

EL PAPEL DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS EN LOS ECOSISTEMAS: CONECTANDO LA VIDA BAJO TIERRA

Irazú Margarita Calderón Tinajero ^{a*}, Edgar Manuel Villa Villa ^b, Karla Ivonne
González Martínez ^b

^a Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria
Alta s/n, Guanajuato, Gto., 36050. im.calderontinajero@ugto.mx

^b Centro Multidisciplinario de Estudios en Biotecnología (CMEB), Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo, Fraccionamiento Metrópolis II, Tarímbaro, Michoacán de Ocampo, 58893.

Resumen

Los hongos micorrízicos desempeñan un papel esencial en los ecosistemas terrestres al establecer asociaciones simbióticas con las raíces de la mayoría de las plantas. Estas interacciones permiten la formación de redes subterráneas complejas conocidas como la Wood Wide Web que facilitan el intercambio de nutrientes, agua y señales químicas entre individuos vegetales. Esta revisión aborda la diversidad morfológica, genética y funcional del reino del reino fungí, destacando los fillos clave involucrados en la formación de micorrizas, así como sus estrategias ecológicas como saprofitos, patógenos o mutualistas. Se profundiza en la coevolución de los hongos con otros organismos y en la importancia de las redes micorrizas para la resiliencia, estabilidad y dinámica de los ecosistemas.

Palabras clave: Micorrizas; Redes del suelo; Diversidad fúngica; Simbiosis planta-hongo

THE ROLE OF MYCORRHIZAL FUNGI IN ECOSYSTEMS: CONNECTING LIFE UNDERGROUND

Abstract

Mycorrhizal fungi play an essential role in terrestrial ecosystems by establishing symbiotic associations with the roots of most plants. These interactions enable the formation of complex underground networks known as the Wood Wide Web, which facilitate the exchange of nutrients, water, and chemical signals between plant individuals. This review addresses the morphological, genetic, and functional diversity of the fungi kingdom, highlighting the key phyla involved in mycorrhizal formation, as well as their ecological strategies as saprophytes, pathogens, and mutualists. It delves into the coevolution of fungi with other organisms and the importance of mycorrhizal networks for ecosystem resilience, stability, and dynamics.

Keywords: Mycorrhizae; Soil networks; Fungal diversity; Plant-fungus symbiosis

1. Introducción

Bajo la superficie de los suelos forestales se extiende una red invisible, compleja y esencial para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres. Este mundo subterráneo se compone principalmente por hongos micorrízicos. La simbiosis entre las raíces de las plantas y ciertos hongos, constituyen una de las relaciones mutualistas más antiguas y exitosas del planeta. Los hongos micorrízicos desempeñan funciones críticas en los ecosistemas terrestres. Son clave en el reciclaje de nutrientes, la formación y estabilización de suelos, la promoción de la biodiversidad vegetal y la facilitación de la comunicación entre organismos vegetales. (Smith y Read, 2010; Tedersoo y col., 2014). A través de estas asociaciones, se forma un sistema interconectado de intercambio de nutrientes, agua y señales químicas denominado metafóricamente como la Wood Wide Web (Simard y col., 1997; Beiler y col., 2010).

El objetivo de esta revisión es describir el papel de los hongos micorrízicos en la conformación de redes tróficas subterráneas, con énfasis en el concepto de la Wood Wide Web y el rol funcional de las micorrizas como mediadoras del transporte de nutrientes y

señales entre plantas, destacando su impacto en la dinámica y resiliencia de los ecosistemas terrestres.

