



LA INVESTIGACIÓN DE LAS MICORRIZAS EN EL SALVADOR: UNA INVERSIÓN PARA EL DESARROLLO DE LA AGRICULTURA

Beatriz Dreyer¹

¿Qué son las Micorrizas?

La palabra micorriza significa hongo-raíz y se usa para definir las asociaciones simbióticas formadas entre los hongos y las raíces de las plantas, en donde ambos simbiosiontes, tanto la planta como el hongo, obtienen beneficios de vivir en una estrecha relación de mutua dependencia. Uno de los beneficios más conocidos es el intercambio nutricional, en el que la planta le da al hongo carbohidratos y el hongo a la planta nutrientes minerales del suelo. Además de la mejora nutricional y el consecuente aumento del crecimiento, los hongos micorrícicos aportan muchos más beneficios a las plantas, como se presenta más adelante.

Desafortunadamente, las micorrizas son organismos desconocidos para la mayoría de la población e incluso para muchos biólogos y agrónomos, de quienes se asume que tuvieron que haber leído o escuchado en algún momento de su carrera universitaria algo sobre esta fascinante simbiosis. Parece ser que **el conocimiento que se tiene a nivel de sociedad de las micorrizas es inversamente proporcional a la importancia que éstas tienen para la sociedad.**

¿Por qué es sorprendente esta ausencia de conocimiento sobre las micorrizas? En primer lugar, porque las micorrizas no son rarezas de la naturaleza, que sólo afecten muy específicamente a un número limitado de plantas, puesto que el 97% de las plantas terrestres forman este tipo de simbiosis [1]. **Es decir, prácticamente la totalidad de las plantas de interés agrícola y forestal forman micorrizas.** En segundo lugar, no se puede pensar en actividades tales como agricultura, silvicultura, **biorremediación**, revegetación, aprovechamiento de recursos no maderables de los bosques, conservación de la biodiversidad, manejo sostenible, entre otras, sin pensar en micorrizas [2-4]. Estos dos aspectos hacen obvio el enorme potencial económico y social de esta asociación simbiótica, por lo que asombra que no se potencie más la investigación sobre las micorrizas.

Se debe recordar que, hace aproximadamente 400 millones de años, cuando las primeras plantas colonizaron el planeta Tierra, lo hicieron gracias a la presencia de los hongos micorrícicos y que esta simbiosis se ha mantenido desde entonces hasta nuestros días [5].

Una relación planta-hongo tan duradera y sostenible sólo debe ser digna de estudio.

Las micorrizas se encuentran prácticamente en todos los hábitats de la tierra, desde ecosistemas acuáticos a desiertos, desde el ecosistema ártico hasta los bosques tropicales, en diferentes altitudes y latitudes [6]. Existe una gran diversidad en cuanto a morfología y fisiología de las asociaciones micorrícicas, lo que permite reconocer varios tipos de micorrizas diferentes [1,7,8]. Los tipos de micorrizas más estudiados a nivel mundial son las ectomicorrizas y las micorrizas arbusculares.

Las ectomicorrizas las forman tan sólo entre 3-5% de las plantas terrestres, distribuidas en 140 géneros, como, por ejemplo, abedules, abetos, castaños, eucaliptos, hayas, píceas, pinos y robles. Más de 6,000 especies fúngicas (hongos) de 65 géneros, pertenecientes principalmente a las divisiones *Ascomycota* y *Basidiomycota* están involucradas como simbiosiontes obligados o facultativos en este tipo de micorrizas.

Paradójicamente, sólo unas 150 especies fúngicas son responsables de la formación de las micorrizas arbusculares en más del 90% de las plantas terrestres. Estos hongos formadores de micorrizas arbusculares han sido, recientemente, incluidos en una división taxonómica propia, la división *Glomeromycota* [9]. Se caracterizan porque el hongo presenta, dentro de la raíz, **hifas** intercelulares, hifas tirabuzón o “coils”, arbuscúlos (hifas intracelulares muy ramificadas, formadas por divisiones dicotómicas sucesivas) y vesículas intra o intercelulares (Fig. 1).

Beneficios de las micorrizas

Las micorrizas son, junto con las simbiosis fijadoras de nitrógeno y las raíces cluster y dauciformes, una de las estrategias más importantes que han desarrollado las plantas para sobrevivir en condiciones del suelo pobres en nutrientes [10-12]. Se sabe desde hace tiempo que una correcta selección y aplicación de hongos micorrícicos, mejora la nutrición mineral y el crecimiento de las plantas [1,13,14], por lo que se consideran como fertilizantes biológicos o biofertilizantes [15,16]. Esta mejora nutricional es debida, por un lado, a que el micelio de los hongos micorrícicos es capaz de explorar un mayor volumen de suelo en busca de nutrientes y de penetrar en poros del suelo más pequeños, que las raíces. Por otro lado, estos hongos pueden alterar las comunidades bacterianas de la **rizosfera** [17] y producir enzimas y **quelatos**, que a su vez tienen un efecto sobre la disponibilidad, captación y transporte de los nutrientes del suelo a la raíz [1].

1. Ph.D. en Biología. Universidad de El Salvador, CENSALUD-CIC, Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, Tel. ++503 2225 1500 Ext. 5060, Subext. 135, dreyer@cic.ues.edu.sv
Escuela Alemana, San Salvador, Apartado (01)183, San Salvador, El Salvador, Tel. ++ 503 2243 8120, beatriz.dreyer@ds.edu.sv

