

ARTÍCULO

MICORRIZAS: UNA GRAN UNIÓN DEBAJO DEL SUELO

Sara Lucía Camargo-Ricalde, Noé Manuel Montaña, Claudia Janette De la Rosa-Mera y Susana Adriana Montaña Arias

Micorrizas: una gran unión debajo del suelo

Resumen

En este artículo se sintetizan los aspectos más relevantes sobre el origen, clasificación, distribución y beneficios de la micorriza, así como aquellos referentes a su estudio en México. Asimismo, se destaca la importancia biológica y ecológica de la asociación micorrícica en los ecosistemas, en particular como una forma de interconexión entre las raíces de las plantas, aspecto que, en conjunto con su papel en los ciclos de los nutrimentos del suelo y en otras funciones dentro de los ecosistemas, no se ha entendido completamente, por lo que se requiere de más estudios al respecto.

Palabras clave: micorriza, simbiosis, micelio, hongos, glomeromycota

Mycorrhizas: a great belowground union

Abstract

In this article, the relevant aspects related to the origin, classification, distribution and benefits of the mycorrhizas are synthesized; as well as the state of the art in Mexico. The biological and ecological importance of the mycorrhizal association within the ecosystems is emphasized; particularly, as an inter-connection network among the roots of the plants, aspect that, in addition to its role in the soil nutrient cycling and in other functions within the ecosystems, are not well understood; hence, more studies are needed.

Key words: mycorrhiza, symbiosis, mycelium, fungi, glomeromycota

Introducción

La micorriza es una asociación constituida por un conjunto de hifas fúngicas (micelio) que, al entrar en contacto con las raíces de las plantas, las pueden envolver formando un manto y penetrarlas intercelularmente a través de las células del córtex, como en el caso de la ectomicorriza o, como en el caso de la micorriza arbuscular, penetran la raíz, pero no se forma ningún manto. Al mismo tiempo, las hifas se ramifican en el suelo, formando una extensa red de hifas capaz de interconectar, subterráneamente, a las raíces de plantas de la misma o de diferentes especies. Esta red de micelio permite, bajo ciertas condiciones, un libre flujo de nutrimentos hacia las plantas hospedadas y entre las raíces de las plantas interconectadas, lo que sugiere que la micorriza establece una gran unión bajo el suelo entre plantas que, a simple vista, podrían parecer lejanas y sin ninguna relación. Así, la micorriza ofrece a la planta hospedada y al ecosistema, diferentes

beneficios en términos de sobrevivencia y funcionamiento.

¿Qué es una “micorriza”?

Las micorrizas (del griego *myces*, hongo y *rhiza*, raíz) representan la asociación entre algunos hongos (micobiontes) y las raíces de las plantas (fitobiontes). El término “micorriza” fue acuñado por Frank, patólogo forestal alemán, en 1877, al estudiar las raíces de algunos árboles forestales. Para 1900, el botánico francés Bernard resaltó su importancia al estudiar las orquídeas. Trappe (1994) define a las micorrizas en términos funcionales y estructurales, como “órganos de absorción dobles que se forman cuando los hongos simbiotes viven dentro de los órganos de absorción sanos (raíces, rizomas o talos) de las plantas terrestres, acuáticas o epífitas”. En esta asociación, la planta le proporciona al hongo carbohidratos (azúcares, producto de su fotosíntesis) y un microhábitat para completar su ciclo de vida; mientras que el hongo, a su vez, le permite a la planta una mejor captación de agua y nutrientes minerales con baja disponibilidad en el suelo (principalmente fósforo), así como defensas contra patógenos. Ambos, hongo y planta, salen mutuamente beneficiados, por lo que la asociación se considera como un “mutualismo”. Evidencias fósiles y estudios moleculares sugieren que la asociación micorrícica se originó hace ca. 462-353 millones de años y, desde entonces, su formación es indispensable para el éxito ecológico de la mayoría de las plantas sobre la Tierra.

Clasificación y hongos participantes

De acuerdo con la forma de penetración del hongo en la raíz, por las estructuras características que desarrolla, y las especies de hongos y de plantas involucradas, las micorrizas se han agrupado en micorrizas con manto fúngico y micorrizas sin manto fúngico (cuadro 1). Los hongos micorrícicos (HM) asociados que, por su tamaño pueden clasificarse en micromicetos o macromicetos, pueden pertenecer a los filas Glomeromycota (*i.e. Glomus, Gigaspora, Acaulospora*), Ascomycota (*i.e. Peziza, Tuber*) y Basidiomycota (*i.e. Amanita, Cantharellus*). En el caso de las plantas hospederas, la asociación puede presentarse en las gimnospermas (plantas que no forman flores como los pinos), angiospermas (plantas que forman flores), briofitas (musgos), equisetofitas y los helechos (tanto en el gametofito como en el esporofito). Así, dependiendo del tipo de hongo involucrado en esta asociación y de la integración morfológica existente entre los hongos y las raíces de las plantas hospederas, la asociación se ha clasificado como: a) Micorrizas con manto fúngico y b) Micorrizas sin manto fúngico (figura 1). Las micorrizas con manto fúngico, a su vez, se han clasificado en: a) Ectomicorrizas, b) Micorriza arbutoide y c) Micorriza monotrofoide. Por su parte, las micorrizas sin manto fúngico se han clasificado en: (a) Micorriza arbuscular, (b) Micorriza ericoide, y (c) Micorriza orquideoide. En la naturaleza, cada tipo de micorriza se presenta en un ecosistema y ambiente edáfico particulares y, en ocasiones, con familias de plantas específicas. Así, la micorriza ericoide predomina en suelos localizados en altas latitudes y elevadas altitudes,