2. La diversidad del reino Fungi

El reino Fungi constituye uno de los grupos más diverso de organismos eucariotas. Se caracterizan por su nutrición heterótrofa por absorción, los hongos son actores cruciales en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes (Spatafora y col., 2017). Las células fúngicas poseen una pared celular compuesta principalmente por quitina, un polisacárido que brinda resistencia mecánica, β -glucanos, que forman una red fibrilar que mantiene la integridad de la pared, mananos y galactomananos, asociados a proteínas estructurales, que participan en procesos de reconocimiento e interacción con el entorno, como se muestra en la Figura 1. Estos componentes aportan rigidez, protección y flexibilidad funcional a las células. La mayoría de las especies fúngicas presentan una organización filamentosa constituida por estructuras tubulares microscópicas llamadas hifas que se ramifican y entrelazan para formar una red expansiva conocida como micelio. Es esta estructura la encargada de explorar diferentes sustratos, absorber

nutrientes y formar extensas redes subterráneas (Montiel y col., 2025).

La clasificación de los hongos sustentada en estudios moleculares, estiman entre 2,2 a 3,8 millones de especies diferentes. Actualmente se reconocen ocho filos taxonómicamente distintos de los cuales Ascomycota y Basidiomycota (subreino Dikarya) son los más estudiados. Otros filos como

Blastocladiomycota, Chytridiomycota, Mucoromycota, Zoopagomycota, Cryptomycota y Microsporidia representan linajes basales y menos caracterizados (Priest y col., 2020).

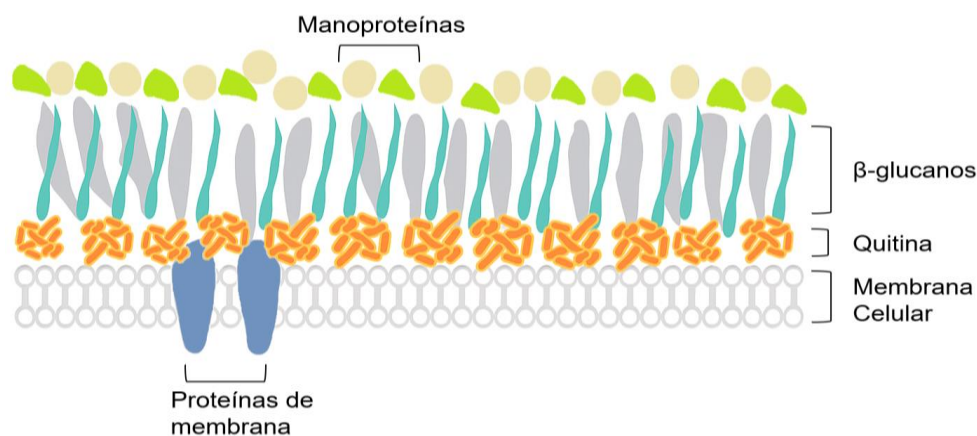


Figura 1. Representación esquemática de la pared celular fúngica.

2.2 La diversidad dentro del reino fúngico

La diversidad dentro del reino fúngico es evidente desde las perspectivas genética pero también manifiesta una notable variedad morfológica y funcional.

Diversidad Morfológica: Se observa una gran plasticidad en las estructuras, desde hifas individuales finas hasta la agregación de hifas en cordones miceliales o rizomorfos, que son

estructuras más robustas y especializadas en la exploración a larga distancia y el transporte de recursos. Los tipos de micelio pueden diferenciarse funcionalmente, por ejemplo, en micelio explorador, que se extiende en el suelo para captar nutrientes, y micelio absortivo, más directamente involucrado en la interfaz con la raíz (Bago y col., 2004).

■ **Diversidad Funcional:** Los hongos exhiben una amplia gama de capacidades funcionales.

La producción de un arsenal de enzimas extracelulares que les permiten acceder a fuentes de nutrientes orgánicos e inorgánicos que de otro modo serían inaccesibles para las plantas, y su diferente tolerancia a estreses ambientales. Una ilustración clara de esta diversidad funcional es la capacidad de algunos hongos para descomponer materia orgánica compleja y acceder a nutrientes orgánicos, como el nitrógeno orgánico (Pena y Tibbett, 2024).

