

Los hongos y oomicetos, habitantes naturales del suelo: ¿Amigos o enemigos de las plantas?

Fungi and oomycetes, natural inhabitants of the soil:
Friends or enemies of plants?

Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 89-105. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0008>

María Goretty Caamal-Chan¹, Abraham Loera-Muro¹, Aarón Barraza¹, Luis Guillermo Hernández Montiel

¹CONAHCYT-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC. (CIBNOR), Av.Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, B.C.S., C.P. 23096, México.

²Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC. (CIBNOR), Av.Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, BCS, C.P. 23096, México.





Resumen:

Los hongos y los oomicetos son actores esenciales en los ecosistemas terrestres y tienen un papel principal en las interacciones biológicas de las plantas y los microorganismos del suelo. Existen diferentes tipos de hongos en los suelos de todo el mundo. Asimismo, algunos hongos interactúan estrechamente con las plantas y las ayudan a crecer al mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo, tales como nitrógeno, fósforo y potasio. Otros hongos producen algunas moléculas que tienen acción contra otros microorganismos o promueven la activación de mecanismos de defensa de las plantas que las protegen de agentes patógenos. Sin embargo, existen hongos y oomicetos que provocan enfermedades en las plantas. En la rizosfera, una región importante de interacción planta-suelo-microorganismo, hay interacciones tanto con microorganismos benéficos y no benéficos, lo que resulta en un equilibrio saludable para la comunidad de microorganismos benéficos que protegen a las plantas. La forma en que los hongos y oomicetos interactúan con las plantas y el ambiente es un factor muy importante para comprender el papel central de estos microorganismos en el crecimiento, la salud o las enfermedades de las plantas.

Palabras claves: comunidades microbianas, diversidad de hongos, funciones de los hongos, salud del suelo, microbioma del suelo.

Abstract:

Fungi and oomycetes are essential players in terrestrial ecosystems and are central to the plant-soil microbe biological interactions. There are different types of fungi distributed in soils worldwide. Likewise, some fungi closely interact with plants and promote their growth, improving soil nutrient availability,

such as nitrogen, phosphorus, and potassium. Other fungi produce molecules that act against other microorganisms or promote the plant defense mechanisms that protect plants from pathogenic agents. However, some fungi and oomycetes can cause diseases in the plants. In the rhizosphere, an essential zone of plant-soil-microorganism interaction, there are simultaneous interactions between beneficial and non-beneficial microorganisms, resulting in a healthy balance for the beneficial microbial community that protects the plants. How fungi and oomycetes interact with plants and the environment is an essential factor in understanding the central role of those microorganisms in the growth, health, or diseases of plants.

Keywords: microbial communities, fungal diversity, fungal functions, soil health, soil mycobiome.

Introducción

En el suelo habitan una gran variedad de microorganismos necesarios para un ecosistema sano. Estos son muy diversos, pudiendo ser bacterias, arqueas, protozoos, algas, hongos y oomicetos. Por otro lado, las plantas alteran la composición del suelo gracias a su capacidad de absorber nutrientes del mismo y a través de la producción en las raíces de compuestos orgánicos, los cuales pueden variar en cantidad y variedad en la rizosfera según sea necesario. Esta variación en la producción de compuestos por parte de la raíz permite a las plantas adaptar la composición de su comunidad microbiana de la rizosfera de acuerdo a sus necesidades (Hu *et al.* 2021; Kawasaki *et al.* 2021).

En este trabajo nos centraremos en dos grupos microbianos importantes que comparten estrategias de vida similares: los llamados hongos verdaderos y los oomicetos. Ambos microorganismos tienen alta plasticidad fenotípica que les permite colonizar diferentes tipos de hábitats y soportar condiciones ambientales variables, como es el caso de los suelos.

