

## Hongos micorrícicos: los amigos simbióticos de las plantas

*Señor: he oído a unos biólogos hablar entre dientes de AM y P: ¿se referían a la mañana y a la tarde?*



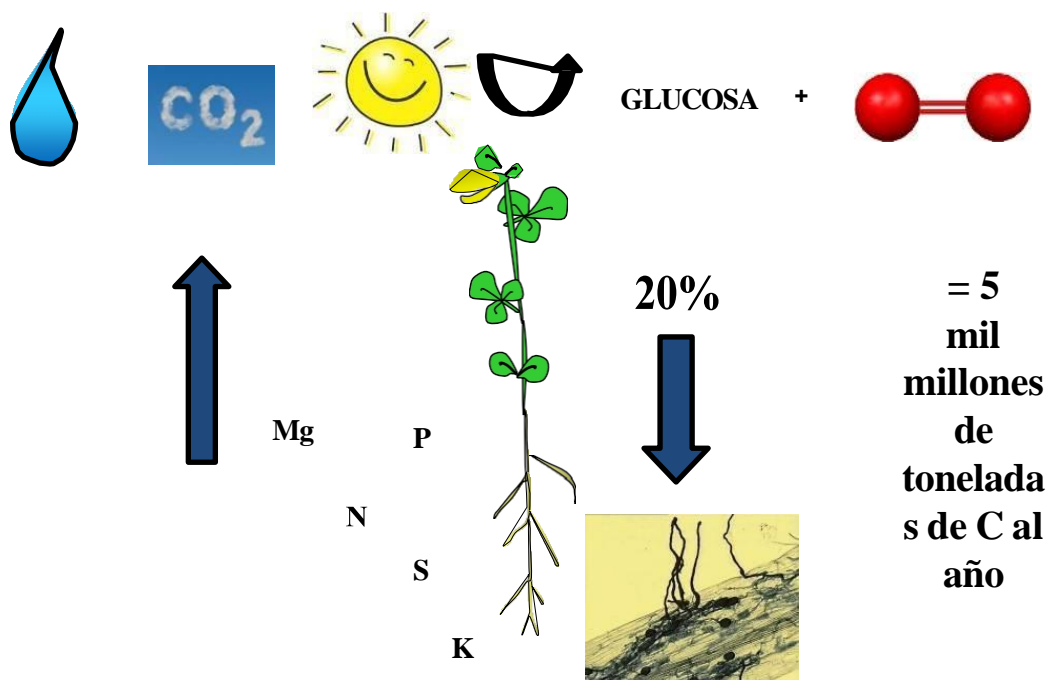
**Paola Bonfante**

Departamento de Ciencias de la Vida y Biología de Sistemas, Universidad de Turín, Italia

## Hongos micorrícicos

### Sinopsis

Las plantas pueden realizar un proceso fabuloso llamado fotosíntesis:



## Los nutrientes

Ca

Fig. 1. Para el proceso fotosintético, las plantas no sólo necesitan agua y dióxido de carbono, sino también nutrientes minerales que deben tomar del suelo. Los hongos micorrícicos que viven en sus raíces, como se muestra en el recuadro pequeño de la parte inferior, les ayudan de forma muy eficaz. Por otra parte, las plantas liberan carbono en el suelo, que es utilizado directamente por los hongos micorrícicos. La fotosíntesis crea glucosa, que alimenta a la planta y a sus hongos micorrícicos, y oxígeno, que nosotros, otros animales y las plantas necesitamos para respirar.

Durante este proceso, las plantas toman la energía de la luz solar y la utilizan para convertir el dióxido de carbono y el agua en alimento para ellas (para crecer, producir flores, semillas y nuevas plantitas) y para todos nosotros. Además, las plantas liberan oxígeno, indispensable para nosotros. Así pues, la mayor parte de la vida del planeta depende de la fotosíntesis de las plantas (los microbios también realizan la fotosíntesis, y otros microbios pueden crecer utilizando energía química en lugar de la energía del sol). Sin embargo, lo que es menos conocido es que, para estar sanas y hacer una fotosíntesis excelente, las plantas también necesitan muchos nutrientes, es decir, minerales procedentes del suelo, para llevar a cabo lo que llamamos *la nutrición mineral* de las plantas. Para estar sanos y ser fértiles, los suelos deben contener una gran cantidad de nutrientes, que son absorbidos por las plantas cuando absorben agua. *Dado que los animales se alimentan de plantas, y nosotros de plantas y animales, el suelo es la fuente última de nutrientes minerales para todos los seres vivos.*