3. La importancia de los hongos en los ecosistemas

Los hongos son microorganismos ubicuos, es decir se pueden encontrar en diferentes ecosistemas desempeñando roles cruciales, que pueden entenderse mejor a través de una clasificación funcional basada en sus estrategias de obtención de nutrientes. Tradicionalmente, se distinguen tres grupos principales: saprofitos, patógenos y mutualistas. (Antoni y col., 2022; Boddy, 2016; Bahram y Netherway, 2022).

Los hongos saprofitos obtienen sus nutrientes principalmente de la materia orgánica en descomposición como la hojarasca, madera y restos animales (Zanne y col., 2019). Este proceso pone en movimiento nutrientes que

estaban paralizados en la biomasa muerta, poniéndolos a disposición de otros organismos.

Los hongos patógenos desempeñan roles ecológicos importantes, como la regulación de las poblaciones de sus hospedadores, la regeneración y la sucesión, y el impulso de la diversidad genética a través de la selección natural. Aunque a menudo se les considera perjudiciales desde una perspectiva antropocéntrica (por ejemplo, por las pérdidas que causan en cultivos agrícolas) (Andrews e Hirano 2012; Hyde y col., 2014)

En las interacciones mutualistas, ambos organismos implicados obtienen un beneficio neto de la asociación. Los hongos participan en diversas simbiosis mutualistas de gran importancia ecológica:

Los hongos endófitos, se caracterizan por habitar plantas vivas y no causar ningún tipo de enfermedad. Por el contrario, los endófitos producen metabolitos secundarios que protegen a la planta hospedadora contra herbívoros, insectos o patógenos fúngicos y bacterianos. También mejoran la tolerancia de la planta al estrés abiótico. Simbiosis como los líquenes representan una relación íntima y obligada entre un hongo y un organismo

fotosintético, capaces de colonizar ambientes extremos y desempeñan un papel importante como pioneros en la sucesión ecológica y formación del suelo (Glandieux y col., 2014).

Los hongos micorrízicos colonizan las raíces de una planta. El hongo mejora la captación de nutrientes minerales y agua del suelo para la planta, y también puede conferirles mayor tolerancia. A cambio, la planta suministra al hongo compuestos carbonados (azúcares) producidos durante la fotosíntesis. (Smith y Read, 2008; Wang y col., 2022).

4. Hongos y su relación con otros organismos

La larga historia de coevolución entre los hongos y otros organismos, especialmente plantas e insectos, ha sido una fuerza motriz fundamental en la diversificación de las estrategias de vida fúngicas y en la evolución (Schultz y col., 2024). Las interacciones hongo-insecto, que incluyen la patogenicidad de hongos hacia insectos, la micofagia y la dispersión de esporas fúngicas mediada por los mismos, imponen presiones selectivas recíprocas que modelan los rasgos de ambos grupos de organismos. Estas intensas y prolongadas presiones evolutivas han resultado en la producción por parte de los

hongos de una vasta y químicamente diversa gama de productos naturales, que incluyen toxinas, antibióticos, pigmentos, compuestos que alteran el comportamiento de los animales, y muchos otros (Maurice-Lira, 2025). Las interacciones de los hongos con este amplio espectro de plantas, animales y otros microorganismos no ocurren de forma aislada, sino que tejen una red compleja de dependencias e influencias mutuas. Esta red de interacciones bióticas modula de manera significativa la estructura, la persistencia y la funcionalidad de las Redes Miceliales (Orlovskis y col., 2024).

