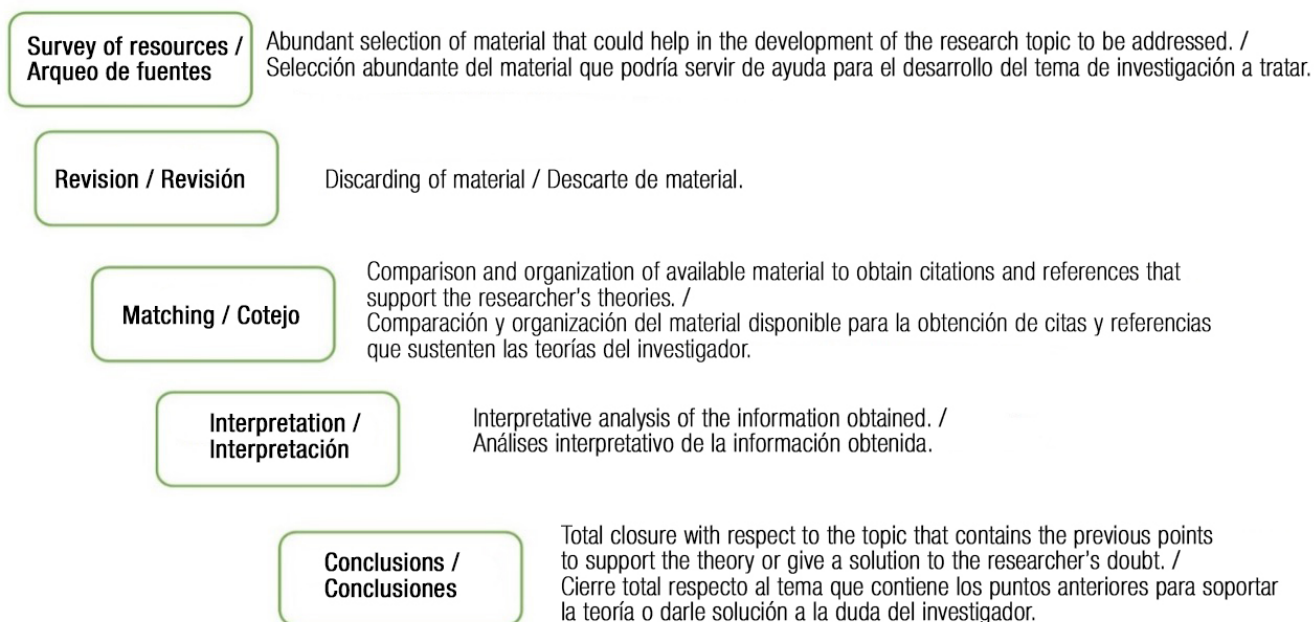


Figure 1. Steps of informative documentary research on arbuscular mycorrhizal fungi.
Figura 1. Pasos de la investigación documental informativa sobre los hongos micorrízicos arbusculares.

extended from 2000 to 2022, and 22 articles were found. As this number was still insufficient, the same sentences were used but in English, and Boole operators were added to specify the desired information.

The sentences searched verbatim were as follows: arbuscular mycorrhizal fungi, which yield 10 100 articles, subsequently arbuscular mycorrhizal fungi "review" was tried with which reduced to 9 940 sources, "arbuscular mycorrhizal fungus" was also searched from which 7 100 were obtained, to reduced further it was searched in title: "arbuscular mycorrhizal fungi" + "diversity", with 967, in title: "arbuscular mycorrhizal fungi" + "taxonomy" with 206 results, "arbuscular mycorrhizal fungi diversity" + "review" with 61 results and finally in title: "arbuscular mycorrhizal fungi" + "taxonomy" + "Mexico" which showed 53 articles.

Of the total number of sources obtained from the program, the 22 papers found when using Spanish sentences, 53 articles found using the sentence "arbuscular mycorrhizal fungi diversity" + "review" and 61 results of the sentence "arbuscular mycorrhizal fungi" + "diversity" were reviewed, citing only those with non-repeated information and of interest for the present paper. Although the papers found with the methodology described above contained relevant information, it was necessary to consult some of the sources referred to in the articles reviewed to enrich the discussion.

textualmente en el buscador: hongos arbusculares, con la que se obtuvieron 189 fuentes, posteriormente se escribió "hongos micorrízicos arbusculares", con la que los resultados se redujeron a 18 artículos.

Debido a que al escribir las oraciones en español el número de fuentes era reducido, se procedió a ampliar el periodo de publicación de 2000-2022, de este modo se encontraron 22 artículos. Como este número aún era insuficiente, se utilizaron las mismas oraciones, pero en idioma inglés, además de agregar operadores de Boole para especificar la información deseada.

Las oraciones buscadas textualmente fueron las siguientes; arbuscular mycorrhizal fungi, que arrojó 10 100 artículos, posteriormente se probó con arbuscular mycorrhizal fungi "review" con la que se redujeron a 9 940 fuentes, también se buscó "arbuscular mycorrhizal fungus" de la cual se obtuvieron 7 100, para reducir más se buscó in title: "arbuscular mycorrhizal fungi" + "diversity", con 967, in title: "arbuscular mycorrhizal fungi" + "taxonomy" con 206 resultados, "arbuscular mycorrhizal fungi diversity" + "review" con 61 resultados y finalmente in title: "arbuscular mycorrhizal fungi" + "taxonomy" + "mexico" que mostró 53 artículos.

Del total de fuentes arrojadas por el programa, se revisaron los 22 trabajos encontrados cuando se usaron oraciones en español, 53 artículos encontrados usando la oración "arbuscular mycorrhizal fungi

The information gathered was ordered and discussed according to the general hierarchy presented in the papers reviewed, in such a way that a deductive method is followed, which facilitates the fulfillment of the objective of this paper, because according to Prieto Castellanos (2017) it allows moving from general principles to particular facts, that is, once proven and verified that a certain principle is valid, it proceeds to apply it to particular contexts.

Results

Diversity of mycorrhizal fungi

Arbuscular mycorrhizal *fungi* are organisms belonging to the Fungi kingdom, which has been ranked as the second most diverse after insects (Purvis and Hector, 2000). As of 2018, fungal organisms were estimated to include 65 000 true fungi (*Eumycota*), 16 000 asexual (also known as mitosporic or anamorphic), 889 organisms belonging to the *Tramenophiles*, *Alveolata* and *Rhizaria* (SAR) group and *Chromista*, as well as 960 *Protozoa* and *Amoebozoa* (Kirk et al., 2010).

In recent decades, with the application of molecular techniques for the identification of organisms, the taxonomic classification has been modified, creating new taxonomic divisions (Wu et al., 2019) and recalculating the diversity of fungi existing on the planet.

Several authors have tried to quantify fungal diversity based on different criteria, so there are discrepancies in the number calculated. For example, the approximation made by Hawksworth and Lücking (2017), from the rate fungi description based on the species contained in the "Dictionary of the Fungi" by Kirk et al. (2010), mentions that, the species of these, ranges between 2.2 and 3.8 million worldwide.

However, Dai et al. (2015) approximated an average increase of 110 genera and 1 397 new species every year beginning in 2001, based on an analysis of taxa introduced over seven decades, beginning in 1943 and continuing through 2008. This figure is congruent with another estimated from species described with the use of next-generation sequencing technology, which claims that there are between 3.5 and 5.1 million fungal species in the world (Blackwell, 2011).

This discrepancy in values is due to the fact that the estimate of 2.2 to 3.8 million fungal species has only accounted for the cultivated fungi, underestimating diversity by not considering that non-cultivated species exist (Wu et al., 2019), in addition to the fact that, in certain countries and poorly studied

diversity" + "review" y 61 resultados de la oración "arbuscular mycorrhizal fungi" + "diversity", citando solo aquellos con información no repetida y de interés para el presente trabajo. A pesar de que los trabajos encontrados con la metodología anteriormente descrita contenían información relevante, fue necesario consultar algunas fuentes referidas por los artículos revisados para enriquecer la discusión.