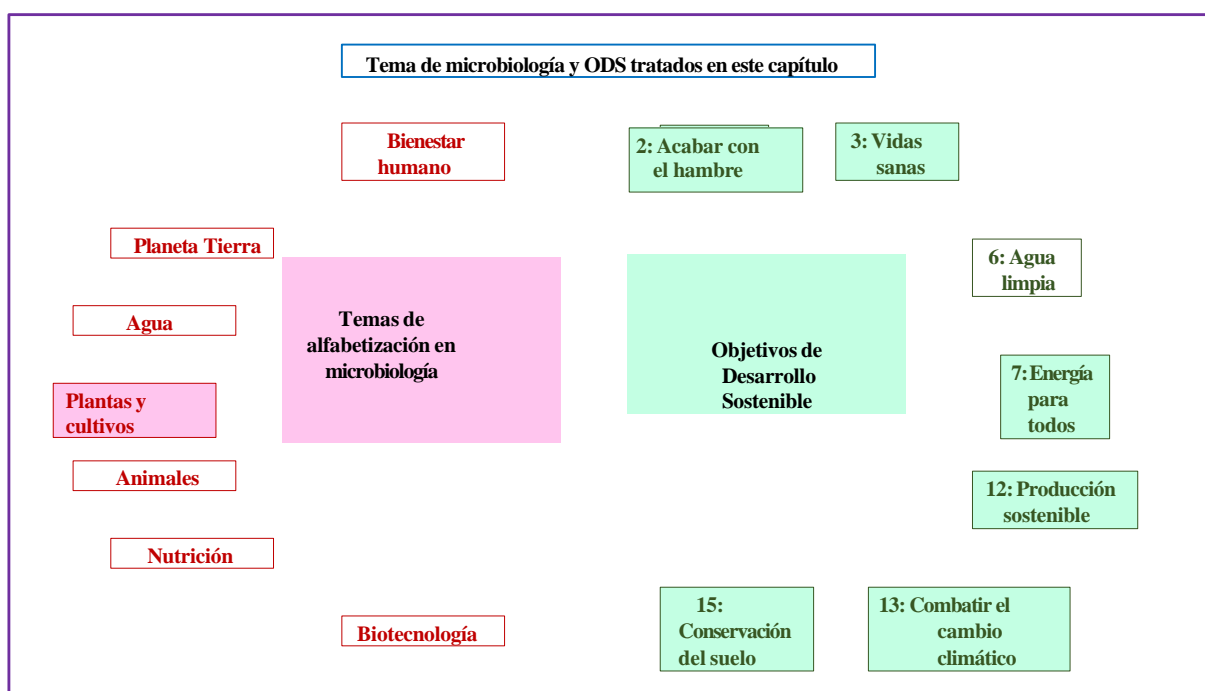
Los minerales llegan al suelo de muchas formas distintas: el nitrógeno se produce a partir de residuos animales descompuestos y plantas muertas, gracias a microbios saprótrofos, o de la atmósfera, gracias a bacterias especiales que lo convierten en amonio que las plantas pueden utilizar. Otros nutrientes como el fósforo, el potasio, el calcio y el magnesio "meteorizan" a partir de fuentes inorgánicas como las rocas, mientras que otros como el azufre proceden tanto de fuentes orgánicas

## Un marco educativo en Microbiología centrado en la niñez

como inorgánicas, incluida la atmósfera. Por desgracia, todos estos nutrientes están presentes en cantidades muy bajas en los suelos, por lo que las plantas siempre están hambrientas de estos preciosos nutrientes. Pero por suerte, las plantas no están solas ante esta tarea: además de los *rizobios*, las bacterias que fijan el nitrógeno atmosférico, las plantas cuentan con la ayuda de una multitud de hongos (Fig.1, que viven en simbiosis con las raíces de más del 90% de las plantas terrestres.