5. Hongos y redes tróficas: La "Wood Wide Web"

El estudio de redes es de gran importancia, ya que se utiliza para analizar las interacciones en ecología, (Jordano, 2009). La existencia de redes subterráneas formadas por hongos micorrízicos que conectan las raíces de diferentes plantas, la llamada red forestal o Wood Wide Web, es un término acuñado en la rama de la ecología a finales de 1990, (Simard y col., 1997). Gracias al trabajo de Suzanne Simard, en los bosques de Columbia Británica, Canadá donde se percató que los árboles parecían compartir recursos, como carbono. Previo a esto, Simard publicó un

estudio donde demostró el intercambio de carbono que los árboles hacían través de redes interconectadas mediante el uso de isótopos radiactivos, usando dióxido de carbono marcado con carbono-14 y carbono-13 para rastrear (específicamente abetos de Douglas y abedules) (Simard y col., 1997). Estas redes son posibles gracias a los hongos micorrízicos, en particular, los que forman asociaciones con las raíces de los árboles. Aunque el papel de las micorizas era previamente conocido, fue el trabajo de Simard el que reveló su función ecológica como red de comunicación entre las plantas. Y El término Wood Wide Web fue popularizado por el periodista ambiental Richard Grant (Grant, 1997).

La importancia ecológica de estas redes radica en la dinámica y resiliencia de los ecosistemas, ya que permiten el intercambio de recursos, la estructura funcional de la Wood Wide Web, en la Figura 2 se representa la conectividad entre plantas mediada por micorizas y ayuda a visualizar cómo se distribuyen los recursos a través del micelio depende de la interacción sinérgica de hongos micorrízicos, plantas y el suelo como medio físico, siendo las micorizas (Figura 3) el componente fúngico de la red, estableciendo

interacciones simbióticas con las raíces de la mayoría de las plantas presentes.

En esta red simbiótica, las plantas actúan como nodos de intercambio, conectadas entre sí a través de los micelios fúngicos. Estudios experimentales, han demostrado que diferentes especies vegetales, incluso en distintos géneros, pueden estar interconectadas, lo que permite el movimiento de recursos, y señales químicas entre individuos (Simard y col., 1997). Asimismo, se ha propuesto que ciertas especies vegetales cumplen un rol central dentro de estas redes, actuando como nodos dominantes en la redistribución de nutrientes, los árboles adultos conocidos como “árboles madre”, que se conectan a plántulas y otras especies favoreciendo su crecimiento. (Beiler y col., 2010).

El suelo, además, de albergar una comunidad microbiana diversa que puede modificar las interacciones planta-hongo, es el sustrato que permite el establecimiento físico de estas redes. Actúa no solo como soporte mecánico, sino también como medio de transferencia de agua, nutrientes, y señales químicas. Su composición, incluyendo su pH, contenido de materia orgánica, y estructura porosa, influye directamente en la formación, extensión y

eficacia de las redes micorrízicas. (van der Heijden y col., 2015)

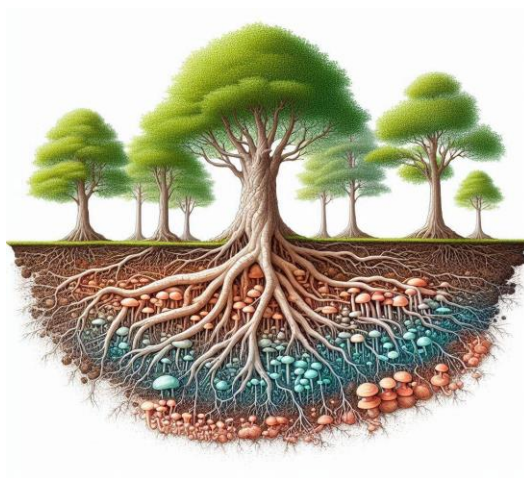


Figura 2. Imagen representativa de la Wood wide web por Bing Image Creator. (2024). *[Imagen generada por IA de la Wood Wide Web]*. <https://sl.bing.net/bAzCjOpSEOi>

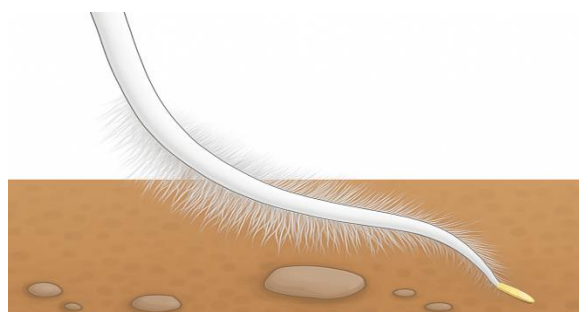


Figura 3. Micorrizas fúngicas *[Imagen generada por IA]*.