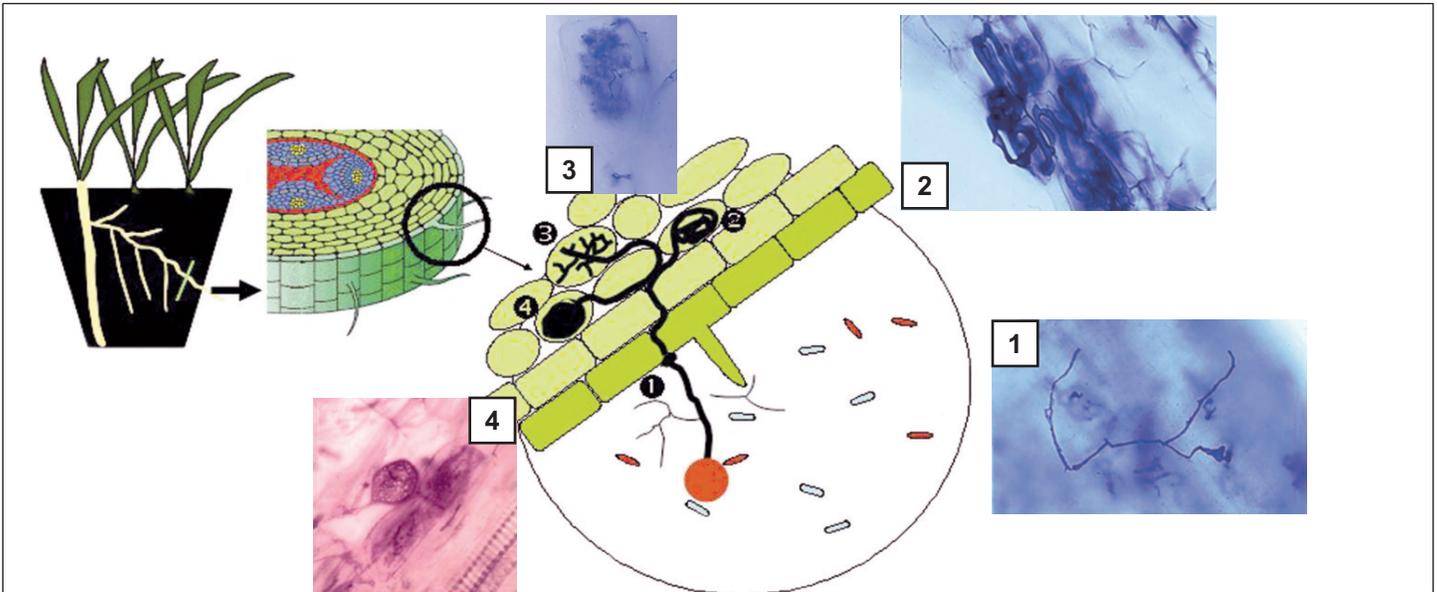


Figura 1. Dibujo esquemático del corte transversal de una raíz de una planta, que muestra en su interior las estructuras formadas por hongos micorrícicos arbusculares. En las fotografías: 1, apresorio; 2, "coil" o hifa ; 3, arbuscúlo; 4, vesícula.

También es sabido que los hongos micorrícicos son capaces de incrementar la resistencia de las plantas frente a estreses abióticos como sequía, salinidad, presencia de metales pesados, etc. [18-21] y bióticos como patógenos fúngicos y nemátodos [22-26].

Además, en el caso de los hongos micorrícicos arbusculares incluso se ha demostrado que mejoran la estructura del suelo gracias a la producción y secreción al suelo de una glucoproteína denominada glomalina. Su concentración en el suelo está linealmente correlacionada con la estabilidad de los agregados del suelo [27,28].

En el caso de las ectomicorrizas se tiene que considerar además un beneficio añadido, ya que tienen una gran importancia forestal, no sólo para la misma producción de madera en sí, sino también por la excelente rentabilidad que los grupos fúngicos le dan a los bosques como productos secundarios. Muchas de las especies de hongos comestibles más usadas en el mundo culinario, como *Amanita caesarea*, *Boletus edulis*, *Cantharellus cibarius*, *Lactarius deliciosus*, *Terfezia claverii*, *Tricholoma terreum*, *Tuber melanosporum*, etc. son ectomicorrizas.

Hay que señalar, que desde hace pocos años se sabe que los hongos micorrícicos son componentes esenciales de ecosistemas terrestres, donde juegan un papel crítico como determinantes de estructura, biodiversidad, y funcionamiento de estos ecosistemas. Van der Heijden y col. [29] demostraron mediante unos experimentos sin precedentes que las especies de hongos micorrícicos arbusculares son capaces de alterar la estructura de comunidades de plantas y que la biodiversidad y la productividad de los ecosistemas dependen de la diversidad de hongos micorrícicos.

Todos los beneficios de los hongos micorrícicos que se han señalado aquí hacen obvio que existen razones de peso para incluir las funciones y actividades de las micorrizas en sistemas y programas integrados de manejo de nutrientes, de patógenos, del uso del agua, etc., especialmente donde los suelos son fijadores de fósforo, frágiles y están sujetos a erosión o pérdida de nutrientes. Además, es recomendable también que los ecólogos y los técnicos medioambientales empiecen a considerar a los hongos micorrícicos en los estudios de biodiversidad y función de ecosistemas.

Status quo de la investigación de micorrizas a nivel mundial

Desde que se introdujo el término "micorriza" por Frank en 1885 [30] hasta nuestros días se ha avanzado enormemente en la investigación sobre las micorrizas. Este avance se refleja cada tres años en la Conferencia Internacional de Micorrizas (ICOM, Internacional Conference on Mycorrhizas), que reúne a casi todos los micorrizólogos del mundo. Apenas ha pasado un año desde la última y quinta ICOM que esta vez se celebró en Granada, España (ICOM5, 23-27 de julio de 2006). Los temas tratados fueron muy diversos y abarcaron todos los niveles de organización biológica, desde todas las "ómicas" (genómica, transcriptómica, proteómica y metabolómica) hasta aspectos ecológicos de las micorrizas.

En esta conferencia estuvo muy presente el aspecto de la aplicabilidad de los hongos micorrícicos. Se dedicó una sesión entera al uso de micorrizas en sistemas alternativos de producción. Se ha superado en gran medida el hueco que existía en el conocimiento de la biología y ecología de los hongos micorrícicos y hoy en día se está explotando esta simbiosis a una escala práctica. En Dinamarca ya se

están haciendo ensayos con inóculos micorrícicos a nivel de producción de tomate y pepino cultivados en sistemas sin suelo sobre lana de roca. Igualmente en los Países Bajos se han introducido ya inóculos micorrícicos en sus sistemas de cultivo altamente tecnificados. Numerosas experiencias en la aplicación en campo de las micorrizas, en cultivos de batata, papa, sandía, pepino, arroz, etc. llegaron desde China. En Turquía se han obtenido numerosos resultados positivos con la introducción de inóculos micorrícicos en el sector de la agricultura orgánica. En casi todos los países con tradición en investigación sobre micorrizas se ha pasado ya a la fase de aplicación en campo para comprobar los resultados obtenidos durante muchos años en macetas bajo condiciones controladas.