La mayoría de los cultivos que comemos (arroz, trigo, tomates, patatas, pimientos, zanahorias, así como manzanas, melocotones, naranjas y cerezas) albergan hongos microscópicos llamados *hongos micorrícicos arbusculares* (hongos MA), que colonizan íntimamente sus células radiculares. Muchos de los árboles que viven en los bosques, desde pinos hasta robles, sauces y hayas, albergan otros hongos que denominamos *hongos ectomicorrícicos* (hongos ECM). A diferencia de los hongos MA, algunos de estos ECM producen grandes cuerpos fructíferos que puedes ver cuando caminas por los bosques. Pero también los brezos y las orquídeas reciben ayuda de sus propios hongos simbióticos. Todos estos hongos micorrícicos exploran el suelo con sus diminutas hifas y captan minerales: al entrar en contacto íntimo con su planta huésped, liberan los preciados minerales a las plantas. Pero los hongos micorrícicos no sólo ayudan a las plantas como biofertilizantes, sino que también protegen a sus huéspedes verdes de los microbios patógenos. A cambio, la planta recompensa a su hongo simbiótico con una buena cantidad de carbono orgánico (que es el producto de la fotosíntesis). Un ejemplo omnipresente de excelente cooperación entre distintos organismos.

### La microbiología y el contexto social



*La microbiología*: ciclo del carbono, nitrógeno y fósforo impulsado por microbios; papel de los hongos micorrícicos en el ciclo del fósforo; papel de los hongos micorrícicos en la reducción de la pérdida de nutrientes del suelo; microbiota vegetal: no sólo bacterias. *Cuestiones de sostenibilidad*: conservación de la biodiversidad; cultivos y alimentos: el papel de los hongos micorrícicos para una agricultura más sostenible.

### Hongos micorrícicos: la microbiología

1. *Ciclos del carbono, el nitrógeno y el fósforo impulsados por microbios*. Los microorganismos desempeñan un papel central y esencial en los ciclos de nutrientes. Gracias a su metabolismo plástico, acoplan reacciones elementales, impulsando ciclos biogeoquímicos en los que intervienen el carbono (C), el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S). Estos fenómenos garantizan

## Un marco educativo en Microbiología centrado en la niñez

la renovación y el suministro de nutrientes que son esenciales para el crecimiento de las plantas y los cultivos, a través de la interconversión de diferentes formas de nitrógeno, azufre y fósforo, interrelacionadas con el ciclo del carbono. Los microorganismos son responsables de la degradación de la materia orgánica, que controla la liberación de nutrientes para las plantas, pero también es importante para el mantenimiento de la estructura del suelo y la sostenibilidad de la calidad del suelo para el crecimiento de las plantas. La actividad microbiana en el suelo también es responsable de las pérdidas de carbono a la atmósfera a través de la respiración y la metanogénesis, y los microorganismos son necesarios para la remediación, a través de la degradación de contaminantes orgánicos y la inmovilización de metales pesados, proporcionando ejemplos obvios de mejora de la calidad del suelo.

**2. El papel de los hongos micorrícicos en el ciclo del fósforo.** Los sistemas biológicos de la Tierra se han movido en torno a la disponibilidad de fósforo desde el principio de la vida. El ADN -el material de los genes que determinan la herencia-, el trifosfato de adenosina (ATP) que proporciona la energía necesaria para impulsar el metabolismo celular, los fosfolípidos que componen las membranas celulares, todos contienen fósforo. Pero el fósforo (P) sólo está presente en cantidades ínfimas en la corteza terrestre (0,09 % en peso), sobre todo en algunos minerales carbonatados. Estas rocas representan las reservas de P explotables de forma económicamente viable y que se prevé que se agoten durante el próximo siglo. En los suelos, la meteorización libera P en forma de fosfato de los minerales mediante varios procesos, como la respiración microbiana, que libera  $\text{CO}_2$ , lo que a su vez aumenta la acidez en torno a la degradación de la materia orgánica y los pelos radiculares. Una vez que el P se libera de los minerales durante la meteorización, pasa a formar parte de la solución circulante del suelo con una concentración de 10-20 ppm. Sin embargo, el fosfato es rápidamente secuestrado en varios complejos del suelo, limitando su disponibilidad para plantas y organismos. En principio, por tanto, el P es un factor limitante para el crecimiento de las plantas.