6. Las micorrizas: alianzas subterráneas con las plantas

Las micorrizas participan en estas redes de dos maneras, como ectomicorrizas (EM) y endomicorrizas o micorrizas arbusculares (HMA). Las ectomicorrizas (EM) observadas principalmente en árboles de zonas templadas, forman una vaina alrededor de la

raíz y desarrollan una red entre las células corticales sin penétralas (Smith, y Read, 2010). Por otro lado, las endomicorrizas (HMA), que son más comunes en plantas herbáceas y cultivos, penetran las células corticales de las raíces, formando estructuras intracelulares especializadas como arbuscúlos y vesículas. (Brundrett y

Tedersoo, 2018). Ambos tipos facilitan el intercambio de nutrientes, especialmente fósforo y nitrógeno, a cambio de carbono fotosintético de la planta hospedera.

Existen otros tipos de micorrizas con formas especializadas, las cuales son resultado de adaptaciones a ciertos tipos de plantas. Las micorrizas ericoides (ERM) se presentan en plantas de la familia Ericaceae (como brezos y arándanos) adaptados a suelos ácidos y pobres. Los hongos penetran las células radicales y ayudan en la descomposición de materia orgánica para liberar nutrientes (Smith y Read, 2010). Las micorrizas orquidioides (OM) como su nombre lo indica, son propias de las orquídeas, las plántulas dependen completamente de sus hongos simbioses para germinar y obtener carbono durante las primeras etapas del desarrollo, ya que no tienen clorofila funcional (Yamato y col., 2005). Las ectomicorrizas (EEM) presentan características mixtas, ya que combinan una colonización extracelular tipo ectomicorriza con estructuras intracelulares parecidas a arbusculos. Son menos frecuentes y se presentan en algunas plantas tropicales y en ciertos ambientes extremos (Smith y Read, 2010). En la Figura 4 se muestra una

representación visual de estas asociaciones simbióticas, comparadas en la Tabla 1.

6.1 Filos relevantes en la formación de micorrizas

La subdivisión Glomeromycota (dentro Mucoromycot) comprende exclusivamente a los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) que forman asociaciones endomicorrízicas con el 70-80% de las especies vegetales (Wang y col., 2024). Se han identificado cuatro órdenes de HMA, Glomerales, Archaeosporales, Paraglomerales y Diversisporales. Estos hongos son biótropos obligados e ingieren productos fotosintéticos vegetales y lípidos para cumplir su ciclo de vida. Los HMA ayudan a la planta hospedadora en condiciones estresantes al mediar una serie de eventos de comunicación entre planta y hongo que conducen a una mayor tasa fotosintética, así como una mayor absorción de agua. Esta simbiosis fúngica ayuda a una mayor resistencia a la temperatura, salinidad sequía, metales pesados, herbivoría y enfermedades (patógenos radiculares) (Begum y col., 2019).

El subreino Dikarya incluye especies que establecen ectomicorrizas (EM), predominantes en bosques templados y

boreales (El Amrani, 2024). A diferencia de las especies de Glomeromycota donde existe una dependencia casi obligada con sus hospedadores para la fuente de carbono. Las especies de Basidiomycota y Ascomycota presentan una mayor flexibilidad ecológica, asumiendo roles mutualistas, descomponedores o incluso patógenos (Bahram t Netherway, 2022).