El uso de los hongos micorrícicos en sistemas agrícolas implica un conocimiento profundo sobre el efecto que tienen determinadas prácticas de manejo sobre la diversidad y funcionamiento de las micorrizas. En este sentido, se sabe desde hace tiempo que ciertas prácticas agrícolas perjudican la formación de micorriza. Por ejemplo, los hongos micorrícicos arbusculares son afectados negativamente por perturbaciones del suelo [31], aplicación de fertilizantes químicos [32,33] y pesticidas [34-36], selección de cultivo, monocultivos, rotaciones con plantas que no son hospedantes o períodos de **barbecho** [33].

Estudios conducidos con diferentes sistemas de cultivo indican que los sistemas de bajo consumo de insumos incrementan las poblaciones de esporas de hongos micorrícicos arbusculares en comparación con sistemas agrícolas convencionales [37]. Además, influyen sobre la composición de las comunidades de hongos incrementando su diversidad y cambiando la abundancia relativa de especies [31,38]. En la última década se han añadido resultados de muchos más estudios a esta lista, solamente en la ICOM5 se presentaron 45 estudios sobre este tema. Un estudio que requiere especial mención es el de Leglize y col. [39], en el que se presentan resultados del desarrollo de un test **ecotoxicológico** con hongos micorrícicos como bioindicadores para la evaluación de la toxicidad de contaminantes o suelos contaminados. Los hongos micorrícicos cumplen con la mayoría de los criterios establecidos para organismos bioindicadores: son ubiquistas en los suelos, sensibles a contaminantes y juegan un papel ecológicamente relevante en la salud de las plantas. Pero además es importantísimo que se realicen test ecotoxicológicos con estas especies, ya que los hongos micorrícicos son especies claves en los ecosistemas que determinan su funcionamiento.

Un peso importante en este congreso lo tuvo también la tecnología de la producción de inóculos de hongos micorrícicos arbusculares. Hoy en día se producen los inóculos por muy distintas vías, desde la producción in vitro, pasando por producción en el invernadero en presencia de

plantas trampa o en sistemas aeropónicos e hidropónicos, hasta métodos integrados en el sistema de cultivo [40-44]. Recientemente se habla además de una producción de inóculo dirigida (DIP, Directed Inoculum Production), término que introdujeron Feldmann y Grotkass [45].

Los inóculos producidos a través de estos métodos se pueden adquirir comercialmente. Sin embargo, a la hora de la adquisición de inóculos se tendrían que tener en cuenta una serie de consideraciones. La más importante de ellas, que el producto tenga el efecto que dice en la etiqueta. Desgraciadamente, esta es la mayor limitante y el mayor motivo de desilusión para la mayoría de productores agrícolas o forestales que se deciden a probar los inóculos micorrícicos comerciales, ya que no siempre obtienen el efecto deseado. Esto es debido, por una parte, a que los inóculos comerciales contienen cepas de hongos determinados aisladas en un ambiente también determinado, por lo que estos aislados geográficos están adaptados, o al menos son tolerantes, a condiciones **edáficas** y climáticas particulares. La habilidad de los hongos micorrícicos de adaptarse a nuevas condiciones es lo que es decisivo en la tecnología de producción de inóculos y que se está teniendo recientemente en cuenta en los métodos DIP. Esto es imprescindible cuando los inóculos están destinados a condiciones tan extremas como ecosistemas degradados o sistemas artificiales de cultivo sin suelo.



Otra posibilidad, mucho más económica que la anterior, es producir los inóculos mediante métodos integrados en el sistema de cultivo ("on-farm" production). El pionero en estos métodos fue Sieverding [46] y desde entonces se han hecho algunos avances en esta metodología [47,48]. La ventaja de estos métodos es que automáticamente se producen inóculos de las cepas de hongos micorrícicos autóctonas que ya están adaptadas al lugar donde se van a usar.

Otras muchas participaciones de la ICOM5 estaban dedicadas al uso de las micorrizas como "aliviadores de estrés" en las plantas. Ya es común pensar en los hongos micorrícicos no sólo como biofertilizantes, sino también como biopesticidas y bioremediadores. Los estudios más recientes están tratando de aclarar los mecanismos moleculares y celulares responsables de la resistencia frente a estreses abióticos y bióticos observada en plantas micorrizadas.

Hay que señalar, que también se ha hecho un gran progreso en cuanto a modelos de predicción del impacto de las comunidades de hongos micorrícicos sobre el desarrollo de las plantas y el funcionamiento de los ecosistemas. En definitiva, después del ICOM5 ha quedado claramente plasmado el intenso esfuerzo que está haciendo la comunidad de micorrizólogos por aplicar las micorrizas y estrechar el hueco existente entre la teoría y la práctica en el manejo de micorrizas.

¿Cómo y por qué promover una línea de investigación sobre micorrizas en El Salvador?

A pesar de que se ha reconocido en El Salvador en diversas ocasiones la importancia del uso de biofertilizantes, como los hongos micorrícicos y las bacterias promotoras del crecimiento, para la producción agrícola sostenible (véase p. ej. [49]), todavía no existe una línea de investigación en este campo. Esta misma situación se observa en el resto de países centroamericanos, a excepción de Costa Rica [50].

Aquí se dan algunas pautas de cómo promover la investigación sobre las micorrizas en El Salvador y aspectos a tener en cuenta. El punto de partida para toda línea de investigación que trate de aplicar la tecnología de las micorrizas es contar con un banco de inóculos de hongos micorrícicos. Éste no sólo serviría a todos los investigadores potencialmente interesados en experimentar con estos hongos, sino también a viveristas y agricultores visionarios, que hayan apostado por una forma de producción sostenible. Aquí algunos se preguntarán: ¿por qué no usar inóculos comerciales y/o de otras regiones del mundo que ya están disponibles? La razón es muy sencilla, después de lo expuesto en la sección anterior.