Sin embargo, los hongos micorrícicos, es decir, los hongos que viven asociados a las raíces de alrededor del 90% de las plantas terrestres, ayudan a las plantas a adquirir P. De hecho, los hongos micorrícicos ocupan un doble nicho: además de su asociación íntima con las raíces de las plantas, también se extienden a gran distancia en el suelo, donde producen una extensa red de absorción que se extiende más allá de la zona de agotamiento de las raíces, es decir, la zona alrededor de la raíz, donde la solución de fosfato (y de otros minerales) se agota más rápidamente que su reposición.

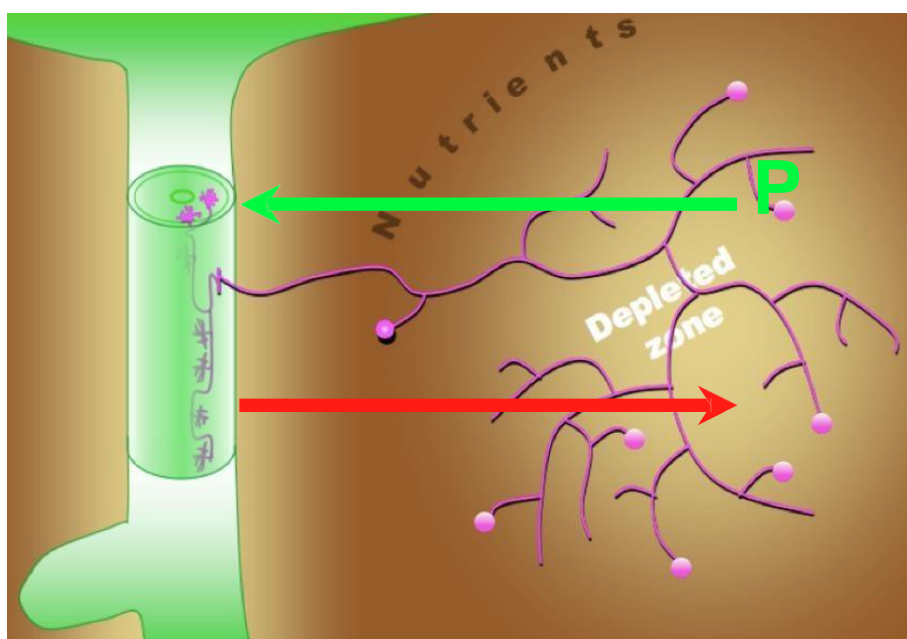


Fig. 2. El hongo MA produce una red de hifas (en rosa) que exploran el suelo (en marrón), yendo más allá de la zona de agotamiento que rodea la raíz (en verde). El hongo absorbe muchos minerales, incluido el fosfato (P, flecha verde), y los translocan a lo largo de las hifas que colonizan las raíces. En el interior de las células de la raíz se producen pequeños arborescencias (arbuscúlosos). Aquí la planta libera el carbono (flecha roja) al hongo.

## Un marco educativo en Microbiología centrado en la niñez

Gracias a esta capacidad, los hongos micorrícicos, y en particular los hongos MA, tienen acceso a un gran volumen de suelo del que captan nutrientes, como P, zinc, amonio, nitrato, cobre, potasio (K) y S. Hasta el 90% del P y el 20% del N de las plantas pueden ser aportados por los hongos MA, mientras que otros hongos micorrícicos, como los que se asocian a las raíces de los árboles forestales, desempeñan un papel más relevante en la absorción de N. El movimiento de P hacia la planta se alimenta del movimiento de carbono de la planta al hongo.

Los hongos MA están bien equipados con transportadores específicos de P, situados en su superficie hifal, en la interfaz con el suelo. Una vez que el fosfato entra en las hifas, se desplaza como gránulos de polifosfato a lo largo de las hifas. Estos penetran en la raíz de la planta, formando estructuras muy ramificadas llamadas arbuscúlos en las células corticales, y llevan el fosfato a la raíz de la planta (Fig.2), desde donde viaja a las partes aéreas, alcanzando los órganos epigeos probablemente a través de los tejidos vasculares.