de clima frío, en plantas de la familia Ericaceae; las especies ectomicorrizógenas predominan en ecosistemas forestales con gran acumulación de materia orgánica, ubicados en latitudes y altitudes intermedias, de clima templado-frío, principalmente con gimnospermas (figura 2), y la micorriza arbuscular (figura 3) prevalece en comunidades de clima cálido seco, cálido húmedo y templado-frío, dominadas por herbáceas y leñosas, en suelos minerales de bajas latitudes (Smith y Read, 1998).

¿Dónde se distribuyen?

Esta asociación se presenta en aproximadamente el 90% de las plantas, por lo que se ubica en todos los ecosistemas del mundo (cuadro 1) y, por lo tanto, en diferentes gradientes latitudinales (figura 4). Además, es importante destacar que existen hongos que pueden encontrarse en varios tipos de suelo y climas, teniendo un patrón de distribución mundial, el cual indica que están, aparentemente, adaptados a diversos hábitats; no obstante, los factores físicos y químicos del suelo pueden restringir su distribución (Read, 1991; Finlay, 2008), por lo que las asociaciones micorrícicas pueden considerarse cosmopolitas y generalistas. Sin embargo, dependiendo del ambiente y las especies interactuantes, los participantes pueden ser facultativos u obligados (Finlay, 2008). Por ejemplo, en México se han reportado en todos los ecosistemas. Los encontramos desde las dunas en las líneas costeras, hasta ambientes secos, como los desiertos o los muy húmedos como las selvas lluviosas, así como en los bosques de coníferas.

¿Son benéficas o dañinas?

En el medio natural, la micorriza no se trata simplemente de una interacción entre la raíz de una planta y una especie de hongo en particular, sino de una comunidad muy compleja formada por diferentes especies de hongos y la raíz de una planta. Esta asociación se define como un continuo “mutualismo-parasitismo”; es decir, se analiza desde una perspectiva de “costo-beneficio”, correlacionado con el estado de desarrollo, tanto de la planta como del (los) hongo (s) involucrado (s), y con las condiciones ambientales y edáficas, así como con factores de reconocimiento genético mutuo (Johnson *et al.*, 1997). Actualmente, se considera que los hongos micorrizógenos (HM) fueron cruciales para que las plantas pudieran colonizar el medio terrestre y responder adecuadamente a las condiciones ambientales cambiantes (Smith y Read, 1998).

La función principal de la micorriza es facilitarle a la planta la adquisición y absorción de agua, fósforo y nitrógeno, principalmente; sin embargo, esta asociación proporciona otros beneficios a las plantas, entre los que destacan: la protección ante el ataque de parásitos, hongos patógenos y nemátodos, el aumento de su resistencia a la herbívora, influyendo en la producción de sustancias defensivas por parte de la misma planta, la limitación de la absorción de metales pesados tóxicos como el zinc y el cadmio que son alojados en sus hifas, aumento del área de exploración de la

raíz, lo que incrementa el flujo de agua del suelo a la planta (ver revisiones hechas por Camargo-Ricalde, 1999; 2001; 2002); además de mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo mediante el enriquecimiento de materia orgánica y la formación de agregados por medio de la adhesión de partículas debida a una proteína exudada por el micelio, la glomalina, contribuyendo a darle estructura y estabilidad al suelo, lo que reduce su erosión y mejora su capacidad de retención de agua (Guadarrama *et al.*, 2004; Finlay, 2008).

Las especies vegetales que forman micorrizas presentan una fisiología y una ecología diferentes de aquéllas que no forman esta asociación y se considera a la asociación micorrícica como uno de los factores promotores de la diversidad vegetal, al aumentar la adecuación de las plantas (supervivencia, crecimiento y reproducción) y facilitar su establecimiento, incluso bajo condiciones de estrés ambiental, lo cual tiene un impacto positivo en la diversidad de plantas, tanto a una escala poblacional como de las comunidades vegetales (Van der Heijden, 2002).