La información recabada fue ordenada y discutida de acuerdo a la jerarquía general presentada en los trabajos revisados, de tal manera que se sigue un método deductivo, el cual facilita cumplir el objetivo de este escrito, pues acorde con lo dicho por Prieto Castellanos (2017) permite pasar de principios generales a hechos particulares, es decir, una vez comprobado y verificado que determinado principio es válido, se procede a aplicarlo a contextos particulares.

Resultados

Diversidad de hongos micorrízicos

Los hongos micorrízicos arbusculares son organismos pertenecientes al reino *Fungi*, el cual se ha catalogado como el segundo más diverso, solo después del de los insectos (Purvis y Hector, 2000). Para el año 2008 se estimaba que los organismos fungosos incluían 65 000 hongos verdaderos (*Eumycota*), 16 000 asexuales (también conocidos como mitospóricos o anamorfos), 889 organismos pertenecientes al grupo *Stramenophiles*, *Alveolata* y *Rhizaria* (SAR) y *Chromista*, así como 960 *Protozoa* y *Amoebozoa* (Kirk et al., 2010).

En las últimas décadas, con la aplicación de técnicas moleculares para la identificación de organismos, la clasificación taxonómica se ha modificado, creándose nuevas divisiones taxonómicas (Wu et al., 2019) y recalculando la diversidad de hongos existentes en el planeta.

Varios autores han intentado cuantificar la diversidad fúngica basándose en diferentes criterios, por lo que existen discrepancias en el número calculado. Por ejemplo, la aproximación hecha por Hawksworth y Lücking (2017), a partir de la tasa de descripción de hongos con base en las especies contenidas en el "Diccionario de los Hongos" de Kirk et al. (2010), menciona que, las especies de estos, oscila entre 2.2 y 3.8 millones en todo el mundo.

Sin embargo, Dai et al. (2015), aproximó un incremento promedio de 110 géneros y 1 397 nuevas especies cada año a partir del 2001, basándose en un análisis de los taxones introducidos durante siete décadas,

areas, more than 90 % of collected specimens are undescribed (Hyde et al., 2018), so it is theorized that only 7 % of fungal species have been documented so far (Pérez-Moreno et al., 2020).

In an attempt to overcome the limitations described above, it has recently been decided to use a classification based on grouping by operation taxonomic units (OUT's), detected from culture-independent approaches, including temperature gradient gel electrophoresis (also known as TGGE), denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE), single-strand conformation polymorphism (SSCP), restriction fragment length polymorphism (RFLP), terminal restriction (TRFLP), amplified ribosomal DNA restriction analysis (ARDRA), 454 pyrosequencing and Illumina MiSeq sequencing. Thus, by grouping by OTU's, an approximate of 12 million fungal species has been estimated considering cultivable and non-cultivable one (Wu et al., 2019).

Although there is discrepancy between the number of existing fungal species, it is known that a significant percentage is constituted by mycorrhizal fungi, which belong to a large group of organisms exclusive to the rhizosphere and are associated with 92 % of vascular plants (Brundrett and Tedersoo, 2018).

Taxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

Mycorrhiza is defined as the mutualistic and trophic relationship established between fungi and lower chlorophytic and achlorophytic plants (such as *araucaria Albina*) (Soto Sogamoso et al., 2022; Rivera et al., 2016; Pérez et al., 2015; Honrubia, 2009). Thus, mycorrhizal fungi are organisms that establish relationships with roots and other plant organs such as rhizomes, in the case of lower plants (orchids, for example) that lack of roots (Honrubia, 2009).

These organisms appeared in the world 462 million years ago (Bonfante, 2018; Kirk et al., 2020) and began to be used together with nitrifying crops by the Romans in 300 BC, but was not until 1877 that forest pathologist A. B. Frank and Gibelli coined the term *mycorrhiza* (Bonfante, 2018). By 1900, the French botanist Bernard highlighted their importance by studying then in orchids (Camargo-Ricalde et al., 2012).

There are different types of mycorrhizae, which are classified in two main groups, according to the fungal and plant species that establish the association, as well as the nutritional strategy they use (Smith and Read, 2008):

comenzando en 1943 y hasta 2008. Esta cifra es congruente con otra estimada a partir de las especies descritas con el uso de tecnología de secuenciación de próxima generación, la cual sostiene que existen entre 3.5 a 5.1 millones de especies fúngicas en el mundo (Blackwell, 2011).

Esta discrepancia de valores es debida a que el cálculo de 2.2 a 3.8 millones de especies fúngicas solo ha contabilizado hongos cultivables, subestimando la diversidad al no considerar que existen especies no cultivables (Wu et al., 2019), además de que, en ciertos países y áreas poco estudiadas, más del 90 % de los especímenes recolectados no están descritos (Hyde et al., 2018), por lo que se teoriza que únicamente el 7 % de las especies fungosas han sido documentadas hasta el momento (Pérez-Moreno et al., 2020).

Para intentar solventar las limitantes descritas anteriormente, en últimas fechas se ha optado por utilizar una clasificación basada en agrupación por unidades taxonómicas operativas (OTU's por sus siglas en inglés), detectadas a partir de enfoques independientes del cultivo, incluidos electroforesis en gel de gradiente térmico (también conocido como TGGE, por sus siglas en inglés), electroforesis en gel de gradiente desnaturizante (DGGE), polimorfismo de conformación de cadena única (SSCP), polimorfismo de longitud de fragmento de restricción (RFLP), polimorfismo de longitud de fragmento de restricción terminal (TRFLP), Análisis de restricción de ADN ribosomal amplificado (ARDRA), pirosecuenciación 454 y secuenciación Illumina MiSeq. Es así como mediante la agrupación por OTU's, se ha estimado un aproximado de 12 millones de especies fúngicas considerando las cultivables y no cultivables (Wu et al., 2019).

Si bien existe discrepancia entre el número de especies fungosas existentes, se sabe que un porcentaje importante está constituido por hongos micorrízicos, los cuales pertenecen a un gran grupo de organismos exclusivos de la rizosfera y que se asocian con el 92 % de las plantas vasculares (Brundrett y Tedersoo, 2018).

Taxonomía de hongos micorrízicos arbusculares (HMA)

Se define como micorriza a la relación mutualista y trófica establecida entre hongos y plantas inferiores clorofíticas y aclorofíticas (como la *araucaria albina*) (Soto Sogamoso et al., 2022; Rivera et al., 2016; Pérez et al., 2015; Honrubia, 2009). De esta manera, los hongos micorrízicos son organismos que establecen relaciones con raíces y otros órganos vegetales como

a) Those that form fungal mantle: Referred to those that do not have the possibility to penetrate the cortical cells of the root and, therefore, form a *layer* on the surface of the young roots when they are anchored. Taking this into account, the diagnostic structures for this type of mycorrhizae are the fungal mantle or Hartig net, and the external vegetative mycelium that emerges from the roots (Pérez-Moreno and Read, 2004). Within this group are ectomycorrhizae, ectendomycorrhizae, arbutoid mycorrhizae and monotrophic mycorrhizae (Camargo-Ricalde et al., 2012; Smith and Read, 2008).

b) Those that do not form fungal mantle: These are able to penetrate in the cortical cells of the roots, so that the formation of fungal mantles is not observed; in this group we find arbuscular mycorrhizae, ericoid mycorrhiza and orchid mycorrhiza (Camargo-Ricalde et al., 2012).

From these two main groups, subcategories are derived, according to the plant species with which the mycorrhizae are associated, as well as some particular characteristics shown in Chart 1.