El conocimiento de la relación entre hospedador, hongo y el filo al que pertenecen es fundamental para los programas de restauración agrícola y forestal, debido a que permite conocer la compatibilidad planta-

hongo y así poder elegir los inoculantes micorrízicos adecuados para cada contexto (Mishra y col., 2024). Por ejemplo, en la agricultura sostenible el uso de HMA asociados a cultivos como trigo, maíz o soya mejora la absorción de agua y fósforo lo que reduce el uso de fertilizantes sintéticos y aumenta la tolerancia al estrés hídrico. En una restauración forestal, la inoculación de plántulas de pino u otras especies con hongos ectomicorrízicos acelera el establecimiento en suelos degradados y favorece la regeneración del ecosistema (Policelli y col., 2020).

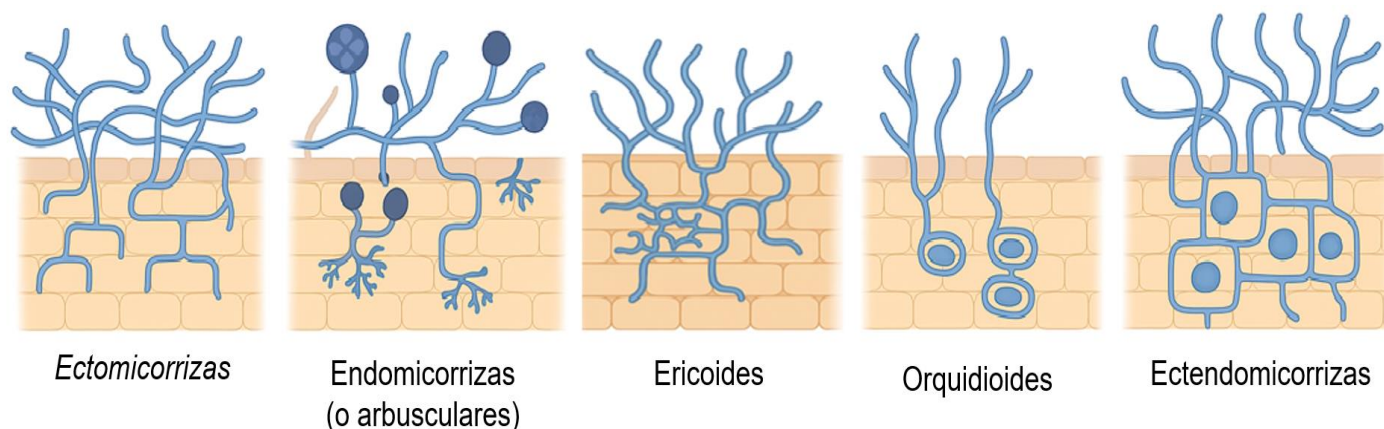


Figura 4. Tipos principales de micorrizas ilustradas: ectomicorrícica (ECM), endomicorrizas (HMA), ericoide (ERM), orquidoide (OM), y ectendomicorrícica (EEM). [La ilustración fue elaborada con IA y BioRender].

Tabla 1. Tipos de micorrizas: características clave y beneficios para las plantas.

Tipo de micorriza	Plantas asociadas	Estructuras fúngicas clave	Mecanismo de nutrición
Ectomicorrizas (ECM)	Árboles templados y boreales (Pinus, Quercus, Betula, Fagus)	Manto fúngico externo, red de Hartig intercelular	Intercambio mutuo; absorción eficiente de N y P orgánico
Endomicorrizas (HMA)	>80% de plantas vasculares (gramíneas, leguminosas, hortalizas, árboles tropicales)	Hifas intracelulares, arbuscúlos, vesículas	El hongo provee P, N y agua; la planta aporta carbohidratos
Ericoide (ERM)	Ericáceas (Calluna, Vaccinium – brezos y arándanos)	Bobinas hifales (coils) intracelulares	Absorción de nutrientes en suelos ácidos y pobres
Orquidoide (OM)	Orquídeas (semillas y adultos)	Pelotones de hifas intracelulares	Durante la germinación, la planta depende del hongo para C y minerales
Ectendomicorrizas (EEM)	Coníferas (Pinus) y algunas angiospermas	Manto externo y penetración intracelular	Intermedia ECM–AM; intercambio bidireccional