Además, como parte de la cadena trófica, las hifas de estos hongos son consumidas por la fauna del suelo, como los nemátodos y los microartrópodos. Asimismo, las hifas constituyen una parte importante de la biomasa del suelo y son un importante sumidero de carbono, ya que los hongos micorrizógenos asociados a las especies vegetales reciben entre el 57% y 90% del carbono de los árboles, y llegan a representar hasta el 50% de la biomasa microbiana total del suelo (Olsson *et al.*, 1999). Existen estudios que reportan que la micorriza genera una extensa red de micelio externo que explora el suelo en la búsqueda de recursos (por ejemplo nutrimentos y agua) e interconecta a las raíces de plantas de la misma especie e, incluso, de especies diferentes (Simard y Durall, 2004). Usando técnicas isotópicas para marcar el carbono (C^{14}), estos estudios han demostrado que las plantas interconectadas por la red micorrícica pueden transferir carbono entre ellas (Simard *et al.*, 1997; Finlay, 2008; Smith y Read, 1998), de tal manera que aquellas plantas que, aparentemente parecerían a simple vista no tener una relación cercana, están comunicadas con otras plantas por medio de las redes de micelio que están en el suelo.

Igualmente, ante los problemas ambientales y ecológicos que enfrentamos hoy en día, la asociación micorrícica nos ofrece múltiples beneficios, debido a que las plantas micorrizadas, ya sean de interés agrícola o forestal, son más resistentes a condiciones ambientales adversas, como: la falta de agua y de nutrimentos esenciales, y el ataque de microorganismos fitopatógenos o plagas, además de estimular un mayor crecimiento (biomasa) y una mejor adecuación (figura 5) (Finlay, 2008; Smith y Read, 1998).

Actualmente, la asociación micorrícica se considera fundamental en las prácticas agrosilvopastoriles sostenibles y en los programas de restauración ambiental, ya que aumenta sus posibilidades de éxito.

¿Cuáles son las principales líneas de investigación micorrícica en México?

Las principales líneas de investigación sobre micorrizas que se desarrollan en nuestro país, presentan los siguientes enfoques: a) *Agronomía*, efecto de la micorrización en plantas de importancia económica, alimentaria y cultural; b) *Ecología, dinámica de las poblaciones de HM e importancia de la micorriza en el crecimiento de especies silvestres y en la dinámica de las comunidades vegetales y ecosistemas*; c) *Taxonomía y Sistemática*, inventario de la diversidad de HM en México y especificidad que pudiera haber con determinadas especies vegetales; d) *Biología Molecular*, herramienta para el conocimiento de la sistemática y la ecología de los HM, y de las micorrizas para determinar las relaciones filogenéticas de los HM y las coevolutivas con las plantas; e) *Biotecnología y Ciencias Genómicas*, manejo genómico de las cepas de los HM en beneficio del ser humano, por ejemplo en agronomía, en la producción de metabolitos secundarios antineoplásicos y en la restauración de ecosistemas naturales, y f) *Ciencias Ambientales*, biorremediación, restauración, rehabilitación o reasignación de ecosistemas deteriorados.

Los trabajos sobre micorrizas están publicados en libros y en revistas nacionales e internacionales, y muchos de estos trabajos han sido presentados en Simposios Nacionales organizados por la Sociedad Mexicana de la Simbiosis Micorrícica, A.C. (SOMESIMI) desde su fundación en el 2004. Estos simposios se han organizado cada dos años en diferentes ciudades del país con el apoyo de distintas instituciones mexicanas de educación superior (figura 6).

Futuro del estudio de las micorrizas en México

Con base en la revisión de los trabajos presentados en los diferentes simposios y en las publicaciones hasta ahora generadas en México, es posible afirmar que la mayor parte de la investigación que se realiza en México está dirigida hacia el conocimiento de la micorriza arbuscular, seguido de la ectomicorriza y existe muy poca información para los otros tipos de asociación micorrícica. La mayoría de los estudios se han enfocado a evaluar, principalmente, el impacto de la asociación en las plantas de interés agronómico, mientras que los trabajos sobre plantas de ecosistemas naturales se han realizado sólo en unas cuantas especies vegetales (menos del 10% de las 30,000 especies estimadas para México), en especial de zonas desérticas y de bosques tropicales húmedos.

Dado lo anterior, es importante continuar fomentando la investigación acerca de las micorrizas en otros campos del conocimiento como, por ejemplo, el efecto de éstas sobre las diferentes poblaciones de plantas silvestres que conforman las comunidades vegetales en ecosistemas de nuestro país, su efecto en la producción de metabolitos secundarios en las plantas de uso medicinal, la selección de inóculos nativos que posteriormente puedan ser utilizados en proyectos de restauración ambiental y biorremediación, así como su papel en los ciclos de los nutrimentos

y en la generación de servicios ambientales. Asimismo, es una prioridad incrementar los estudios taxonómicos, auxiliados tanto con técnicas basadas en la morfología como en biología molecular, con la finalidad de conocer, a mediano y largo plazos, la diversidad de hongos formadores de micorriza con los que cuenta el país.