**3. El papel de los hongos micorrícicos en la reducción de la pérdida de nutrientes del suelo.** La agricultura y las actividades humanas tienen un profundo impacto en los ciclos minerales: como consecuencia de la Revolución Verde, la producción de alimentos basada en fertilizantes y la aplicación de P, junto con N, K y otros micronutrientes, en abonos disponibles comercialmente se dispararon en muchas zonas del planeta. La Revolución Verde condujo a la prosperidad en algunos países y al crecimiento exponencial de la población mundial, pero también generó daños medioambientales. Uno de los principales es la enorme cantidad de nutrientes que, suministrados como fertilizantes, se pierden de los suelos a los que se aplican por lixiviación y llegan a las capas profundas del suelo y a las aguas superficiales. Hasta 160 kg de nitrógeno (N) y 30 kg de P pueden perderse por hectárea debido a la lixiviación. El N también se pierde en forma de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), un potente gas de efecto invernadero, con pérdidas de hasta 143 kg de N por hectárea. El papel de los hongos micorrícicos, en particular los hongos MA, en la reducción de la pérdida de nutrientes del suelo es cada vez más importante. La reducción de la pérdida de nutrientes por los hongos micorrícicos se consigue mediante una mayor inmovilización de nutrientes y, probablemente, mediante la alteración de algunos procesos del ciclo de nutrientes, que favorecen la retención de nutrientes en el suelo. La Figura 3 ilustra cómo los hongos MA reducen la pérdida de N y P, ejecutando un servicio ecológico crucial en los ecosistemas agrícolas.

**4. La microbiota vegetal: no sólo bacterias.** Las plantas viven en ecosistemas en los que interactúan con complejas comunidades microbianas con las que establecen un amplio abanico de relaciones. Estos microbios constituyen la llamada "microbiota", término acuñado para describir la diversidad de microbios, en su mayoría beneficiosos, que colonizan todos los órganos de las plantas, desde las raíces hasta las semillas, desde las superficies externas hasta los tejidos internos. Como en el caso de los microbios que viven en nuestro intestino, el conocimiento de la microbiota vegetal ha requerido importantes avances técnicos, habitualmente identificados como "tecnologías ómicas", donde confluyen informática, big data y biología. La información genómica presente en la microbiota asociada a las plantas se define como "microbioma", también conocido como el segundo genoma vegetal. Los microbios ayudan a las plantas, mejorando su nutrición mineral, influyendo en algunos procesos de desarrollo (por ejemplo, la arquitectura de las raíces) y aumentando su inmunidad natural. A pesar de las diferencias en la composición de la microbiota vegetal y animal, comparten estas funciones principales.

¿Cuáles son los actores de la microbiota vegetal? Además de bacterias, arqueas, virus, insectos y oomicetos, los hongos representan un componente relevante de la microbiota vegetal. Se ha asignado un nombre específico (Mycobiota) a estos microbios que -como microbios saprótrofos, endofíticos o simbióticos- se asocian con los órganos de las plantas. Los hongos micorrícicos y otros hongos beneficiosos predominan en las raíces, mientras que los Ascomycota y Basidiomycota son muy comunes en las hojas.