Estos organismos exhiben crecimiento micelial filamentoso, reproducción por esporas y estrategias similares de adquisición de nutrición mediante la secreción de enzimas extracelulares para descomponer nutrientes complejos y recuperar azúcares simples por osmotrofia (Richards *et al.* 2006). Los suelos albergan comunidades fúngicas muy diversas que dan forma a la estructura de las comunidades microbianas y desempeñan papeles clave en la descomposición de la materia orgánica, en el ciclo de nutrientes y en la salud del hospedero vegetal (Tedersoo *et al.* 2014).

Sin embargo, la salud de las plantas también puede ser afectada por algunos miembros de estos hongos y oomicetos, lo cual, es determinado por el tipo de interacción con la planta, la cual puede ser benéfica, neutra o hasta patogénica. Por lo anterior,

el estudio de los hongos y de los oomicetos tiene alta relevancia en el área de la agricultura.

1. Las plantas y el suelo poseen hongos y oomicetos en su microbioma.

El suelo está conformado por materiales inertes que proporcionan sostén y los nutrientes necesarios para que las plantas puedan crecer, desarrollar y reproducirse de manera eficiente. Además, el suelo posee una comunidad microbiana muy diversa, que está compuesta principalmente por procariotas (bacterias y arqueas) y eucariotas (hongos, oomicetos, protozoarios, nemátodos, entre otros). Para determinar la calidad del suelo, los microorganismos que lo habitan se emplean como indicadores directos. Algunos de estos microorganismos se encargan de la descomposición y aprovechamiento de la materia orgánica, nutrientes o xenobióticos. Los microorganismos del suelo están estrechamente



relacionados con los cambios en las propiedades del suelo y en la sanidad de su huésped vegetal (Odelate y Babalola, 2019).

El suelo es un ecosistema muy complejo, el cual puede llegar albergar hasta un billón (1×10^{12}) de microorganismos por gramo de suelo (Zhang *et al.* 2019). A este conjunto de microorganismos que forman una comunidad microbiana se le conoce colectivamente como microbioma. El microbioma del suelo ofrece beneficios a las plantas, entre los cuales se incluye la promoción del crecimiento, incremento en la eficiencia en la absorción de nutrientes, control de plagas y fitopatógenos (Ray *et al.* 2020).

Además, el suelo es el principal reservorio del microbioma vegetal. Las raíces de las plantas pueden restringir la presencia de ciertos microorganismos, para así promover el establecimiento de otros microorganismos que son sus socios específicos, tales como las bacterias benéficas y los hongos micorrízicos

(hongos que habitan los suelos y que viven en simbiosis con las plantas, en sus raíces).

Los hongos micorrízicos interactúan directamente con las raíces de las plantas para obtener nutrientes (azúcares, ácidos grasos, aminoácidos), y en cambio el hongo procesa los minerales y materia orgánica del suelo en formas asimilables para la raíz (Shi *et al.* 2023). La rizosfera posee la composición microbiana más abundante y compleja en el suelo. Esta región es la zona que rodea a las raíces de las plantas, con hasta un billón de microorganismos por gramo en esta región del suelo, que se ha estimado puede albergar hasta un millón de diferentes grupos filogenéticos de microorganismos (denominados taxones para su clasificación) (Lakshmanan *et al.* 2017).

Los microorganismos de tipo eucariota representan una importante contribución a la biomasa microbiana. En biología y taxonomía, Eukaryota o Eukarya es el

dominio que incluye a los organismos constituidos por células con núcleo verdadero.

Los hongos y los oomicetos son microorganismos eucariotas filamentosos que se caracterizan por establecer redes de hifas vegetativas filamentosas, para la reproducción asexual y sexual generan esporas y, además comparten procesos similares de infección vegetal y adquisición de nutrientes. Estos organismos son morfológicamente muy similares (por ejemplo, la apariencia de la estructura del micelio) (Figura 1) y, presentan muchas similitudes en las etapas de su ciclo de vida. De hecho, a los oomicetos se les clasificó como hongos. No obstante, algunas características distinguen a los oomicetos de los hongos, tales como la composición de la pared celular, la estructura genómica y las secuencias de marcadores filogenéticos, entre otras. Estas diferencias los ubican en agrupaciones evolutivas distantes. Los

hongos están más cercanos a los animales, mientras que los oomicetos con las algas fotosintéticas (algas pardas) como parte de las Chromalveolata (Richards *et al.* 2006).