Generalmente los inóculos de probada eficacia en una región determinada, no necesariamente son eficaces en otra región del mundo. Es más, las cepas de hongos micorrícicos están muy adaptadas al medio, y dos cepas de la misma especie de diferentes procedencias pueden mostrar efectos completamente diferentes.

Por eso es necesario proveer un rango de inóculos centroamericanos de excelente calidad con cepas de hongos micorrícicos adaptadas para aplicaciones específicas. Esto a su vez debería ir acompañado de un soporte técnico competente, que asesore a viveristas y agricultores.

A su vez se tendría que desarrollar una tecnología de producción de inóculos para contar con las cantidades comerciales necesarias para minimizar el gasto de producción y el costo de su aplicación a gran escala. Este sector de producción de inóculos, que se podría impulsar en el país a través de las universidades y las empresas a nivel local, proporcionaría un amplio abanico de posibilidades para realizar la micorrización con el inóculo adecuado a determinados ambientes, sistema de cultivo y especie vegetal. La figura 2 muestra un sistema de producción de inóculo con plantas trampa con sus diferentes fases.

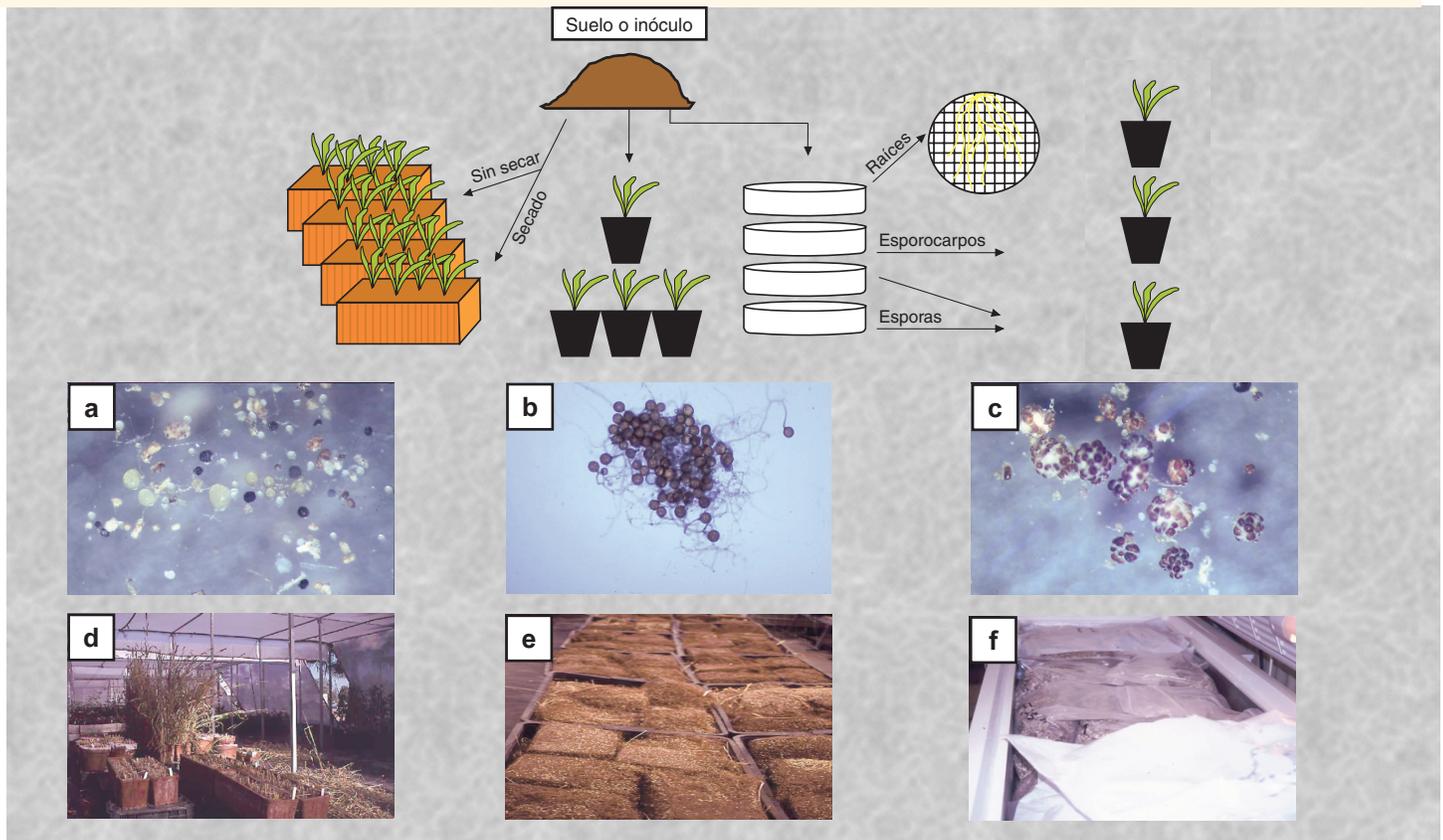


Figura 2. Dibujo esquemático del aislamiento de hongos micorrícicos arbusculares y la producción semi-industrial de inóculo. Fases de la producción: (a-c) Aislamiento de esporas de hongos micorrícicos arbusculares durante los ciclos de propagación para su control de calidad; (d) poda, (e) secado y (f) almacenamiento durante la producción de inóculo.