Por otra parte, se desconocen también aspectos básicos sobre la biología, fisiología, ecología y diversidad de las micorrizas y de los HM involucrados. Generalmente, el estudio de esta asociación mutualista está basado en la respuesta de la planta micorrizada a diferentes variables ambientales, siendo muy pocas las investigaciones que consideran a los HM como su principal objeto de estudio y, en consecuencia, no se conocen completamente los efectos que las condiciones ambientales tienen sobre su biomasa in situ y la dinámica poblacional de los HM. En este sentido, la investigación sobre los efectos de las micorrizas en plantas silvestres, en términos de su adecuación, de sus interacciones con otros organismos (por ejemplo, competencia, parasitismo, depredación), de su diversidad y de su especificidad hacia determinadas especies de HM es todavía incipiente. Otro aspecto poco estudiado, es el efecto de los diferentes tipos de disturbios y perturbaciones naturales y/o antrópicas en la dinámica de la interacción micorrícica.

Recientemente, el desarrollo de las ciencias genómicas ha permitido un avance significativo para el estudio sistemático de los HM, bajo condiciones de campo y no sólo de laboratorio, el cual limita la obtención de mucha información importante para comprender la diversidad y la función de los HM. Aunque se han generado aportes importantes sobre el desempeño de los HM con un enfoque agronómico, ecológico y genómico, faltan aún por explorar otras líneas de investigación; por ejemplo, desconocemos el impacto de la introducción de inóculos micorrícicos no nativos y del cambio climático global en la distribución y el desempeño de los HM y, por consiguiente, cómo afectará esto a las poblaciones y comunidades vegetales.

Finalmente, es importante señalar que el futuro del estudio de la simbiosis micorrícica en México, está directamente ligado a la formación de más especialistas en micorrizas y a la creatividad, ingenio, responsabilidad, ética y conocimiento de nuestros investigadores, así como a los apoyos institucionales que fomentan el desarrollo científico en nuestro país.

Conclusiones

En el caso de México, el estudio de la asociación micorrícica se ha convertido en una línea de investigación fundamental en Biología y disciplinas afines. La calidad del trabajo científico hecho en nuestro país ha impactado y motivado no sólo a la comunidad científica de Iberoamérica, sino también del resto del mundo. No obstante, en México, a pesar de que se reconocen los beneficios de esta asociación, la investigación es aún escasa. Ello se refleja en que, por ejemplo, para los HM formadores de micorriza arbuscular sólo se conocen 95 especies con relación a las 235 reportadas

a nivel mundial y en que, en general, el 70% de la investigación sobre micorrizas se ha realizado en sistemas agrícolas; mientras que poco se conoce de los sistemas naturales. Lo anterior, en conjunto con la utilidad de la asociación micorrícica en las prácticas agrícolopastoriles, en la reforestación y en la restauración ambiental, requiere que la investigación sobre la diversidad y funcionalidad de los HM deba ser apoyada, con el fin de documentar más ampliamente esta asociación biótica en México.

Literatura citada

Agarwal P. y Sah P. 2009. Ecological importance of ectomycorrhizae in world forest ecosystems. *Nature and Science*, 7: 107-110.

Camargo-Ricalde S.L. 1999. Hongos micorizógenos arbusculares. *ContactoS*, 31: 62-67.

Camargo-Ricalde S.L. 2001. Some biological aspects of the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 68: 15-32.

Camargo-Ricalde S.L. 2002. Dispersal, distribution and establishment of arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 71: 33-44.

Camargo-Ricalde S.L. 2009. Micorrizas. COSMOS, Enciclopedia de las Ciencias y la Tecnología en México. Tomo Ciencias Biológicas. CONACYT, UAM y ICyTDF. México. 110-113 pp.

Estrada-Torres A. y Santiago-Martínez M.G. (editores). 2003. Avances en el estudio de la ectomicorriza en el estado de Tlaxcala, México. Universidad Autónoma de Tlaxcala, CONACYT, Fundación Produce Tlaxcala, A.C., México. 76 pp.

Finlay R.D. 2008. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*, 59:1115-1126.

Guadarrama-Chávez P., Sánchez-Gallén I., Álvarez-Sánchez J. y Ramos-Zapata J. 2004. Hongos y plantas: beneficios a diferentes escalas en micorrizas arbusculares. *Ciencias*, 73: 38-45.

Johnson N.C., Graham J.H. y Smith F.A. 1997. Functioning of mycorrhizal association along the mutualism-parasitism continuum. *New Phytologist*, 135: 575-585.

Olsson P.A., Thingstrup I., Jakobsen I. y Baath E. 1999. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 1879-1887.

Read D.J. 1991. Mycorrhizas in ecosystems. *Experientia*, 47:376-391.

Read D.J. y Pérez-Moreno J. 2003. Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems a journey

towards. *New Phytologist*, 157: 475-492.