Following this classification, it is estimated that, of the total of plant species, 8 % corresponding to some carnivorous, parasitic and epiphytic plants do not generate mycorrhizal associations, while 7 % of these present inconsistent associations (between mycorrhization one cycle and no mycorrhization the other, dual mycorrhization, etc.), 2 % with ectomycorrhizae, 1.5 % with ericoid mycorrhizae, 10 % with orchideoid, and the remaining 72 % are associated with arbuscular mycorrhizae (Brundrett and Tedersoo, 2018).

In addition to the latter group being the one associated with the largest number of plant species, they are also the most widely adapted with 250 species identified (Diagne et al., 2020) and 343 described (Redecker et al., 2013), they are mainly distributed in places with sandy soils, warm-dry, warm-humid, and temperate-cold climates (Smith and Read, 2008, cited by Camargo-Ricalde et al., 2012).

Fungi that form arbuscular mycorrhizae are placed in the Phylum Mucoromycota, Subphylum Mucoromycotina, Mortierellomycotina and Glomeromycotina (Bonfante, 2018), including three classes: *Glomeromycetes*, *Archaeosporomycetes* y *Paraglomeromycetes* (Tedersoo et al., 2018). In 2001, Walker Arthur Schüßler and Christopher performed a reclassification of spe-

rizomas, en el caso de plantas inferiores (orquídeas, por ejemplo) que carecen de raíz (Honrubia, 2009).

Estos organismos aparecieron en el mundo hace 462 millones de años (Bonfante, 2018; Kirk et al., 2010) y comenzaron a emplearse junto con cultivos nitrificantes por los Romanos en el año 300 a. de C., pero fue hasta el año 1877 que los patólogos forestales A. B. Frank y Gibelli acuñaron el término *micorriza* (Bonfante, 2018). Para 1900, el botánico francés Bernard resaltó su importancia al estudiarlas en orquídeas (Camargo-Ricalde et al., 2012).

Existen diferentes tipos de micorrizas, mismas que se clasifican en dos grupos principales, según las especies fúngicas y vegetales que establecen la asociación, así como la estrategia nutricional que emplean (Smith y Read, 2008):

a) Las que forman manto fúngico: Referidas a aquellas que no tienen la posibilidad de penetrar las células corticales de la raíz y, por ende, forman una capa en la superficie de las raíces jóvenes donde se anclan. Teniendo esto en consideración, las estructuras de diagnóstico para este tipo de micorrizas son el manto fúngico o red de Hartig, y el micelio externo vegetativo que emerge a partir de las raíces (Pérez-Moreno y Read, 2004). Dentro de este grupo, están las ectomicorrizas, ectendomicorriza, micorriza arbutoides y micorriza monotrofoide (Camargo-Ricalde et al., 2012; Smith y Read, 2008).

b) Las que no forman manto fúngico: Estas son capaces de penetrar en las células corticales de las raíces, por lo que no se observa la formación de mantos fúngicos, en este grupo encontramos a las micorrizas arbusculares, micorriza ericoide y orquideoide (Camargo-Ricalde et al., 2012).

A partir de estos dos grandes grupos, se derivan subcategorías, según las especies vegetales con la que las micorrizas se asocian, así como algunas características particulares que se muestran en el Cuadro 1.

Siguiendo esta clasificación, se estima que, del total de especies vegetales, el 8 % correspondiente a algunas plantas carnívoras, parásitas y epífitas, no generan asociaciones micorrícicas, mientras que el 7 % de estas, presentan asociaciones inconsistentes (entre micorrización un ciclo y no micorrización al otro, micorrización dual, etc.), 2 % con ectomicorrizas, 1.5 % con micorrizas ericoides, 10 % con orquideoide, y el

chart 1. Chart 1. Characteristics of the most important types of mycorrhizae
Cuadro 1. Características de los tipos de micorrizas más importantes

Types of mycorrhizal fungi / Tipos de hongos micorrízicos							
	Arbuscular / Arbuscular	Ectomycorrhiza / Ectomicorriza	Ectendomycorrhizae / Ectendomicorriza	Arbutoid / Arbutoide	Monotropoid / Monotropoide	Ericoid / Eriode	Orchaeoid / Orqueoide
With septum / Con septo	-	+	+	+	+	+	+
Without septum / Sin septo	+	-	-	-	-	-	-
Intercellular colonization/ Colonización intercelular	+	-	+	+	+	+	+
Fungal savanna / Sabana fúngica	-	+	+ ó -	+ ó -	+	-	-
Hartig net / Red de Hartig	-	+	+	+	+	-	-
Vesicles / Vesículas	+ o -	-	-	-	-	-	-
Chlorophyll / Aclorofilada	-	-	-	-	-	-	(except in adult age) / (excepto en etapa adulta)
Fungus taxa / Taxa del hongo	Mucoromycota	Four lineages of Endogonomycetes Pezizomycetes, Agaricomycetes (Tedersoo y Smith, 2017)	Basidiomycota Ascomycota	Basidiomycota	Basidiomy-cota	Ascomyco-ta	Basidiomycota
		Cuatro linajes de Endogonomycetes Pezizomycetes, Agaricomycetes (Tedersoo y Smith, 2017)					
Plant taxa / Taxa de la planta	Bryofita Pterofita Gimnospermae Angiospermae	Gimnospermae Angiospermae	Gimnospermae Angiospermae	Erycales	Monotropa-ceae	Erycales Bryofita	Orchidaceae

(+) Presence; (-) Absence; (+ o -) Presence with moderation. /
(+) Presencia; (-) ausencia; (+ o -) presencia con moderación.

Source: Smith and Read (2008), modified by Herrera-Monroy (2022)./
Fuente: Smith y Read (2008), modificado por Herrera-Monroy (2022).

cies, relying on molecular phylogeny combined with morphologic evidence, so that, as of 2019 four orders (*Glomerales*, *Diversisporales*, *Paraglomerales* and *Archaeosporales*) were still considered, 11 families (*Glomeraceae*, *Claroideoglomeraceae*, *Gigasporaceae*, *Acaulosporaceae*, *Entrophosporaceae*, *Pacisporaceae*, *Diversisporaceae*, *Paraglomeraceae*, *Geosiphonaceae*, *Ambisporaceae* and *Archaeosporaceae*) and 25 defined genera plus nine comprising species with uncertain classifications (Redecker et al., 2013; Schübler and Walker, 2010).

Chart 2 shows the classification of the eight most studied genera, according to several authors.

72 % restante se asocian con micorrizas arbusculares (Brundrett y Tedersoo, 2018).

Además de que este último grupo es el que se asocia con un mayor número de especies vegetales, también son las más ampliamente adaptadas con 250 especies identificadas (Diagne et al., 2020) y 343 descritas (Redecker et al., 2013), se distribuyen principalmente en lugares con suelos arenosos, clima cálido-seco, cálido-húmedo, y templado-frío (Smith y Read, 2008, citados por Camargo-Ricalde et al., 2012).

Los hongos que forman micorrizas arbusculares, se ubican en el *Phylum Mucoromycota*, Subphylum *Muco-*

Chart 2. Classification of the most studied AMF according to Montaña et al., 2007, modified with information of Camarena-Gutierrez (2012) and Schoch et al., 2020.

Cuadro 2. Clasificación de los HMA más estudiados de acuerdo con Montaña et al., 2007, modificado con información de Camarena-Gutierrez (2012) y Schoch et al., 2020

Class / Clase	Order / Orden	Suborder / Suborden	Family / Familia	Genera / Géneros
Glomeromycetes	Glomerals	Glomeromycete	Glomeraceae	<i>Glomus</i> <i>Sclerocystis</i> <i>Rhizoglosum</i> <i>Rhizophagus</i>
			Acaulosporaceae	<i>Acaulospora</i>
	Diversisporales	Uncertain	Gigasporaceae	<i>Entrophospora</i> <i>Gigaspora</i> <i>Scutellospora</i>
			Diversisporaceae	<i>Diversispora</i>
		N. A.	Pacisporaceae	<i>Pacispora</i>
		N. A.	Paraglomaceae	<i>Paraglosum</i>
	Paraglomerales		Archaeosporaceae	<i>Archaeospora</i>
	Archaeosporales	N. A.	Ambisporaceae	<i>Ambispora</i>

Source: Montaña et al. (2007), Camarena-Gutierrez (2012), modified by Herrera-Monroy (2018), with information of Schoch et al. (2020). /

Fuente: Montaña et al. (2007), Camarena-Gutierrez (2012), modificado por Herrera-Monroy (2018), con información de Schoch et al. (2020).