## Un marco educativo en Microbiología centrado en la niñez

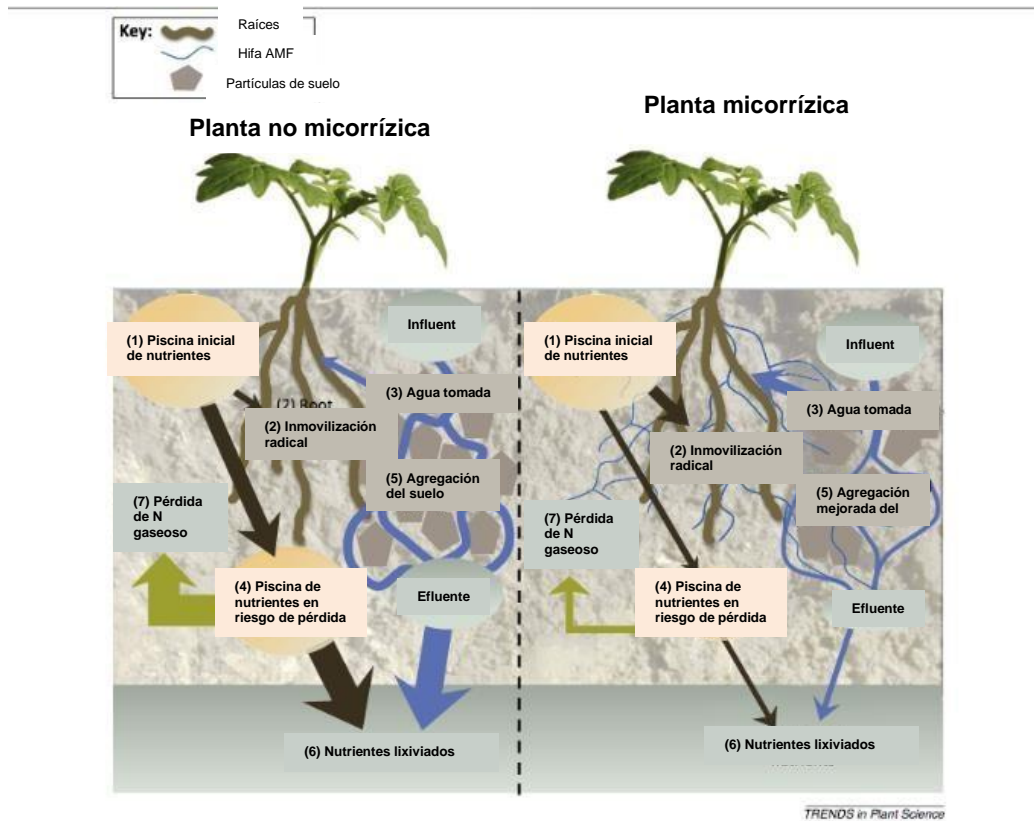


Fig. 3 Impactos de las plantas micorrizadas frente a las no micorrizadas en las vías de pérdida de nutrientes del suelo. La reserva de nutrientes de partida (1) puede comprender compuestos inorgánicos y/u orgánicos que contienen N y P. La inmovilización de nutrientes (2) y la absorción de agua (3) aumentan cuando las plantas son colonizadas por hongos MA. Como consecuencia, la reserva de nutrientes en riesgo de ser lixiviados (4) se reducirá con las plantas micorrizadas (6). Simultáneamente, los HMA pueden mejorar la agregación del suelo (5). La pérdida de N gaseoso (7) aumenta cuando las plantas no son micorrizadas debido a una menor asimilación de N por parte de la planta. (De Cavagnaro *et al* 2015).

### Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Grandes Retos

La dimensión microbiana de la absorción de nutrientes por los hongos micorrízicos está relacionada con varios ODS, como la conservación de la tierra, un medio ambiente sano, una vida sana y la lucha contra el cambio climático. Los siguientes temas - Conservación de la biodiversidad y hongos micorrízicos; Cultivos y alimentos: el papel de los hongos micorrízicos - se desarrollan en el contexto de estos Grandes Retos.

- **Conservación de la biodiversidad y hongos micorrízicos.** La micorrización es un proceso omnipresente, que está presente en gran parte de las 340.000 especies vegetales identificadas hasta ahora, y en el que intervienen unas 50.000 especies fúngicas. Las simbiosis micorrízicas están presentes en casi todos los ecosistemas, desde los bosques a los desiertos, desde las praderas a los ecosistemas agrícolas. El éxito de esta simbiosis se remonta al momento en que las plantas colonizaron la tierra. Los informes fósiles revelan que los rizomas de plantas existentes de hace más de 400 millones de años presentaban estructuras fúngicas comparables a las producidas por los hongos AM actuales. El éxito de las micorrizas en el tiempo y en el espacio sugiere con fuerza que los hongos micorrízicos son determinantes cruciales para las comunidades vegetales. De hecho, varios estudios han informado de que los hongos MA aumentan la diversidad vegetal de los pastizales al estimular específicamente el crecimiento de especies vegetales subordinadas, a menudo raras.