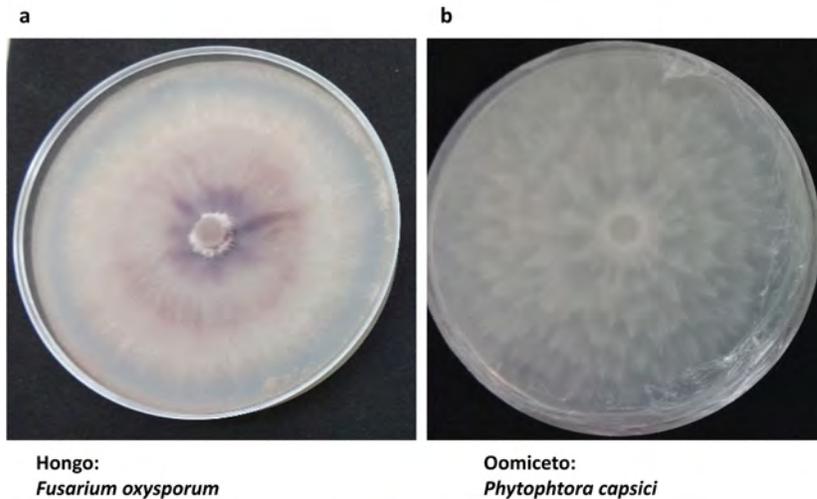


Figura 1. Colonias de hongos y oomicetos: a) colonia del hongo *Fusarium oxysporum* crecido en medio PDA (Papa Dextrosa Agar); b) colonia del oomiceto *Phytophthora capsici* crecido en medio PDA.

Las plantas han interactuado y, a su vez han evolucionado en conjunto con los microorganismos presentes en el suelo, durante millones de años. Además, se ha estimado que la interacción simbiótica con los hongos micorrízicos se estableció al menos 400 millones de años (Pirozynski y Malloch, 1975).

También, se ha estimado que los oomicetos evolucionaron hace aproximadamente hace 400 a 800 millones de años de un ancestro marino autótrofo (capaz de sintetizar su propio alimento) y posteriormente perdieron la capacidad de realizar el metabolismo fotosintético, en adaptación a un estilo de vida heterótrofo (sin capacidad de sintetizar su propio alimento) (Matari *et al.* 2014; Saraiva *et al.* 2023). Algunos oomicetos se convirtieron en patógenos de plantas, con una plasticidad genómica que les permitió infectar a un gran número de hospederos vegetales (Rovenich *et al.* 2023).

Las interacciones que se llevan a cabo por cada miembro del microbioma, en donde se abarca desde los microorganismos

benéficos, neutros y, hasta los patógenos, así como el constante movimiento entre el suelo y en la planta, dan lugar al incremento de la complejidad de las interacciones, lo cual establece un reto constante para la investigación y caracterización de estos ecosistema microbianos (Trivedi *et al.* 2020).

2. Los hongos y oomicetos, grupos de importancia del suelo y las plantas.

Los hongos y oomicetos son habitantes comunes del suelo, debido a su alta capacidad de adaptación. El grupo taxonómico de los hongos es uno de más diversos, los cuales están distribuidos en los diferentes suelos del mundo. Este grupo de microorganismos participan directamente en el ciclo del carbono y nitrógeno del suelo, nutrición, descomposición de la materia orgánica, así como en ser agentes de infecciones en las plantas o ser benéficos para estas en el proceso de



movilización de nutrientes del suelo a la planta y protegiendo contra otros microorganismos patogénicos (Tedersoo *et al.* 2014).