The genera of the order *Glomerales* are the most studied. These are characterized by having asexual spores and cenocytic hyphae distributed in the soil, and the genetic diversity present in these structures is unknown because they are multinucleated (Smith and Read, 2008).

Its classification is based on molecular tools and spore morphology, where the wall structure, size, shape, color, ornamentation of the supporting hyphae and occlusion are the main criteria for species delimitation. Previously, propagation under controlled conditions was necessary, since spores collected directly from the field could be damaged by parasites and have a variable physical appearance (Valera and Trejo, 2001), however, with the advance of molecular technology and the use of ribosomal RNA (rARN), and the sequencing of the Internal Transcribed Spacer (ITS) region, which is located between the 18S rRNA, 5.8S rRNA and 28S (for eukaryotes), as well as clustering in OTUs, it is possible to identify mycorrhizal fungi accurately (Bonfante, 2018) and without the need for cultivation.

National taxonomic diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)

So far, the concept of AMF diversity has been addressed at morphological and molecular level, however, there is another level known as functional, which probably allows the greatest variety and depth in defining the diversity of mycorrhizal fungi (Sanders et al., 1999).

Studies with AMF have focused mainly on determining the response of the mycorrhiza plant, without careful consideration of the endophyte, giving the impression that these fungi are functionally equivalent, contrary to this assumption, it has been shown that they have a great physiological diversity and specific adaptations to the environmental-edaphic conditions in which they develop (Van der Heijden et al., 2015), so varied responses (functional diversity) are also expected when established in specific conditions.

Proof of this is that it has been observed that mycorrhizal plants benefit in different magnitudes depending on the AMF that colonize them and the conditions under which they are grown (Smith and Read, 2008), thus generating a geographic distribution of genera and species of mycorrhizal fungi, which is modified when some ecological variable changes.

In Mexico, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are present in all ecosystems, but due to the edaphic and climatic conditions of the country, a greater abundance of these fungi would be expected in forested regions or regions with perennial crops. Despite this, and

romycotina, *Mortierellomycotina* y *Glomeromycotina* (Bonfante, 2018), incluyendo tres clases: *Glomeromycetes*, *Archaeosporomycetes* y *Paraglomeromycetes* (Tedersoo et al., 2018). En el año 2001 Walker Arthur Schüßler y Christopher realizaron una reclasificación de las especies, apoyándose en la filogenia molecular combinada con evidencia morfológica, por lo que, hasta 2019, se consideraban aun cuatro órdenes (*Glomerales*, *Diversisporales*, *Paraglomerales* y *Archaeosporales*), 11 familias (*Glomeraceae*, *Claroideoglomeraceae*, *Gigasporaceae*, *Acaulosporaceae*, *Entrophosporaceae*, *Pacisporaceae*, *Diversisporaceae*, *Paraglomeraceae*, *Geosiphonaceae*, *Ambisporaceae* y *Archaeosporaceae*) y 25 géneros definidos más nueve que comprenden especies con clasificaciones inciertas (Redecker et al., 2013; Schüßler y Walker, 2010).

En el Cuadro 2 se presenta la clasificación de los ocho géneros más estudiados, según varios autores.

Los géneros del orden *Glomerales*, son los más estudiados. Estos se caracterizan por tener esporas asexuales grandes e hifas cenocíticas distribuidas en el suelo, además se desconoce la diversidad genética que está presente en estas estructuras pues son multinucleadas (Smith y Read, 2008).

Su clasificación se apoya en herramientas moleculares y en la morfología de las esporas, donde la estructura de la pared, el tamaño, forma, color, ornamentación de la hifa de sostén y de su oclusión, son los principales criterios para la delimitación de especies. Anteriormente era necesaria su propagación en condiciones controladas, pues las esporas recolectadas directamente de campo podían estar dañadas por parásitos y tener un aspecto físico variable (Valera y Trejo, 2001), sin embargo, con el avance de la tecnología molecular y el uso de ARN ribosomal (ARNr), y la secuenciación de la región del espaciador transcrito interno (ITS, siglas del idioma inglés Internal Transcribed Spacer), los cuales se encuentra entre los genes del 18S ARNr, 5.8S ARNr y 28S para eucariontes), así como las agrupaciones en OTU's, es posible identificar hongos micorrízicos con precisión (Bonfante, 2018) y sin necesidad de cultivarlos.

Diversidad nacional taxonómica de hongos micorrízicos arbusculares (HMA)

Hasta ahora, se ha abordado el concepto de diversidad de los HMA a nivel morfológico y molecular, sin embargo, existe otro nivel conocido como funcional, el cual probablemente es el que permite mayor variedad y profundidad al definir la diversidad de los hongos micorrízicos (Sanders et al., 1999).

in congruence with the functional level of diversity (Sanders et al., 1999), 105 AMF species have been identified and recorded, of which, approximately half have been found in arid and semi-arid climate ecosystems (Durango, southern Hidalgo, Guanajuato, Oaxaca, Puebla and Sonora) (Chimal-Sánchez et al., 2020; Montaña et al., 2007), the remaining have been studied in natural and agricultural systems in 11 states of central-southern Mexico (Campeche, Chiapas, Estado de México, northern Hidalgo, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Sonora, Tabasco, Veracruz, Yucatán) with other climatic conditions (Montaña et al., 2007).

The most frequent genera described in tropical and sub-tropical ecosystems are *Acaulospora*, *Clareideoglossum*, *Rizhophagus septoglossum*, *Funneliformis*, while *Gigaspora* and *Diversispora* in arid and semi-arid, on the other hand, genus *Glomus* has been documented throughout the country, adapted to diverse edaphic conditions. Chart 3 shows the AMF found in recent years in Mexico.

Mycorrhizal fungi as rhizospheric microorganisms

The term *Rhizosphere* was proposed by Lorenzo Hitler, who defined it as the soil compartment influenced by plant roots, thus, rhizosphere is a soil layer only a few millimeters thick, which possesses a great variety and quantity of microorganisms (it is 10-100 times richer in microorganisms than the rests of the strata), in it takes place the release of 6-21 % of the carbon fixed and secreted by the roots, in addition, it is the place in the soil where most nutrient cycles occur, as well as trophic interactions (Leveau, 2015).

Los estudios con HMA se han enfocado principalmente en determinar la respuesta de la planta a la micorriza, sin considerar detenidamente al endófito, dando la impresión de que estos hongos son funcionalmente equivalentes, contrario a esta suposición, se ha demostrado que tienen una gran diversidad fisiológica y adaptaciones específicas a las condiciones ambientales-edáficas en las que se desarrollan (Van der Heijden et al., 2015), por lo que se esperan también respuestas variadas (diversidad funcional) cuando se establecen en condiciones específicas.

Prueba de esto, es que se ha observado que las plantas micorrizadas se benefician en diferente magnitud dependiendo de los HMA que las colonicen y las condiciones bajo las que se cultiven (Smith y Read, 2008), generando así una distribución geográfica de abundancia de géneros y especies de hongos micorrízicos, que se modifica cuando alguna variable ecológica cambia.

En México, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) están presentes en todos los ecosistemas, pero debido a las condiciones edáficas y climáticas del país, se esperaría una mayor abundancia de estos en regiones boscosas o con cultivos perennes. A pesar de ello, y en congruencia con el nivel funcional de la diversidad (Sanders et al., 1999), se tienen identificadas y registradas 105 especies de HMA, de las cuales, aproximadamente la mitad se han encontrado en ecosistemas de clima árido y semiárido (Durango, sur de Hidalgo, Guanajuato, Oaxaca, Puebla y Sonora) (Chimal-Sánchez et al., 2016; Chimal-Sánchez et al., 2020; Montaña et al., 2007), el resto se ha estudiado en sistemas naturales y agrícolas de 11 estados del centro

Chart 3. New species of arbuscular mycorrhizal fungi described in Mexico.