Simard S.W. y Durall D.M. 2004. Mycorrhizal networks: a review of their extent, function, and importance. *Canadian Journal of Botany*, 82: 1140-1165.

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: 579-582.

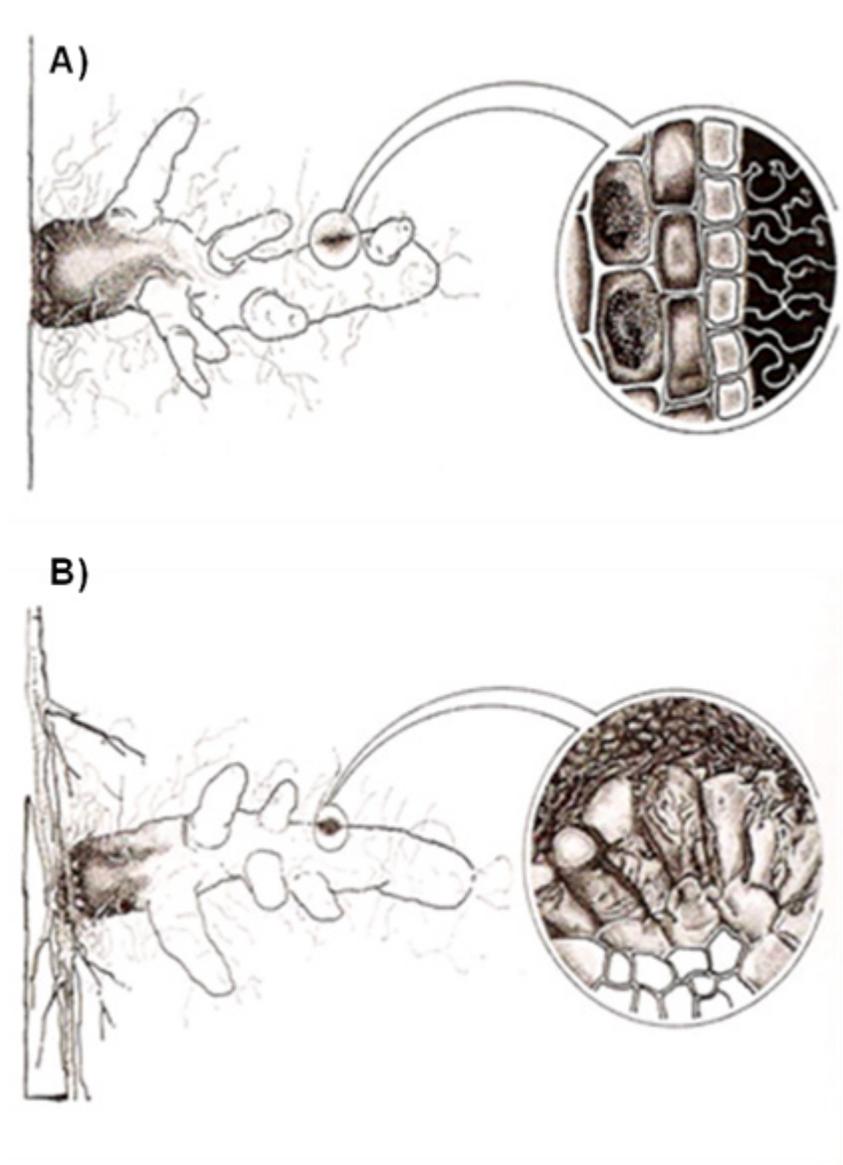
Smith S.E. y Read D.J. 1998. *Mycorrhizal symbiosis*, San diego USA, Academic. Press.

Trappe J.M. 1994. What is a mycorrhiza? Proceedings of the fourth European Symposium on mycorrhizae. Granada, España. En: Johnson N.C., Graham J.H. y Smith F.A. 1997. Functioning of mycorrhizal association along the mutualism-parasitism continuum. *New Phytologist*, 135: 575-585.

Van der Heijden M.G.A. 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi as a determinant of plant diversity: in search of underlying mechanisms and general principles. *Ecological Studies*, 157: 243-265.

FIGURAS

Figura 1. Colonización de raíces por hongos micorrizógenos: A) Micorrizas *sin manto fúngico*; B) Micorrizas *con manto fúngico* (tomado de Camargo-Ricalde, 2009); C) Tipos de micorrizas: A) Sin manto fúngico: Ericoide, Orquideoide y Arbuscular; B) Con manto fúngico: Arbutoide, Monotropoide y Ectomicorriza. Simbología: Ar: arbúsculo, C: enrollamiento hifal, Eh: hifa extramatricial, Hn: Red de Hartig, Fs: manto, P: protusión, Sc: esclerocio, V: vesículas (tomado de Agarwal y Sah, 2009).