7. Conclusiones

Las micorrizas representan una de las alianzas ecológicas más antiguas y extendidas en la historia de la vida terrestre. Este mutualismo subterráneo establecido entre hongos y la mayoría de las plantas vasculares, ha sido

fundamental en la colonización, y es clave en el funcionamiento y estabilidad de los ecosistemas.

En el futuro, el estudio de las redes micorrízicas se puede ver impulsado por avances en tecnologías de visualización y

trazado de nutrientes. Ya que al comprender cómo se forman y operan estas redes permitirá diseñar soluciones integrativas para enfrentar desafíos como el cambio climático. Así, las micorrizas no solo representan una simbiosis entre plantas y hongos, sino también entre la ecología fundamental y la innovación biotecnológica al servicio de la sustentabilidad.

Agradecimientos

Los autores expresan su más sincero agradecimiento al Dr. Julio César Villagómez Castro y al Dr. Gerardo Vásquez Marrufo por sus valiosas aportaciones, orientación y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Referencias bibliográficas

Andrews, J. H. y Hirano, S. S. (Eds.). (2012). *Microbial Ecology of Leaves*. Springer Science & Business Media.

Anthony, M. A., Romero-Olivares, A. L. y Truong, C. (2022). Fungi in a Changing World. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 917430.

Bago, B., Cano, C., Azcón-Aguilar, C., Samson, J., Coughlan, A. P. y Piché, Y. (2004). Differential morphogenesis of the extraradical mycelium of an arbuscular

mycorrhizal fungus grown monoxenically on spatially heterogeneous culture media. *Mycologia*, 96(3), 452–462.

Bahram, M. y Netherway, T. (2022). Fungi as mediators linking organisms and ecosystems. *FEMS Microbiology Reviews*, 46(2).

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M. y Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068.

Beiler, K. J., Durall, D. M., Simard, S. W., Maxwell, S. A. y Kretzer, A. M. (2010). Architecture of the wood-wide web: Rhizopogon spp. genets link multiple Douglas-fir cohorts. *New Phytologist*, 185(2), 543–553.

Boddy, L. (2016). Fungi, ecosystems, and global change. In *The Fungi* (pp. 361–400). Academic Press.

Brundrett, M. C. y Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220(4), 1108–1115.

El Amrani, B. (2024). Insights into the Biotic Factors Shaping Ectomycorrhizal Associations. *Biology*, 13(12), 1044.

Gladieux, P., Ropars, J., Badouin, H., Branca, A., Aguilera, G., De Vienne, D. M. y Giraud, T. (2014). Fungal evolutionary genomics provides insight into the mechanisms of adaptive divergence in eukaryotes. *Molecular Ecology*, 23(4), 753-773.

Grant, R. (1997, August 14). Do trees talk to each other? *New Scientist*, 155(2095), 38–41.

Hyde, K. D., Nilsson, R. H., Alias, S. A., Ariyawansa, H. A., Blair, J. E., Cai, L. y Laurence, M. H. (2014). One stop shop: Backbone trees for important phytopathogenic genera: I. *Fungal Diversity*, 67, 21–125.

Jordano, P., Vázquez, D. P. y Bascompte, J. (2009). Redes complejas de interacciones planta-animal. *Ecosistemas*, 18(2), 15–23. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2009.18-2.02>

Kumar, R., Bhardwaj, A. K., Chandra, K. K. y Singh, A. K. (2022). Mycorrhizae: An historical journey of plant association. *Chhattis J Sci Technol*, 19, 437–447.