Cuadro 3. Nuevas especies de hongos micorrízicos arbusculares descritas en México.

Genus and Species / Género y especie	Region / Región	Author / Autor
<i>Diversispora trimurales</i> <i>Gigaspora candida</i> <i>Glomus corymbiforme</i>	Tehuacán Valley, Oaxaca and Puebla	(Chimal-Sánchez et al., 2016)
<i>Septoglossum mexicanum</i>	Guanajuato	(Chimal-Sánchez et al., 2020)

The extension and nature of rhizosphere is influenced by abiotic agents such as pH, temperature, soil type, humidity, nutrient concentration, among others, and biotic agents where the mycorrhizal-plant interaction is of particular importance, as it allows the roots a larger exploration area in search of nutrients, provides tolerance to some abiotic agents and generates interactions with other microorganisms, transforming the rhizosphere into a *mycorrhizosphere* (Leveaus, 2015).

The benefits provided to the soil by the mycorrhizosphere, as well as the interaction between plant-microorganisms, have been exploited by humans in the production of food, regeneration or remediation of soil contaminated with metals, forestry, production of ornamentals, as well as adaptation of crops to environments with unfavorable edaphic and climatic conditions.

Influence of mycorrhizal fungi on plant development

Despite the different classifications and their wide distribution, all mycorrhizae establish associations with plant roots or structures that perform this function

- sur del país (Campeche, Chiapas, Estado de México, norte de Hidalgo, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Sonora, Tabasco, Veracruz, Yucatán), con otras condiciones climáticas (Montaño et al., 2007).

Los géneros más frecuentes descritos en ecosistema tropicales y subtropicales son *Acaulospora*, *Clareideoglossum*, *Rizhophagus septoglossum*, *Funneliformis*, mientras que *Gigaspora* y *Diversispora* en áridos y semiáridos, por otro lado, el género *Glomus* ha sido documentado en todo el país, adaptado a diversas condiciones edáficas. En el Cuadro 3, se han colocado los HMA encontrados en años recientes en México.

Hongos micorrízicos como microorganismos rizosféricos

El término *Rizosfera* fue propuesto por Lorenzo Hitler, quien lo definió como el compartimento del suelo influenciado por las raíces de las plantas, de este modo, la rizosfera es una capa del suelo de apenas unos milímetros de espesor, que posee una gran variedad y cantidad de microorganismos (es de 10-100 veces más rico en microorganismos que el resto de los estratos), en ella se lleva a cabo la liberación del 6-21 %

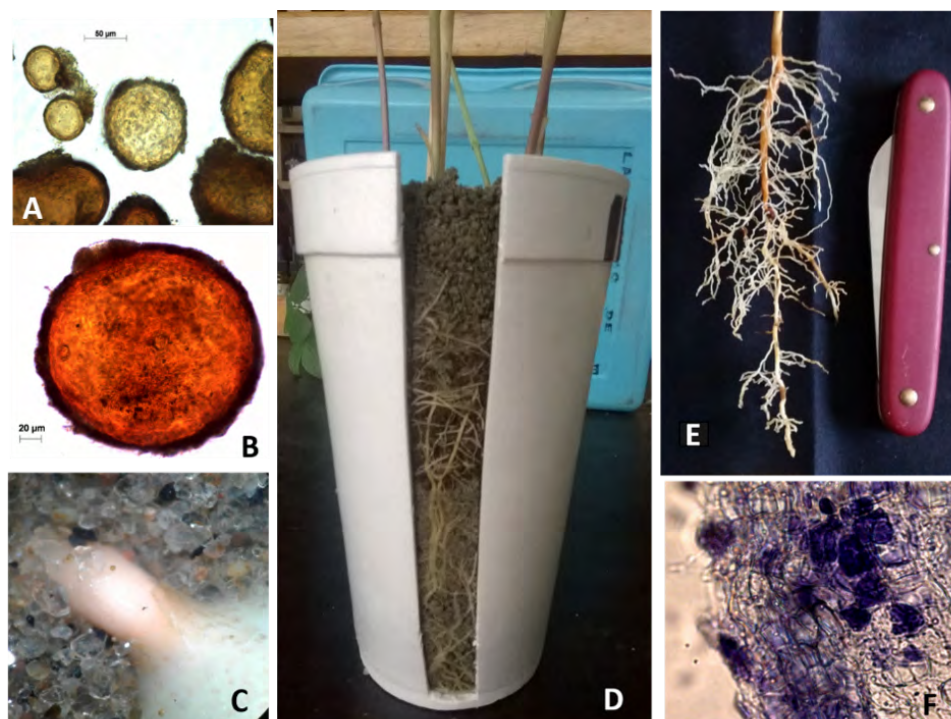


Figure 2. Mycorrhization process of superior plants. A and B spores of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); C seed germination with AMF spores; D and E root development of mycorrhizal plants; F AMF vesicles growing inside roots.

Figura 2. Proceso de micorrización de plantas superiores. A y B esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA); C semilla germinando con esporas de HMA; D y E desarrollo de raíz de plantas micorrizadas; F vesículas de HMA creciendo en el interior de raíces.

in lower plants, where a contact interface between hyphae and plant cells is observed, it is in this region where nutrient exchange takes place (Honrubia, 2009) and protection against edaphic (Camarena-Gutierrez, 2012; Diagne et al., 2020) and foliar pathogens is given (Herrera-Monroy et al., 2018; Juárez-García et al., 2021). Due to the mutualistic association that is established, plant species have a physiology and ecology different from those that do not form it, being the greatest radical development a key point for the survival of a great diversity of plant species in varied ecosystems (Brundrett and Tedersoo, 2018).

The best known example of the application of this interaction is the inoculation of rhizospheric microorganisms (both fungi and bacteria) that promote root growth and the absorption of nutrients such as phosphorus and nitrogen. This last practice is considered as biofertilization, since the visual effect of inoculated plants is compared with fertilization; that is, plants that establish associations with beneficial fungal or bacterial organisms show greater growth and development than those that do not, as happens when a plant is fertilized (Brundrett and Tedersoo, 2018).

In 2021, biofertilization combined with chemical fertilization and the application of organic fertilizers has been a proposed alternative to improve the yields of several crops (Wangiyana et al., 2023), since the increase in the prices of fuels and inputs such as nitrogen and phosphorus fertilizers, due to the war conflict between Russia and Ukraine (Suárez, 2022; SNIIM, 2023), as well as other factors that generate uncertainty, has caused a crisis of supply and access to them (FAO, 2022).

Specifically, inoculation with mycorrhizal fungi has shown acceptance among growers (Carrillo-Saucedo et al., 2022), since their colonization induces a relatively rapid and evident change in the root microenvironment, in such a way that the ecological niche of pathogens that can attack the host plant is modified. In addition, colonization favors the lignification of roots, increasing their volume and resistance, as well as the activation of host defense mechanisms (Poveda et al., 2019; Pozo and Azcón-Aguilar, 2007). Guzmán-Plazola and Ferrera-Cerrato (1990) state that this behavior is due to the fact that the established symbiosis favors an increase in physical absorption (increase in the area of soil in contact with the mycorrhiza) and this results in a greater capacity of the roots to absorb phosphorus, as well as other ions that are not very mobile.

Likewise, González-Ramírez and Pupo-Feira (2017) state that an increase in the mobility of elements

del carbono fijado y secretado por las raíces, además, es el lugar del suelo donde ocurre la mayor parte de ciclos de nutrimentos, así como interacciones tróficas (Leveau, 2015).