C)

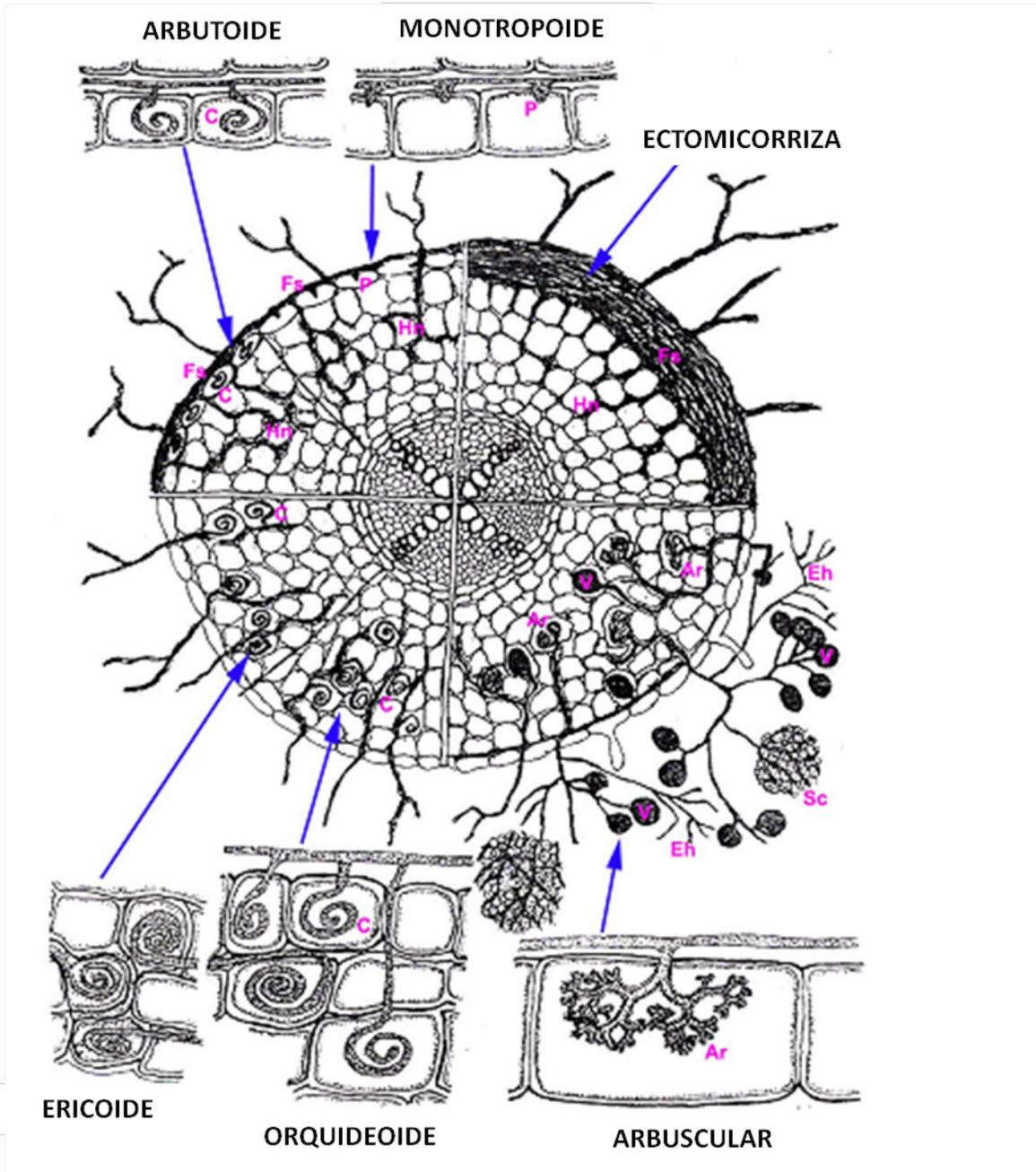
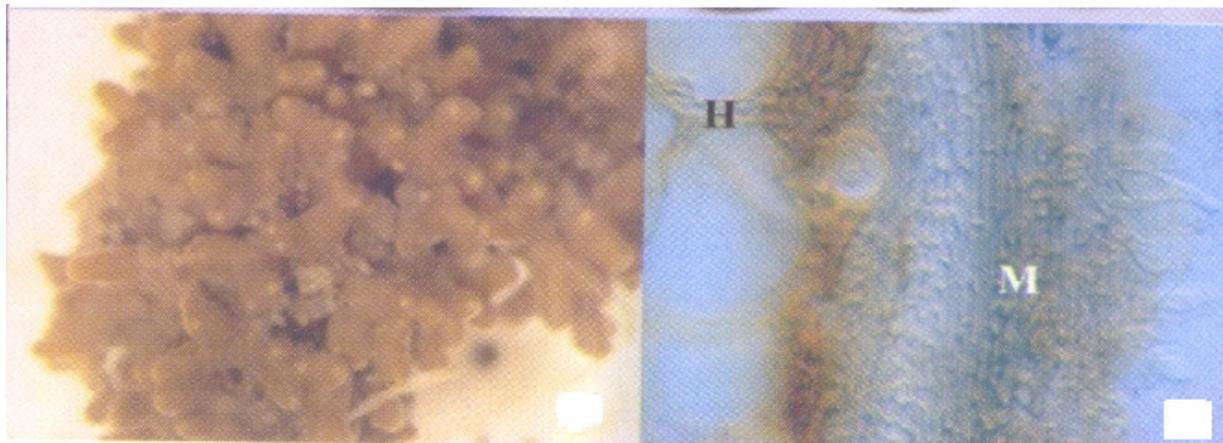