El siguiente paso sería ensayar los inóculos obtenidos en una serie de plantas. Como se dice anteriormente, prácticamente la totalidad de las plantas de interés agrícola y forestal forman micorrizas. Así que plantas hortícolas como tomates, lechugas, apios, cebollas, puerros, chiles, yucas, zucchinis, frijoles, ejotes, etc, árboles frutales como mangos, aguacates, cítricos, papayas, etc., plantas medicinales, y especies forestales como la caoba, el bálsamo, el pino, el roble etc. dependen de la presencia de hongos micorrícicos en sus raíces para un crecimiento y rendimiento óptimo. Igualmente las especies presentes en los manglares son micorrícicas [51]. También las plantas de interés ornamental como las palmeras y las cicas, las bromelias y los helechos, las orquídeas, etc. se ven favorecidas en su desarrollo en la presencia de los hongos micorrícicos [1, 13, 52, 53]. El abanico de posibilidades para futuras investigaciones sobre el uso de las micorrizas en el campo de la producción de plantas es por lo tanto amplísimo y no es la intención del presente artículo abarcarlas todas aquí. Sólo por mencionar algunos ejemplos, los estudios se podrían enfocar a la evaluación de las plantas autóctonas y variedades fitomejoradas en cuanto a su respuesta micorrícica o al control de algunas enfermedades típicas de los cultivos de El Salvador. La figura 3 muestra dos ejemplos del efecto conseguido mediante la micorrización en cebolla como ejemplo de planta hortícola y palmeras como ejemplo de planta ornamental.

Existe una presión inminente por desarrollar sistemas de producción vegetal respetuosos con el medio ambiente, no sólo por la demanda a nivel internacional de productos producidos de forma sostenible, si no también por el enor-

me impacto negativo que la agricultura convencional está teniendo sobre el medio ambiente. Aunque la agricultura convencional produce suficientes alimentos para sustentar la población actual, este logro ha tenido lugar a expensas de un impacto cada vez mayor sobre la sostenibilidad de nuestro planeta. Así la aplicación de cada vez mayores cantidades de fertilizantes químicos de nitrógeno y fósforo durante los últimos cincuenta años, ha conducido a una degradación de la calidad del aire y del agua. A su vez, la introducción del regadío en muchos cultivos ha resultado en la salinización del suelo y en el empobrecimiento de los suministros de agua. Además, las fuentes de nitrógeno, fósforo y agua no son renovables y en un futuro su uso en Agricultura ya no será posible debido a su disponibilidad limitada y el consecuente incremento en su costo [54-56]. Por lo tanto, la forma de manejar los sistemas agrícolas actualmente está comprometiendo, las necesidades futuras de la población, y es por esto que hay que apostarle a los sistemas de producción sostenibles. En este sentido, las micorrizas están ganando importancia ya que posibilitan la reducción del aporte de insumos como fertilizantes químicos y pesticidas y un ahorro de agua significativo. En El Salvador y en toda Centroamérica existe una razón adicional por la que se debería promover el uso de hongos micorrícicos, y ésta es el alto nivel de degradación del 74% que presenta la tierra cultivada, sobre todo por erosión, con el consiguiente agotamiento de los nutrientes del suelo [57, 58]. Los hongos micorrícicos mejoran, como se se menciona antes, la estructura del suelo y facilitan, por lo tanto, indirectamente la infiltración del agua, los procesos biogeoquímicos de reciclado de nutrientes,

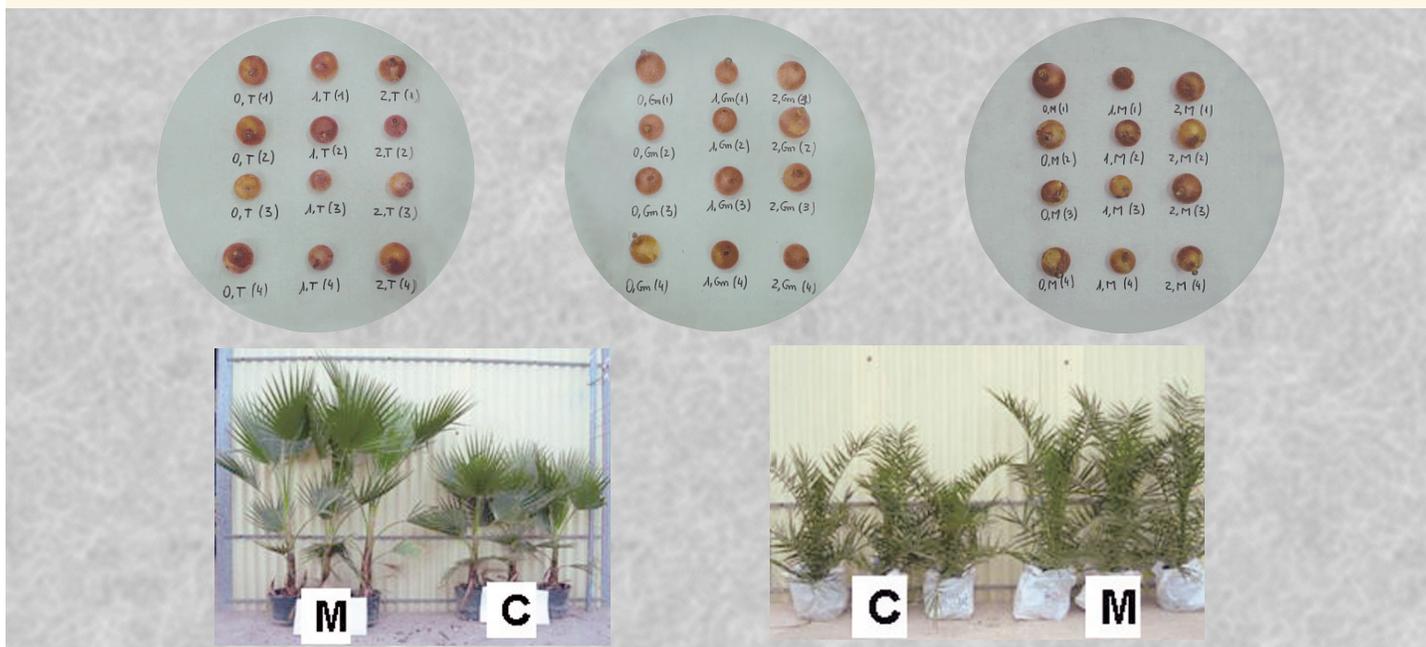


Figura 3. Efecto de micorrización sobre (a) el diámetro de bulbos de cebollas, determinado mediante barrido con varios hongos micorrícicos y (b) sobre el crecimiento de las palmeras *Washingtonia robusta* (Izquierda) y *Phoenix canariensis* (Derecha). C, plantas controles no micorrizadas; M, plantas micorrizadas.

la resistencia frente a la erosión, y el almacenamiento de carbono en el suelo.