La extensión y naturaleza de la rizosfera se ve influenciada por agentes abióticos como pH, temperatura, tipo de suelo, humedad, concentración de nutrimentos, entre otros, y bióticos donde la interacción micorriza-planta tiene una particular importancia, pues permite a las raíces una mayor área de exploración en busca de nutrientes, brinda tolerancia ante algunos agentes abióticos y genera interacciones con otros microorganismos, transformando a la rizosfera en *mico-rizosfera* (Leveau, 2015).

Los beneficios proporcionados al suelo por la *mico-rizosfera*, así como la interacción entre planta-microorganismos han sido aprovechados por el ser humano en la obtención de alimentos, regeneración o remediación de suelos contaminados con metales, explotación forestal, producción de ornamentales, así como adaptación de cultivos a ambientes con condiciones edáficas y climáticas desfavorables.

Influencia de los hongos micorrízicos en el desarrollo vegetal

A pesar de las diferentes clasificaciones y de su amplia distribución, todas las micorrizas establecen asociaciones con las raíces vegetales o estructuras que desempeñan esta función en plantas inferiores, donde se observa una interface de contacto entre hifas y células vegetales, es en esta región donde se lleva a cabo el intercambio de nutrientes (Honrubia, 2009) y se da una protección contra patógenos edáficos (Camarena-Gutierrez, 2012; Diagne et al., 2020) y foliares (Herrera-Monroy et al., 2018; Juárez-García et al., 2021). Debido a la asociación mutualista que se establece, las especies vegetales presentan una fisiología y una ecología diferentes de aquéllas que no la forman, siendo el mayor desarrollo radical un punto clave para la supervivencia de una gran diversidad de especies vegetales en ecosistemas variados (Brundrett y Tedersoo, 2018).

El ejemplo más conocido de la aplicación de esta interacción es la inoculación de microorganismos rizosféricos (tanto hongos como bacterias) promotores de crecimiento radical y de absorción de nutrimentos como fósforo y nitrógeno. Esta última práctica es considerada como biofertilización, pues se compara el efecto visual de las plantas inoculadas con la fertilización; es decir, las plantas que establecen asociaciones con organismos fungosos o bacterianos benéficos presentan un mayor crecimiento y desarrollo

such as phosphorus, zinc, boron, magnesium, iron, among others, is propitiated through the fungal hyphae in the regions close to the root, in turn, organic acids and other compounds that convert elements fixed in the soil into soluble substances, generating an increase in the biological activity of the rhizosphere, accelerating the processes of mineralization and recycling of nutrients.

Regarding the increase in absorption mentioned above, this depends directly on the length that the hyphae of the mycorrhizal fungus reach during the symbiosis, as well as on the mycorrhizal species, but increases in phosphorus absorption ranging from 85 to 95 % are reported (Abou-El Seoud et al., 2020).

Role of mycorrhizal fungi in soil aggregate formation

It should be referenced that the soil aggregation process is complex and hierarchically structured (Morris et al., 2019), in which numerous organisms and cementing agents, as well as the abiotic factors play key roles (Yudina and Kuzyakov, 2019).

Arbuscular mycorrhizal fungi are an example of these organisms that favor the formation of soil structure through different mechanisms, the most direct of which is the effect on root development caused by their association with superior plants, which in turn generates soil retention. This process favors the consolidation of macro aggregates (>250 µm in diameter) in the edaphic structure (Morell et al., 2009; Morris et al., 2019). However, its effect is more profound, since AMF, in addition to favoring the development of the plant root system, during the symbiotic process develops hyphae and secretes cementing agents (Li et al., 2022).

On the one hand, hyphae functions as micro-networks that retain soil, while, during their biological cycle and mainly when decomposing, secrete glomalin, an insoluble glycoprotein, very abundant in mycorrhizal soils that favors the binding of fine particles and the formation of micro-aggregates (53 – 250 µm in diameter) (Morell et al., 2009).

Both the formation of edaphic micro and macro aggregates, and their retention and stabilization, favor a desirable composition of the soil structure, since the special and quantitative distribution of these is involved in the distribution of pores that in turn influence the bulk density and, therefore, the capacity of soil to retain water and air in optimal quantities to allow the development of life.

que aquellas que no lo hacen, tal como sucede cuando una planta es fertilizada (Brundrett y Tedersoo, 2018).

En el año 2021 la biofertilización combinada con la fertilización química y la aplicación de abonos orgánicos, ha sido una alternativa propuesta para mejorar los rendimientos de varios cultivos (Wangiyana et al., 2023), pues el incremento de los precios de los combustibles e insumos como fertilizantes nitrogenados y fosforados, debido al conflicto bélico ocurrido entre Rusia y Ucrania, (Suárez, 2022; SNIIM, 2023), así como otros factores que generan incertidumbre, ha provocado una crisis de abastecimiento y acceso a estos (FAO, 2022).

Específicamente la inoculación con hongos micorrízicos ha mostrado tener aceptación entre los productores (Carrillo-Saucedo et al., 2022), pues la colonización de estos induce un cambio relativamente rápido y evidente en el microambiente de las raíces, de tal forma que se modifica el nicho ecológico de los patógenos que pueden atacar a la planta hospedera. Además, la colonización favorece la lignificación de las raíces incrementando su volumen y resistencia, así como la activación de mecanismos de defensa del huésped (Poveda et al., 2019; Pozo y Azcón-Aguilar, 2007). Guzmán-Plazola y Ferrera-Cerrato (1990), mencionan que este comportamiento es debido a que la simbiosis establecida propicia un incremento de la absorción de carácter físico (aumento del área del suelo en contacto con la micorriza) y esto tiene como consecuencia una mayor capacidad de las raíces para absorber fósforo, así como otros iones poco móviles.

De igual manera González-Ramírez y Pupo-Feira (2017), plantean que se propicia un aumento de la movilidad de elementos como fósforo, zinc, boro, magnesio, hierro, entre otros, a través de las hifas del hongo en las regiones próximas a la raíz, a su vez, se secretan ácidos orgánicos y otros compuestos que convierten elementos fijados en el suelo en sustancias solubles, generando un incremento de la actividad biológica de la rizosfera, acelerando los procesos de mineralización y reciclaje de nutrientes.

Respecto al incremento en la absorción antes mencionada, esta depende directamente de la longitud que las hifas del hongo micorrízico alcanzan durante la simbiosis, así como de la especie micorrizada, pero se reportan incrementos en la absorción de fósforo que van del 85 al 95 % (Abou-El Seoud et al., 2020).

El papel de los hongos micorrízicos en la formación de agregados del suelo

Es preciso referir que el proceso de agregación del suelo es complejo y jerárquicamente estructurado

Conclusions

Arbuscular mycorrhizal symbiosis (AMF) is probably the most widespread beneficial interaction between plants and microorganisms. Several studies have estimated their diversity and taxonomic status using modern genomic tools. This information is important to understand the symbiotic relationships that are generated and that impact the nutrition, development and growth of host plants.

In recent years, the use of AMF as components of bio-fertilization products has become widespread since they improve crop responses to biotic/abiotic stress and participate in a number of essential ecosystem processes such as the formation of soil aggregates. Due to these characteristics, they have positioned themselves as an alternative with efficient results to substitute, or at least reduce, the application of chemical fertilizers whose prices threaten the costs of world agriculture.

On the other hand, the information available on arbuscular mycorrhizal fungi is sufficient to know and deepen in topics related to the taxonomy and relationships of these microorganisms with plants, as well as their role in the environment; however, 90 % of the articles found address particularities not relevant to this work or redundant information, in addition to the fact that most of the research is of limited access, making it impossible to disseminate the information for its subsequent application.

Acknowledgments

We would like to thank the Autonomous University of the State of Hidalgo for the physical spaces provided during the development of this research.