Figura 2. Ectomicorriza. A) Micorriza de *Suillus glandulosipes* (Basidiomycota, Agaricomycetes, Boletales); B) Corte transversal de micorriza mostrando el manto (M) y la Red de Hartig (H). Fotografías tomadas en el laboratorio de Micorrizas, CICB, UAT, con material proveniente del estado de Tlaxcala (Tomado de Estrada-Torres A. y Santiago-Martínez M.G. (editores), 2003).



A

B

Figura 3. Micorriza Arbuscular. A) Raíz de *Mimosa luisana* (Leguminosae, Mimosoideae); h: hifas intercelulares, v: vesículas, ar: arbuscúlos (100X); B) Esporas de hongos micorrizógenos arbusculares; a) *Pacispora* sp., y b) *Funneliformis* sp. (100X)

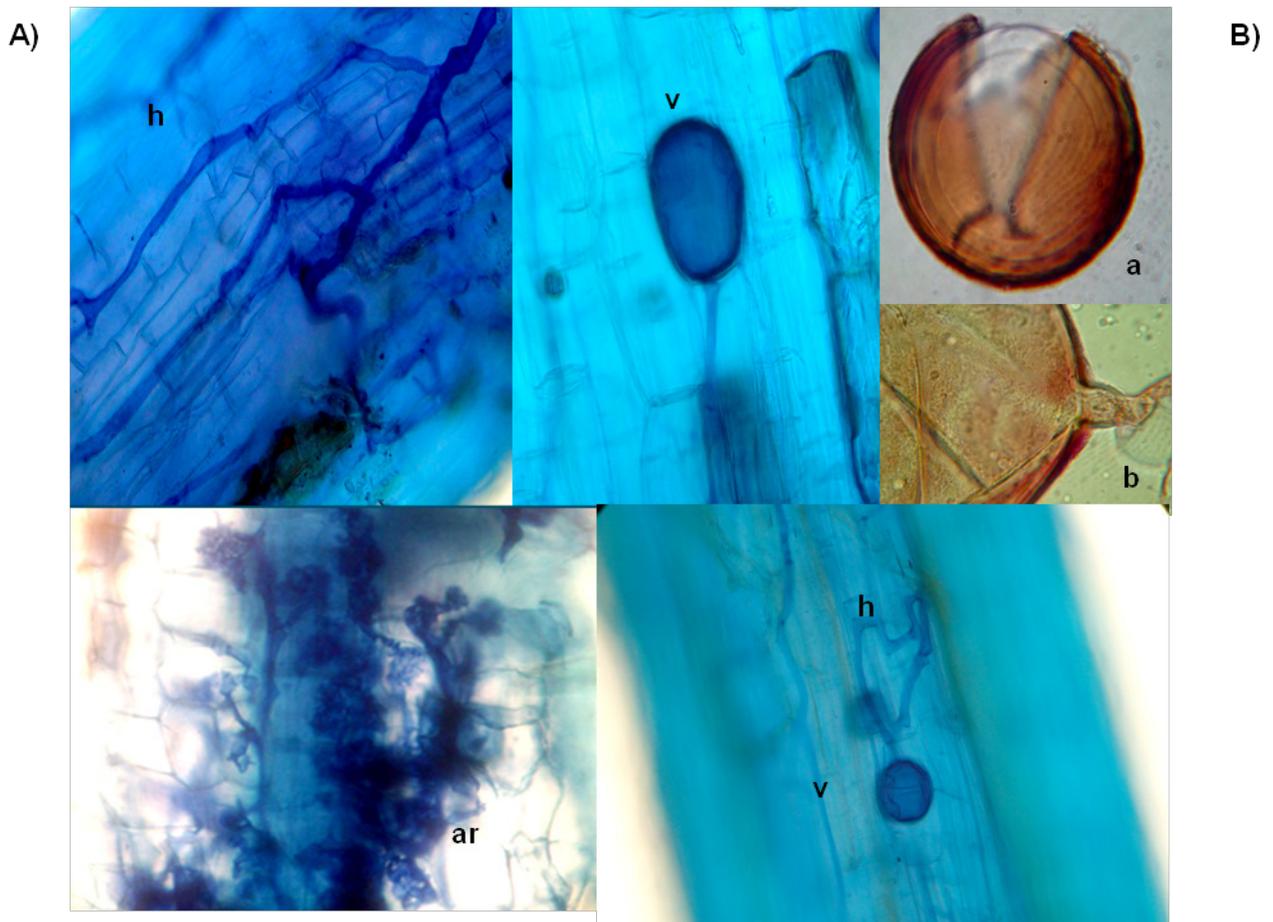


Figura 4. Distribución de la asociación micorrícica a lo largo de un gradiente altitudinal (modificado de Read y Pérez-Moreno, 2003).