Especial interés tiene también para El Salvador la aplicación de los hongos micorrícicos arbusculares en suelos contaminados por metales pesados. Se sabe que los metales pesados en suelos no pueden ser químicamente degradados y, por lo tanto, tienen que ser físicamente extraídos o inmovilizados. Los métodos usados tradicionalmente para la remediación de metales pesados en suelos (excavación del suelo y depósito en otro sitio, lavados de suelo) presentan numerosas desventajas. El método más efectivo es el de la fitorremediación, ya que además de que las plantas extraen los metales pesados, evitan también la erosión del suelo contaminado, reduciendo su transporte a otras zonas no afectadas por la presencia de metales pesados. La introducción de hongos micorrícicos puede ayudar a acelerar la revegetación de tierras severamente degradadas, como pueden ser zonas mineras o vertederos de basura caracterizados por contener altos niveles de metales pesados, donde apenas se instalan plantas y las plantas que consiguen establecerse presentan un crecimiento muy bajo debido a la falta de micorrización. Existen estudios que muestran que los hongos micorrícicos presentes en los sistemas radicales de plantas que crecen en suelos contaminados con metales pesados aumentan la tolerancia de las plantas a estos metales [21]. Estos hongos ayudan a acumular los metales pesados en las raíces, restringiendo su translocación al tallo. En comparación con plantas típicamente usadas en fitoremediación que no están

micorrizadas, las plantas micorrizadas aumentan la concentración de metales pesados acumulados en sus distintos órganos, pero, además, gracias al micelio externo formado por los hongos micorrícicos, son capaces de explorar un mayor volumen de suelo en busca de metales pesados.

La caracterización del estado micorrícico de las plantas típicas de la flora salvadoreña también sería un aspecto importante a tomar en consideración en futuras investigaciones, no sólo desde un punto de vista ecológico, sino porque el conocimiento sobre las micorrizas de ciertas plantas podría ser muy útil para programas de conservación y regeneración de ecosistemas amenazados. Es sabido que la micorrización en general aumenta el potencial de plantas de ser reintroducidas y su supervivencia [59]. De todas las 425 especies vegetales incluidas en el listado oficial de especies de vida silvestre, amenazadas o en peligro de extinción de El Salvador [60], tan sólo ha sido estudiada en cuanto a su estado micorrícico, el árbol de "caoba" *Swietenia macrophylla* [61], de la familia Meliaceae.

Un aspecto muy poco conocido entre ecólogos y botánicos a nivel mundial es el gran papel que juegan los hongos micorrícicos en la determinación de la biodiversidad vegetal y el funcionamiento de ecosistemas [29]. Si se acompañasen los estudios de biodiversidad vegetal con estudios sobre biodiversidad fúngica se podrían aclarar numerosos aspectos que determinan la función de los ecosistemas característicos de El Salvador.

CONCLUSIONES

- Al igual que la simbiosis así debe ser la relación entre los micorrizólogos y de los micorrizólogos con científicos de otras disciplinas, ya que el avance en el campo de las micorrizas es inconcebible sin un trabajo interdisciplinario.
- Los científicos que tradicionalmente se han dedicado al estudio de las micorrizas han sido principalmente agrónomos, botánicos, biólogos moleculares y celulares, bioquímicos, ecólogos, edafólogos, genetistas, fisiólogos vegetales, micólogos, microbiólogos y fitopatólogos. Sin embargo, muchos más científicos y profesionales tienen campo para que se dediquen a este interesante tema de investigación, ya que todavía queda mucho por conocer, especialmente, sobre las micorrizas de ecosistemas tropicales.
- Puede ser que para los futuros micorrizólogos sea un poco intimidante la gran cantidad de información existente sobre las micorrizas y el hecho de que tengan que adquirir, además del conocimiento de su disciplina, también este conocimiento. Además, es probable que no les sea fácil encontrar su nicho en la investigación de las micorrizas, ya que todos los aspectos son interesantes.
- Espero animar con este artículo a todas aquellas personas que alguna vez pensaron en trabajar con y sobre las micorrizas, a que lo hagan y si necesitan apoyo, les aseguro que encontrarán al menos a un micorrizólogo en el mundo dispuesto a orientarles o colaborarles, puesto que conocemos lo importantes que son las interacciones en la naturaleza.

- En una ocasión se afirmó que “las raíces de la ecología se encuentran en la ecología de las raíces” [62]. Teniendo en cuenta que la mayoría de las plantas no tiene raíces, sino micorrizas, y con el conocimiento que se tiene hoy en día de esta simbiosis, habría que buscar la base de la ecología y la salud de las plantas realmente en la ecología de las micorrizas.
- Con el trabajo que se desarrolla con los colaboradores en la Universidad de El Salvador, se está tratando de impulsar la línea de investigación sobre micorrizas. Ya se ha comenzado a planificar futuros proyectos y vamos a mandar solicitudes de financiamiento a algunas organizaciones nacionales e internacionales para su consecución. Para mayor información, pueden contactarme en las direcciones que aparecen en la primera página del artículo.
- **El Salvador debe invertir en la investigación científica, en este caso en y sobre las micorrizas, para garantizar el futuro de la población salvadoreña.**

GLOSARIO:

Barbecho: en agricultura, se denomina así a una tierra de labor que se deja sin sembrar durante una o varias temporadas.

Biorremediación: es el proceso en el que se emplean organismos biológicos como los hongos para resolver problemas específicos medioambientales, como la contaminación. En el caso de utilizar plantas se habla de fitorremediación.

Ecotoxicológico: relativo a la Ecotoxicología. La ecotoxicología es la rama de la Toxicología concerniente al estudio de los efectos de los agentes tóxicos, causados por contaminantes naturales o sintéticos a los constituyentes del ecosistema, en un contexto integral. Es la ciencia que predice los efectos tóxicos potenciales de los agentes en el ecosistema natural y en especies que no son normalmente blanco de dichos tóxicos.