End of English version

References / Referencias

- Abou-El Seoud I. El Adly, I., R. M., Sadik, M. W., y Moghanm, F. S. (2020): Variation of Wheat Genotypes in Calcareous Soil as Affected by Root Growth and Mycorrhizal Hyphae— A Mechanistic Modeling Approach, Communications in Soil Science and Plant Analysis, DOI: 10.1080/00103624.2020.1744628
- Bárcena, G. F., Esther, M., Cadena, M., María, D., y Romero, Q. (2021). Cambio climático , afectaciones y acciones ambientales en jóvenes de entorno rural. In O. R. Castro Martínez y A. Villafuerte Salazar (Eds.), *Educación ambiental y estudios*

(Morris et al., 2019), en el cual numerosos organismos y agentes cementantes, así como los factores abióticos desempeñan funciones clave (Yudina y Kuzyakov, 2019).

Los hongos micorrízicos arbusculares, son un ejemplo de estos organismos que favorecen la formación de estructura del suelo a través de diferentes mecanismos, el más directo de ellos es el efecto sobre el desarrollo de raíces que su asociación con plantas superiores provoca y que a su vez genera retención de suelo. Este proceso favorece la consolidación de macro agregados (>250 µm de diámetro) en la estructura edáfica (Morell et al., 2009; Morris et al., 2019). Sin embargo, su efecto es más profundo, pues los HMA además de favorecer el desarrollo del sistema radical de plantas, durante el proceso simbiótico desarrolla hifas y secreta cementantes (Li et al., 2022).

Por un lado, las hifas funcionan como micro redes que retienen suelo, mientras que, durante su ciclo biológico y principalmente al descomponerse, secretan glomalina, una glicoproteína insoluble, muy abundante en suelos micorrizados que favorece la unión de partículas finas y la formación de microagregados (53–250 µm de diámetro) (Morell et al., 2009).

Tanto la formación de micro y macroagregados edáficos, como la retención y estabilización de estos, favorecen una composición deseable de la estructura de suelos, pues la distribución espacial y cuantitativa de estos está involucrada en la distribución de poros que a su vez influyen en la densidad aparente y, por lo tanto, en la capacidad de un suelo para retener agua y aire en cantidades óptimas para permitir el desarrollo de vida.

Conclusiones

La simbiosis de micorrizas arbusculares (HMA) es probablemente la interacción beneficiosa más extendida entre plantas y microorganismos. Varios estudios han estimado la diversidad de estos, así como su estatus taxonómico utilizando herramientas genómicas modernas. Esta información resulta importante pues permite entender las relaciones simbióticas que se generan y que impactan en la nutrición, desarrollo y crecimiento de las plantas hospedadoras.

En los últimos años el uso de los HMA como componentes de productos para la biofertilización se ha extendido puesto que mejoran las respuestas de cultivos ante estrés biótico/abiótico, además de que participan en una serie de procedimientos esenciales del ecosistema como la formación de agregados de suelo. Por estas características se han posicionado como una alternativa con resultados eficientes para sustituir, o cuando menos reducir, la aplicación de

- biológicos. *Aportes e investigaciones en tiempos de pandemia* (pp. 136–150). Universidad Autonoma Chapingo.
- Blackwell, M. (2011). The fungi: 1, 2, 3 ... 5.1 million species? *American Journal of Botany*, 98(3), 426–438. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000298>
- Bonfante, P. (2018). The future has roots in the past: the ideas and scientists that shaped mycorrhizal research. *New Phytologist*, 220(4), 982–995. <https://doi.org/10.1111/nph.15397>
- Brundrett, M. C., y 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>
- 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>
- Camargo-Ricalde, L., Montaña, N. M., De la Rosa-Mera, C. J., y Arias Montaña, S. A. (2012). Micorrizas: Una Gran Unión Debajo Del Suelo. *Revista Digital Universitaria*, 13, 19. <https://acortar.link/q38rAa>.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., y Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta botánica mexicana*, (129). <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Chimal-Sánchez, E., Montaña, N. M., Camargo-Ricalde, S. L., García-Sánchez, R., y Hernández-Cuevas, L. V. (2016). New records of arbuscular mycorrhizal fungi for Mexico. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, 87(1), 242–247.
- Chimal-Sánchez, E., Senés-Guerrero, C., Varela, L., Montaña, N. M., García-Sánchez, R., Pacheco, A., Montaña-Arias, S. A., y Camargo-Ricalde, S. L. (2020). Septoglomus mexicanum, a new species of arbuscular mycorrhizal fungi from semiarid regions in Mexico. *Mycologia*, 112(1), 121–132. <https://doi.org/10.1080/00275514.2019.1671147>
- Dai, Y. C., Cui, B. K., Si, J., He, S. H., Hyde, K. D., Yuan, H. S., Liu, X. Y., y Zhou, L. W. (2015). Dynamics of the worldwide number of fungi with emphasis on fungal diversity in China. *Mycological Progress*, 14(8). <https://doi.org/10.1007/s11557-015-1084-5>
- Diagne, N., Ngom, M., Djighaly, P. I., Fall, D., Hocher, V., y Svistoonoff, S. (2020). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: importance in biotic and abiotic stressed regulation. *Diversity*, 12(10), 1–25. <https://doi.org/10.3390/d12100370>
- FAO (Organización de las Naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2022). El mercado mundial de fertilizantes: balance de la situación de un mercado en dificultades. <https://www.fao.org/3/ni280es/ni280es.pdf>.
- Gonzalez-Ramírez, G., y Pupo-Feira, C. (2017). Aplicación de micorrizas: alternativa ecológica para la disminución o sustitución de fertilizantes químicos en el cultivo del maní. *Revista Desarrollo Local Sostenible*. 10(29): 2:10. <http://hdl.handle.net/20.500.11763/delos29cultivo-mani-cuba>
- fertilizantes químicos cuyos precios amenazan los costos de la agricultura mundial.
- Por otro lado, la información disponible sobre hongos micorrizicos arbusculares, es basta, para conocer y profundizar en temas referentes a la taxonomía y las relaciones de estos organismos con plantas, así como el papel de estos en el medio ambiente, sin embargo, el 90 % de los artículos encontrados abordan particularidades no relevantes para este trabajo o información redundante, además de que la mayoría de las investigaciones son de acceso limitado, imposibilitando la difusión de la información para su posterior aplicación.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por los espacios físicos facilitados durante el desarrollo de la presente investigación.

Fin de la versión en español

- Guzmán- Plazola, R., y Ferrera- Cerrato, R. (1990). La endomicorriza vesiculo-arbuscular en las leguminosas. Colegio de Postgraduados, México, 119 p.
- Hawksworth, D. L., y Lücking, R. (2017). Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species. *The Fungal Kingdom*, 2, 79–95. <https://doi.org/10.1128/9781555819583.ch4>
- Herrera-Monroy, S., Castro-Brindis, R., y Pérez-Moreno, J. (2018). Caracterización e implicaciones ecológicas de endomicorrizas y su efecto protector contra roya del café. In E. Velázquez Cigarroa y O. R. Castro Martínez (Eds.), *Educación Ambiental y Sustentabilidad* (Primera ed, pp. 385–400). Universidad Autonoma Chapingo, Departamento de Preparatoria Agrícola.
- Honrubia, M. (2009). Las micorrizas: Una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 66(SUPPL. 1), 133–144. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2226>
- Hyde, K. D., Norphanphoun, C., Chen, J., Dissanayake, A. J., Doilom, M., Hongsan, S., Jayawardena, R. S., Jeewon, R., Perera, R. H., Thongbai, B., Wanasinghe, D. N., Wisitrassameewong, K., Tibpromma, S., y Stadler, M. (2018). Thailand's amazing diversity: up to 96% of fungi in northern Thailand may be novel. *Fungal Diversity*, 93(1), 215–239. <https://doi.org/10.1007/s13225-018-0415-7>
- Juárez-García, M. F., Quiñones-Aguilar, E. E., y Rincón Enríquez, G. (2021). Efecto de hongos micorrizicos arbusculares en crecimiento de plantas de café en condiciones de invernadero. In Oswaldo Rahmses Castro Martínez y A. Villafuerte Salazar (Eds.), *Educación ambiental y estudios*