Los mecanismos subyacentes por los que los hongos MA promueven el crecimiento de estas micorrizas en estas especies de plantas dependientes pueden explicar cómo estos hongos promueven la

## Un marco educativo en Microbiología centrado en la niñez

diversidad vegetal. Existe una relación positiva entre la dependencia micorrícica de una planta y la cantidad de fósforo liberado por los hongos MA. Además, el transporte de carbono entre plantas a través de una red de hifas micorrícicas, de una planta a otra, se dirige hacia las especies vegetales con mayor dependencia micorrícica. Por tanto, las especies vegetales con mayor dependencia micorrícica reciben muchos más recursos de los hongos MA que las especies vegetales con menor dependencia. Sin embargo, hay algunos casos en los que los hongos MA pueden reducir la diversidad. Esto se ha observado en praderas de hierba alta en las que la mayoría de las plantas tenían una baja dependencia micorrícica. En conclusión, la presencia de hongos micorrícicos es crucial para mantener alta la biodiversidad de las comunidades vegetales, un parámetro crucial para la sostenibilidad de los entornos naturales.

- **Cultivos y alimentos en un mundo cambiante: el papel de los hongos micorrícicos.** Se prevé que en 2050 la población humana supere los 10.000 millones de habitantes. Proporcionar alimentos nutritivos y seguros a esta población creciente es uno de los mayores retos para la humanidad y para la ciencia. El escenario del cambio climático, con sus fenómenos extremos, es otra tarea cada vez más difícil. Algunas de las últimas estimaciones predicen la necesidad de aumentar la productividad agrícola en al menos un 70% para 2050, mediante el desarrollo de enfoques más sostenibles. Se trata de pasar de la agricultura intensiva, producto final de la Revolución Verde, a una agricultura más sostenible que, sin embargo, no es menos productiva.

Una agricultura integrada, basada al menos en parte en la llamada Revolución Microbiana, podría responder en parte a estos requisitos. En este contexto, el papel de la biodiversidad del suelo se vuelve crucial y las bacterias promotoras del crecimiento vegetal, así como los hongos micorrícicos, se convierten en herramientas relevantes para alcanzar estos nuevos objetivos de forma sostenible. Además, la productividad agrícola debe hacerse más resistente y resiliente a los nuevos patógenos, que se extienden rápidamente por los continentes, así como a los fenómenos climáticos extremos, cada vez más frecuentes. Los hongos MA colonizan la mayoría de los cultivos que alimentan al mundo (Fig.4):



Fig. 4. Las plantas que comemos son en su mayoría plantas AM. Todos los vegetales ilustrados, a excepción del brécol central, proceden de plantas colonizadas por hongos MA.

## Un marco educativo en Microbiología centrado en la niñez

Los hongos patógenos de los cultivos y otras plagas tienen un enorme impacto en la salud pública mundial, ya que pueden ser responsables de pérdidas de rendimiento del 20-40 % anual, lo que reduce fuertemente la seguridad alimentaria a nivel mundial. Esto exige una mejor gestión de las enfermedades de los cultivos. Entre los enfoques más respetuosos con el medio ambiente, los hongos micorrícicos ofrecen una ayuda inesperada. De hecho, muchos estudios han demostrado que durante la formación temprana de MA se produce una activación de las respuestas de defensa de la planta, que se explica como una forma de cebado de la planta. Este tipo de protección contribuye a la denominada resistencia inducida por la micorriza cuando las plantas AM se enfrentan a patógenos biotróficos y necrótrofos, nematodos, insectos y virus. Debido a estas capacidades de los AM (no sólo biofertilizantes, sino también bioprotectores), muchos proyectos agrícolas innovadores se basan actualmente en la aplicación de inóculos de AM, a menudo mezclados con otros microbios beneficiosos. Muchos experimentos ya han demostrado aumentos significativos de la productividad de las plantas. Es impresionante ver que, aunque los hongos MA crecen en los órganos ocultos de las plantas -las raíces-, sus efectos beneficiosos se detectan en toda la planta, a menudo aumentando el proceso fotosintético, así como mejorando la calidad de las semillas. Dado que los hongos MA se consideran hasta ahora microbios biotróficos obligados (necesitan la planta para cumplir su ciclo vital), establecer inóculos eficientes y de alto nivel será un objetivo crucial para la agricultura del futuro.