Maurice-Lira, J. V., Romero-Nápoles, J., Pérez-Cárcomo, J., Martínez-Cerón, D. M., Flores-Maldonado, K. Y., Morales-Rodríguez, S. y Pérez-Moreno, J. (2025). Antimicrobial-producing microorganisms in fungus-farming ants: A critical review on insights into a natural biological defense with biotechnological potential. *Annals of the Entomological Society of America*, 118(1), 1–15.

Mishra, S., Srivastava, A., Singh, A., Pandey, G. C. y Srivastava, G. (2024). An overview of symbiotic and pathogenic interactions at the fungi-plant interface under environmental constraints. *Frontiers in Fungal Biology*, 5, 1363460.

Montiel-Rubies, G., Held, M., Hanson, K. L., Nicolau Jr, D. V., Mocanasi, R. C., van Delft, F. C. y Nicolau, D. V. (2025). Hierarchical structure of the program used by filamentous fungi to navigate in confining microenvironments. *Biomimetics*, 10(5), 287.

Orlovskis, Z., Voronins, Ē., Kotova, A., Pugačevskis, D., Blūms, K. T., Nakurte, I. y Lee, S. J. (2024). Common mycelial network mediated inter-plant signals modulate plant biotic stress responses and defence against foliar pathogens. *bioRxiv*, 2024-12.

Pena, R. y Tibbett, M. (2024). Mycorrhizal symbiosis and the nitrogen nutrition of forest trees. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1), 461.

Policelli, N., Horton, T. R., Hudon, A. T., Patterson, T. R. y Bhatnagar, J. M. (2020). Back to roots: The role of ectomycorrhizal fungi in boreal and temperate forest restoration. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 97.

Priest, S. J., Yadav, V. y Heitman, J. (2020). Advances in understanding the evolution of fungal genome architecture. *F1000Research* 9: 776.

Schultz, T. R., Sosa-Calvo, J., Kweskin, M. P., Lloyd, M. W., Dentinger, B., Kooij, P. W. y Doyle, V. P. (2024). The coevolution of fungus-ant agriculture. *Science*, 386(6717), 105-110.

Simard, S. W., Perry, D. A., Jones, M. D., Myrold, D. D., Durall, D. M. y Molina, R. (1997). Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. *Nature*, 388(6642), 579–582.

Smith, S. E. y Read, D. J. (2010). *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.

Spatafora, J. W., Aime, M. C., Grigoriev, I. V., Martin, F., Stajich, J. E. y Blackwell, M. (2017). The fungal tree of life: From molecular systematics to genome-scale phylogenies. In *The fungal kingdom*, 1–34.

Tedersoo, L., Bahram, M., Põlme, S., Kõljalg, U., Yorou, N. S., Wijesundera, R. y Abarenkov, K. (2014). Global diversity and geography of soil fungi. *Science*, 346(6213), 1256688.

van der Heijden, M. G., 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.

Wang, F., Zhang, L., Zhou, J., Rengel, Z., George, T. S. y Feng, G. (2022). Exploring the secrets of hyphosphere of arbuscular mycorrhizal fungi: Processes and ecological functions. *Plant and Soil*, 481(1), 1–22.

Wang, Q., Liu, M., Wang, Z., Li, J., Liu, K. y Huang, D. (2024). The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in plant abiotic stress. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1323881.

Yamato, M., Iwase, K., Yagame, T. y Suzuki, A. (2005). Isolation and identification of mycorrhizal fungi associating with an

achlorophyllous plant, *Epipogium roseum* (Orchidaceae). *Mycoscience*, 46(2), 73–77.

Zanne, A. E., Abarenkov, K., Afkhami, M. E., Aguilar-Trigueros, C. A., Bates, S., Bhatnagar, J. M. y Treseder, K. K. (2020). Fungal functional ecology: bringing a trait-based approach to plant-associated fungi. *Biological Reviews*, 95(2), 409-433.