- biológicos. *Aportes e investigaciones en tiempos de pandemia* (pp. 221–232). Universidad Autonoma Chapingo.
- Jurado Rojas, Y. (2005). *Técnicas de Investigacion Documental*. International Thomson Editores.
- Kirk, P., Cannon, P. F., David, J. C., y Stalpers, J. A. (2010). *Dictionary of the Fungi*. CAB International. Oxon, UK. 771 pp.
- Leveau, J. H. J. (2015). Life of Microbes on Aerial Plant Parts in Lugtenberg B. (ed.). 2015. *Principles of Plant-Microbe Interactions*. Springer International Publishing Switzerland. pp 447.
- Li, Y., Xu, J., Hu, J., Zhang, T., Wu, X., y Yang, Y. (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Glomalin Play a Crucial Role in Soil Aggregate Stability in Pb-Contaminated Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph19095029>
- Montaño N. M, Camargo-Ricalde S. L, y García-Sánchez R, M. A. (2007). Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos. In M. A. Montaño N. M, Camargo-Ricalde S. L, García-Sánchez R. (Ed.), *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Mundi-prensa S.A de C.V. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193221673005>
- Morell, F., Hernández, A., Borges, Y., y Marentes, F. L. (2009). Revisión bibliográfica la actividad de los hongos micorrízicos arbusculares en la estructura del suelo. *Cultivos Tropicales*, 30(4), 25–31. <https://acortar.link/tvE8rf>
- Morris, E. K., Morris, D. J. P., Vogt, S., Gleber, S. C., Bigalke, M., Wilcke, W., y Rillig, M. C. (2019). Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi. *ISME Journal*, 13(7), 1639–1646. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0369-0>
- Palacios-Zambrano, J. J., y García, V. S. G. (2021). Influencia de dosificaciones de biofertilizantes compuestos por micorrizas y diazotófos sobre la productividad del maíz. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of STEAM*, 953–961. <https://doi.org/10.18502/espoch.v1i2.9513>
- Pérez-Moreno, J., Guerin-Laguette, A., Flores-Arzú, R., y Yu, F.-Q. (2020). Mushrooms, Humans and Nature in a Changing World. In *Mushrooms, Humans and Nature in a Changing World*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37378-8>
- Pérez-Moreno, J., y Read, D. (2004). Los hongos ectomicorrízicos, lazos vivientes que conectan y nutren a los árboles en la naturaleza. *Interciencia*, 29(5), 239–247.
- Pérez A., Espitia F., Núñez A., y Jiménez R. (2015). Diversidad de géneros de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a pasto colosuana (*Bothriochloa pertusa* (L) A. Camus) en suelos compactados y no compactados del municipio de San Marcos, Sucre-Colombia. *Rev Colombiana Cienc Anim. - RECIA*. 7(2):185–190. <https://doi.org/10.24188/recia.v7.n2.2015.267>
- Poveda, J., Hermosa, R., Monte, E., y Nicolás, C. (2019). *Trichoderma harzianum* favours the access of arbuscular mycorrhizal fungi to non-host Brassicaceae roots and increases plant productivity. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48269-z>
- Pozo, M. J., y Azcón-Aguilar, C. (2007). Unraveling mycorrhiza-induced resistance. *Current Opinion in Plant Biology*, 10(4), 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.05.004>
- Prieto Castellanos, J. B. (2017). Métodos deductivo e inductivo. *Cuadernos de Contabilidad*, 18(46), 10–13. <https://doi.org/DOL:https://doi.org/10.11144/Javeriana.cc18-46.umdi>
- Purvis, A., y Héctor, A. (2000). Getting the measure of biodiversity. *Nature*, 405(6783), 212–219. <https://doi.org/10.1038/35012221>
- Rivera Páez; F. A., González Salazar, V., González Acosta, J. G., y Ossa López, P. A. (2016). Caracterización molecular, análisis morfológico y colonización micorrízica en la rizósfera del aguacate (*Persea americana* Mill) en Caldas, Colombia. *Acta Agronómica*. 65(4):398–405. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n4.51714> [Links]
- Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S. L., Morton, J. B., y Walker, C. (2013). An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23(7), 515–531. <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y>
- Reyes-Ruiz, L., y Carmona Alvarado, F. A. (2020). La investigación documental para la comprensión ontológica del objeto de estudio (pp. 1–9). Universidad Simón Bolívar.
- Sanders, I., Koide R. T., y Shumway, D. L. (1999). Diversity and structure in natural communities: The role of the mycorrhizal symbiosis. In: Varma, A. y B. Hock (eds.) *Mycorrhiza: Structure, Function, Molecular Biology and Biotechnology*, second edition, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Schüßler, A., y Walker, C. (2010). The Glomeromycota. The Royal Botanic Garden Kew, December 2010. <https://acortar.link/JI7zZb>
- Schoch C. L, Ciufo S., Domrachev M., Hotton C., Kannan S., Khovanskaya R., Leipe D., Mcveigh R., O'Neill, K., Robbertse B., Sharma S., Soussov V., Sullivan J., Sun L., Turner S., y Karsch-Mizrachi I. (2020). NCBI Taxonomy: a comprehensive update on curation, resources and tools. *Database* (Oxford).
- Smith, S., y Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. 2° Ed. Academic Press. ISBN 9780123705266. 800 pp.
- SNIIM (Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. Consulta de insumos agrícolas de mercados nacionales e internacionales. (2023). http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/Home.aspx?opcion=inf_disp.asp
- Suarez, K. (2022, marzo, 30). Los fertilizantes en México multiplican su precio ante la ofensiva rusa en Ucrania. El País. <https://elpais.com/mexico/2022-03-31/los-fertilizantes-en-mexico-multiplican-su-precio-ante-la-ofensiva-rusa-en-ucrania.html>
- Soto S., Jimilgtón E., Pinto L., Jesús E., y Millán Rojas, E. E. (2022). Micorrizas arbusculares y las técnicas de visión artificial para su identificación. *TecnoLógicas*, 25(54), e302. Epub October 28, 2022. <https://doi.org/10.22430/22565337.2348>
- Tedersoo, L., Sánchez-Ramírez, S., Kõljalg, U., Bahram, M., Döring, M., Schigel, D., May, T., Ryberg, M., y Abarenkov, K. (2018). High-level classification of the Fungi and a tool for evolutionary ecological analyses. *Fungal Diversity*, 90(1), 135–159. <https://doi.org/10.1007/s13225-018-0401-0>

- Valencia-López, V. E. (2016). Revisión documental. *Revista Chakiñan*, 46–56.
- Valera, L., y Trejo, D. (2001). Los Hongos Micorrizógenos arbusculares como componentes de la biodiversidad del suelo en México. *Acata Zoologica Mexicana*, 1, 39–51.
- Van der Heijden, M. G. A., Martin, F. M., Selosse, M. A., y Sanders, I. R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: The past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205(4), 1406–1423. <https://doi.org/10.1111/nph.13288>
- Wangiyana, Wayan & Aryana, I & Dular, N. (2021). Mycorrhiza biofertilizer and intercropping with soybean increase anthocyanin contents and yield of upland red rice under aerobic irrigation systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 637. 012087. 10.1088/1755-1315/637/1/012087.
- Wu, B., Hussain, M., Zhang, W., Stadler, M., Liu, X., y Xiang, M. (2019). Current insights into fungal species diversity and perspective on naming the environmental DNA sequences of fungi. *Mycology*, 10(3), 127–140. <https://doi.org/10.1080/21501203.2019.1614106>
- Yudina, A., y Kuzyakov, Y. (2019). Saving the face of soil aggregates. *Global Change Biology*, 25(11), 3574–3577. <https://doi.org/10.1111/gcb.14779>