### Posibles implicaciones para las decisiones

#### 1. Individual

- a. Buscar mercados donde se vendan hortalizas procedentes de plantas micorrizadas.

#### 2. Políticas comunitarias

- a. Apoyar a escala local y nacional proyectos que promuevan experimentos de campo con plantas micorrizógenas.
- b. Apoyar a escala local y nacional proyectos que promuevan experimentos forestales con árboles micorrizados.
- c. Apoyar proyectos que sigan toda la cadena: producción de plantas micorrizadas; cosecha de productos finales (tomate, por ejemplo), evaluación por parte de los consumidores.

#### 3. Políticas nacionales

- a. política de producción y comercialización de inóculos microbianos.

### Participación de los alumnos

#### 1. Debate en clase sobre los problemas relacionados con el fósforo (por comer pescado).

2. Ejercicios (podrían hacerse a cualquier nivel, pero éstos son probablemente de educación secundaria)

- a. ¿Han recogido los alumnos setas en el bosque?
- b. ¿Qué saben de micología?
- c. ¿Pueden comentar la Fig. 1?
- d. Teniendo en cuenta los ODS, ¿cómo podemos cambiar nuestro enfoque sobre el papel ecológico de los hongos micorrícicos?

### Base empírica, lecturas complementarias y material didáctico

#### sitios web

<https://www.kidsdiscover.com/teacherresources/fungi/>



## Un marco educativo de microbiología centrado en el niño

<https://bbsrc.ukri.org/documents/mushroom-pdf/>

[http://www.davidmoore.org.uk/Assets/fungi4schools/GBF\\_web/Teachers%20notes.htm](http://www.davidmoore.org.uk/Assets/fungi4schools/GBF_web/Teachers%20notes.htm)

<https://projects.au.dk/ecofinders/ecosystem-services/nutrient-cycling-in-soil/>

<https://www.soils4teachers.org/lessons-and-activities/teachers-guide/soils-food-health>

Berendsen R y K. Schlaeppi 2019. Número temático sobre microbiología ambiental, microbiota vegetal. Opinión actual en microbiología 49.

Bonfante P y Venecia F, 2020. Mucoromycota: yendo a las raíces de los hongos que interactúan con las plantas. Fungal Biology Reviews, <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2019.12.003>

Burgin, A.J., Yang, W.H., Hamilton, S.K. y Silver, W.L. (2011), Beyond carbon and nitrogen: how the microbial energy economy couples elemental cycles in diverse ecosystems. Fronteras de la Ecología y el Medio Ambiente, 9: 44-52

Cavagnaro TR, Bender SF, Asghari HR, Heijden MGAV. 2015. El papel de las micorrizas arbusculares en la reducción de la pérdida de nutrientes del suelo. Trends Plant Sci. 20: 283-290.

Género A, Lanfranco L, Perotto S, Bonfante P 2020 Nature Microbiology Reviews 18, 649- 660 <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0402-3>

Moisés A. Sosa-Hernández, Eva F. Leifheit, Rosolino Ingraffia y Matthias C. Rillig. 2019 Hongos micorrícicos arbusculares del subsuelo para la sostenibilidad y la agricultura climáticamente inteligente: ¿Una solución bajo nuestros pies? Front. Microbiol., <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00744>

Pozo MJ. y Azcón-Aguilar C. 2007. Desentrañando la resistencia inducida por micorrizas. *Curr. Opin. Plant Biol.* **10**, 393-398.

Smith S, y D. Read. 2008 Mycorrhizal symbiosis, **eBook ISBN: 9780080559346** Academic Press  
Tedersoo, L., Bahram, M. & Zobel, M. How mycorrhizal associations drive plant population and community. *Science* **367**, eaba1223 (2020). imágenes muy bonitas que muestran el impacto ecológico de las micorrizas.

Van der Heijden, Marcel & Klironomos, John & Ursic, Margot & Moutoglis, Peter & Streitwolf-Engel, Ruth & Boller, Thomas & Wiemken, Andres & Sanders, Ian. (1998). Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*. 396. 10.1038/23932.