Edáfico: relativo al suelo. El suelo es la capa superior de la tierra donde se desarrollan las raíces de las plantas.

Hifas: son los filamentos que, reunidos, forman el micelio (cuerpo vegetativo) de la mayoría de los hongos.

Quelato: formación de moléculas que se unen a través de un ion central con dos o más átomos formando habitualmente complejos más fuertes. Los quelatos, dependiendo de su naturaleza, tienen la capacidad de complejar hierro, calcio, metales pesados, etc

Rizosfera: es una parte del suelo inmediata a las raíces donde tiene lugar una interacción dinámica con los microorganismos. Las características químicas y biológicas de la rizosfera se manifiestan en una porción de apenas 1 mm de espesor a partir de las raíces.

Referencias:

- [1] Smith S, Read D (1997) *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, San Diego, London.
- [2] Barea J, Jeffries P (1995) Arbuscular mycorrhizas in sustainable soil-plant systems. En: Varma A, Hock B (ed.), *Mycorrhiza, Structure, function, molecular biology and biotechnology*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 521-560.
- [3] Gianinazzi S, Schüepp H. *Impact of Arbuscular Mycorrhizas on Sustainable Agriculture and Natural Ecosystems*. Birkhäuser Verlag, Basel.
- [4] Gianinazzi S, Schüepp H, Barea J, Haselwandter K (2002) *Mycorrhizal technology in agriculture. From genes to bioproducts*. Birkhäuser Verlag, Basel.
- [5] Redecker D, Kodner R, Graham L (2000) Glomalean fungi from the Ordovician. *Science* 289: 1920-1921.
- [6] Allen MF (1991) *The Ecology of Mycorrhizae*. Cambridge University Press, London.
- [7] Brundrett M (2004) Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews* 79: 473-495.
- [8] Peterson RL, Massicotte HB, Melville LH (2004) *Mycorrhizas: anatomy and cell biology*. National Research Council Research Press.
- [9] Schüßler A, Schwarzott D, Walter C (2001) A new fungal phylum, the *Glomeromycota*: phylogeny and evolution. *Mycological Research* 105: 1413-1421.
- [10] Lamont B (1982) Mechanisms for enhancing nutrient uptake in plants, with particular reference to mediterranean South Africa and Western Australia. *The Botanical Review* 48: 597-689.
- [11] Skene K (1998) Cluster roots: some ecological considerations. *Journal of Ecology* 86: 1060-1064.
- [12] Vance C, Uhde-Stone C, Allan D (2003) Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist* 157: 423-447.
- [13] Dreyer B, Morte A, Honrubia M (2001) Growth of mycorrhizal *Phoenix canariensis* plants under three different cultivation systems. En: Horst W, Schenk M, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer W, Goldbach H, Olf H, Römfeld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schubert S, Wirén N, Wittenmayer L (eds), *Plant nutrition - Food security and sustainability of agro-ecosystems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 648-649.
- [14] Marschner H, Dell B (1994) Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil* 159: 89-102.
- [15] Morte A, Gutiérrez A, Dreyer B, Torrente P, Honrubia M (2004) [en línea] Biofertilizantes de última generación. Feria de Calidad Ambiental y Ecoeficiencia 2004. Disponible en Web: <http://www.calidadambiental.info/murcia/sec05_libros/pdf/AsuncionMorte.pdf> [Consulta: 04 de junio de 2007].
- [16] Vessey J (2003) Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil* 255: 571-586.
- [17] de Boer W, Folman L, Summerbell R, Boddy L (2005) Living in a fungal world: impact of fungi on soil bacterial niche development. *FEMS Microbiology Reviews* 29: 795-811.
- [18] Augé RM (2001) Water relation, drought and VA mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11: 3-42.
- [19] Morte A, Lovisolo C, Schubert A (2000) Effect of drought stress on growth and water relations of the mycorrhizal associations *Helianthemum almeriense*-*Tefezia claveryi*. *Mycorrhiza* 10: 115-119.