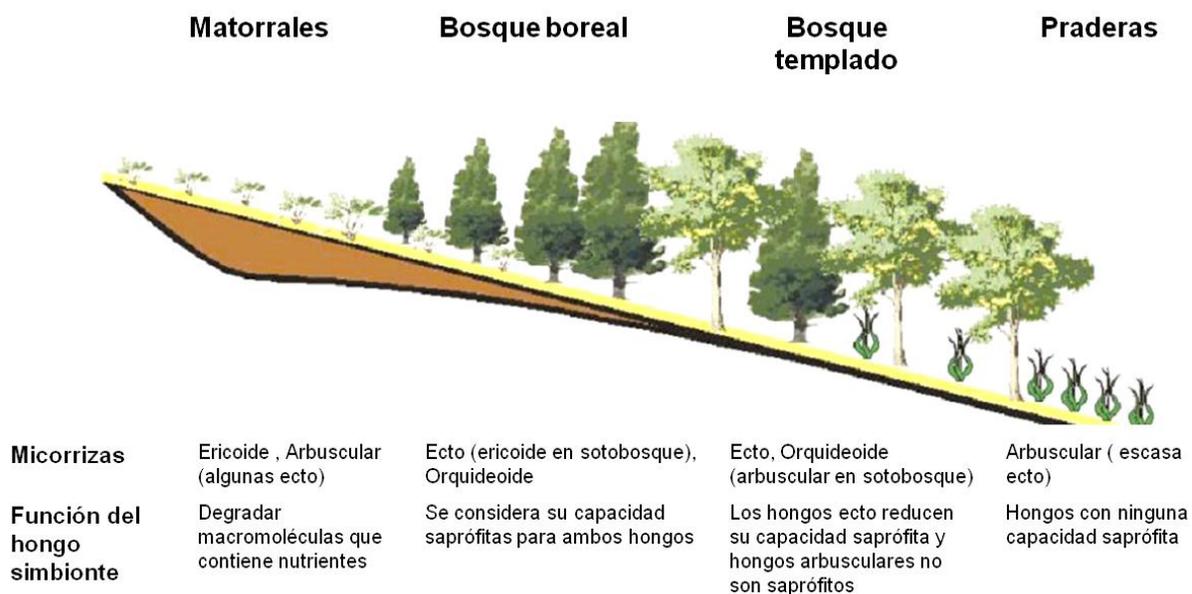


Figura 5. Efecto en el crecimiento de plantas, *Mimosa luisana* y *M. polyantha* (Leguminosae, Mimosoideae), inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares. HMA: hongos micorrizógenos arbusculares; Control: sin inóculo de HMA; CB-IR: suelo de costra biológica en isla de recursos formada por *M. luisana* o *M. polyantha*, inoculadas con HMA.



Figura 6. Logotipo de la Sociedad Mexicana de la Simbiosis Micorrícica, A.C. (SOMESIMI): Flor mexicana, sello indígena.



Cuadro 1. Diferentes tipos de micorrizas. Esta clasificación está basada en la forma de penetración del hongo en la raíz, por las estructuras características que desarrolla, y las especies de hongos y plantas involucradas (modificado de Guadarrama-Chávez et al., 2004).

<p>Micorrizas con manto fúngico: forman un manto de varias capas de hifas alrededor de la raíz.</p>		
<p><i>Ectomicorriza</i></p> <p>Hongos endófitos: ascomicetos y basidiomicetos.</p> <p>Plantas hospederas: gimnospermas y angiospermas.</p> <p>Distribución: bosques boreales y templados.</p>	<p><i>Arbutoide</i></p> <p>Hongos endófitos: ascomicetos y basidiomicetos.</p> <p>Plantas hospederas: familia Ericaceae, subfam. Arbutoideae.</p> <p>Distribución: zonas templadas.</p>	<p><i>Monotropoide</i></p> <p>Hongos endófitos: ascomicetos y basidiomicetos.</p> <p>Plantas hospederas: género <i>Monotropa</i> (actualmente en la familia Ericaceae; plantas no fotosintéticas, epiparásitas).</p> <p>Distribución: zonas templadas.</p>
<p>Micorrizas sin manto fúngico: desarrollan sus estructuras dentro de las células del cortex de la raíz (intracelular) o bien entre célula y célula (intercelular).</p>		