- [20] Morte A, Díaz G, Rodríguez P, Alarcón JJ, Sánchez-Blanco MJ (2001) Growth and water relations in mycorrhizal and non-mycorrhizal *Pinus halepensis* plants in response to drought. *Biología Plantarum* 44: 263-267.
- [21] Gaur A, Adholeya A (2004) Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Science* 86: 528-534.
- [22] Azcón-Aguilar C, Barea J (1996) Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens - an overview of the mechanisms involved *Mycorrhiza* 6: 457-464 .
- [23] Linderman RG (2000) Effects of mycorrhizas on plant tolerance to diseases. En: Kapulnick Y, Douds DD Jr (eds), *Arbuscular Mycorrhizas: physiology and function*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 345-366.
- [24] Borowicz VA (2001) Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant-pathogen relations? *Ecology* 82: 3057-3068.
- [25] Pflieger F, Linderman R (1994) *Mycorrhizae and Plant Health*. APS, St Paul.
- [26] Whipps JM (2004) Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Canadian Journal of Botany* 82: 1198-1227.
- [27] Wright S, Upadhyaya A (1998) A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198: 97-107.
- [28] Rillig M, Steinberg P (2002) Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification? *Soil Biology and Biochemistry* 34: 1371-1374.
- [29] Van der Heijden M, Klironomos J, Ursic M, Moutoglou P, Streitwolf-Engel R, Boller T, Wiemken A, Sanders I (1998) Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* 396: 69-72.
- [30] Frank A (1885) Über die auf Wurzelsymbiose beruhende Ernährung gewisser Bäume durch unterirdische Pilze. *Bericht der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 3: 128-145.
- [31] Douds DD, Galvez L, Janke RR, Wagoner P (1995) Effect of tillage and farming system upon populations and distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 52: 111-118.
- [32] Barea JM (1991) Vesicular-Arbuscular Mycorrhizae as Modifiers of Soil Fertility. *Advances in Soil Science* 15: 1-40.
- [33] Hamel C (1996) Prospects and problems pertaining to the management of arbuscular mycorrhizae in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 60: 197-210.
- [34] Ocampo JA, Hayman DS (1980) Effects of pesticides on mycorrhiza in field-grown barley, maize and potatoes. *Transactions of the British Mycological Society* 74: 413-416.
- [35] Perrin R, Plenchette C (1993) Effect of some fungicides applied as soil drenches on the mycorrhizal infectivity of two cultivated soils and their receptiveness to *Glomus intraradices*. *Crop Protection* 12: 127-133.
- [36] Veeraswamy J, Padmavathi T, Venkateswarlu K (1993) Effect of selected insecticides on plant growth and mycorrhizal development in sorghum. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 43: 337-343.
- [37] Kurle JE, Pflieger FL (1994) Arbuscular Mycorrhizal Fungus Spore Populations Respond to Conversions between Low-Input and Conventional Management Practices in a Corn-Soybean Rotation. *Agronomy Journal* 86: 467-475.
- [38] Douds DD, Janke RR, Peters SE (1993) VAM fungus spore populations and colonization of roots of maize and soybean under conventional and low-input sustainable agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 43: 325-335.
- [39] Leglize P, Bonot S, Jacquot-Plumey E, von Alten H, Berta G, Estaun V, Pandard P, Rydlova J, Turnau K, Vestberg M, Vosátka M, Gianinazzi-Pearson V, Gianinazzi S, Leyval C (2006) AM fungi spore germination as a bioassay for soil biological quality - Results of an international ring test. 5th International Conference on Mycorrhiza, "Mycorrhiza for Science and Society", 23-27, July 2006, Granada, Spain, Book of abstracts, pp. 161.
- [40] Menge J (1984) Inoculum production. En: Powell CL, Bagyaraj DJ, VA *Mycorrhizae*. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, pp. 187-203.
- [41] Jarstfer A, Sylvia D (1993) Inoculum production and inoculation strategies for vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. En: Metting, F. (ed.), *Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management*. Marcel Dekker, pp 349-377.
- [42] Douds DD, Adholeya A, Gadkar V (2000) Mass production of VAM fungus biofertilizer. En: Mukerji KG, Chamola BP, Singh J (Eds.), *Mycorrhizal Biology*. Kluwer Academic Press, New York, pp. 197-215.
- [43] Gianinazzi S, Vosátka M (2004) Inoculum of arbuscular mycorrhizal fungi for production systems: science meets business. *Canadian Journal of Botany* 82: 1264-1271.
- [44] Singh S (2002) Mass production of AM fungi: Part 1. *Mycorrhizal News* 14, 2-9.
- [45] Feldmann F, Grotkass C (2002) Directed inoculum production—shall we be able to design populations of arbuscular mycorrhizal fungi: to achieve predictable symbiotic effectiveness? En: Gianinazzi, S., Schüepp, H., Barea, J.M., Haselwandter, K. (Eds.), *Mycorrhizal Technology in Agriculture*. Birkhäuser Verlag, Basel, pp. 261-279.
- [46] Sieverding E (1991) Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn, Germany.
- [47] Gaur A, Adholeya A, Mukerji K (2000) On-farm production of VAM inoculum and vegetable crops in marginal soil amended with organic matter. *Tropical Agriculture* 77: 21-26.
- [48] Douds DD Jr, Nagahashi G, Pfeffer PE, Reider C, Kayser WM (2006) On-farm production of AM fungus inoculum in mixtures of compost and vermiculite. *Bioresource Technology* 97: 809-818.
- [49] CAMAGRO (2005). Archivo Editorial Agroempresarial 2005 [en línea]. Editorial N° 12-2005. Importancia del uso de biofertilizantes en el sistema de producción agrosostenible, HA Ferlini Micheli. Disponible en Web: <<http://www.camagro.com/actualidad/av.asp?id=32&Queryt=avances&yy=2005>> [Consulta: 25 de marzo de 2006].
- [50] Blanco FA, Salas EA (1997) Micorrizas en la agricultura: Contexto mundial e investigación realizada en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 21: 55-67.
- [51] Sengupta A, Chaudhuri S (2002) Arbuscular mycorrhizal relations of mangrove plant community at the Ganges river estuary in India. *Mycorrhiza* 12: 169-174.
- [52] Dreyer B (2004) Estudios de caracterización y eficiencia de las micorrizas arbusculares de las palmeras *Brahea armata* S. Watson, *Chamaerops humilis* L., *Phoenix canariensis* Chabaud y *P. dactylifera* L. Tesis doctoral, Universidad de Murcia, Murcia.
- [53] López Jiménez J, Orts Pérez S (2000) Mycorrhization of vesicular-arbuscular mycorrhizae fungi in *Cycas revoluta* in the nursery. *Palms and Cycads* 67: 16-21.
- [54] Vance C (2001) Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant Physiology* 127: 390-397.
- [55] Gleick PH (2001) Making every drop count. *Scientific American* 284: 41-45.
- [56] Postel S (2001) Growing more food with less water. *Scientific American* 284: 46-51.
- [57] Scherr SJ (1999) Soil degradation, a threat to developing-country food security by 2020? Food, Agriculture, and the Environmental Discussion Paper 27. International Food Policy Research Institute. Washington, DC.
- [58] Zurek MB (2002) Induced Innovation and Productivity-Enhancing, Resource-Conserving Technologies in Central America: The Supply of Soil Conservation Practices and Small-Scale Farmers' Adoption in Guatemala and El Salvador. Tesis doctoral, Justus-Liebig-Universität, Giessen.
- [59] Jasper DA (1994) Management of mycorrhizas in revegetation. En: Robson A, Abbott L, Malajczuk N. (eds.), *Management of Mycorrhizas in Agriculture, Horticulture and Forestry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 211-219.
- [60] República de El Salvador (2004) Listado oficial de especies de vida silvestre, amenazadas o en peligro de extinción. Acuerdo N° 10, 29 de abril de 2004. Diario Oficial No. 78 Tomo 363.
- [61] Noldt G, Bauch J (2001) Colonization of fine roots of mahogany (*Swietenia macrophylla* King) by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi under plantation conditions in central amazon. *Journal of Applied Botany* 75: 168-172.
- [62] Sen DN (1980) *Environment and Root Behaviour*. Geobios International, Jodhpur, India.