Debido a la importancia de los hongos en el suelo y en las plantas, ha surgido la necesidad de conocer sus patrones globales de distribución y de su diversidad, identificar los grupos particulares de las diferentes regiones geográficas (grupos endémicos), identificar los factores que generan vulnerabilidad en la ecología de los hongos, como la respuesta al cambio climático y la perturbación humana, así como la identificación de áreas de conservación (Tedersoo *et al.* 2014, 2022). Para abordar los estudios de la diversidad de los hongos del suelo es necesario la caracterización de los grupos taxonómicos de dicha comunidad, para tales análisis se usan marcadores genómicos de identificación, los cuales funcionan como un código de barras, los cuales están presentes en el genoma. En el caso de los hongos se utilizan las regiones genómicas del 18S rDNA y las regiones de “espaciadores internos de transcritos (ITSs)”. Estos marcadores se pueden utilizar de manera individual o en combinación para su procesamiento junto con tecnologías de secuenciación de nueva generación (NGS) y herramientas bioinformáticas, permitiendo la identificación taxonómica hasta el nivel de especie (parientes muy cercanos). El proceso de la caracterización de los grupos taxonómicos de hongos que integran una comunidad microbiana implica extraer la información genética (ADN genómico) de todo lo que habita en el suelo (bacterias, arqueas, hongos, oomicetos, nematodos, entre otros). A partir de esta enorme cantidad de información, mediante procesamiento bioinformático se extrae la información correspondiente a la comunidad fúngica y sus similares (oomicetos) empleando la región 18S rDNA y/o ITS, para proceder con la identificación y realizar la agrupación por categoría taxonómica (desde el nivel de filo hasta especie).

Para este proceso se emplean las bases de datos disponibles, en donde se encuentra la información de hongos y oomicetos

ya identificados. Estas bases de datos es empleada como plantilla para determinar la identidad de cada grupo de hongo y oomicetos presentes en la muestra analizada (Frac *et al.* 2018).

El estudio de las comunidades microbianas conformadas por hongos en suelos, se puede hacer referencia al trabajo de investigación realizado por Tedersoo y colaboradores (2014), en el cual se caracterizaron las comunidades microbianas de hongos en el suelo de diferentes regiones del mundo. Se reportó, que los taxones o agrupaciones taxonómicas que representan a los habitantes fúngicos de los suelos son *Basidiomycota*, *Ascomycota*, *Mortierellomycotina*, y *Mucoromycotina* (Tedersoo *et al.* 2014). Otro ejemplo de este tipo de estudios es un trabajo reciente de los mismos autores en donde se tomaron datos ya generados del consorcio global de los hongos para caracterizar las comunidades microbianas de

este grupo de organismos del suelo o microbioma, en el cual participaron varios grupos de investigación de suelos de todo el mundo. En este trabajo se analizaron los patrones de hongos endémicos, así como los factores que afectan a los hongos debido al cambio climático y las áreas para la conservación de grupos de hongos del suelo. En los hábitats tropicales como la Amazonia, la Península de Yucatán y el centro-oeste de África poseen patrones de hongos endémicos o exclusivos a cada región mencionada, aun siendo regiones tropicales. Además, en este trabajo se pudo determinar que los factores ambientales, tales como la sequía, calor, cobertura vegetal, ácidos o alcalinidad del suelo influyen directamente en diversidad, distribución y en la abundancia de estos organismos (Tederloo *et al.* 2022). La información generada de estos trabajos influye directamente en la toma de decisiones para la conservación de las especies de hongos como las micorrizas arbusculares (AM: endomicorriza que penetra en las células corticales de las raíces) y las ectomicorrizas simbióticas de raíces (colonizan la raíz sin penetrar en el tejido vegetal). La importancia de las endo- y ectomicorrizas se debe a su capacidad de promover el desarrollo y crecimiento vegetal o como agentes de control biológico, una característica altamente cotizada en la agricultura sustentable. Los hongos endomicorrizicos o AM tienen una comunicación compleja con las plantas hospedantes, al punto de promover en la planta hospedante un incremento en la tasa fotosintética, intercambio de gases y adsorción de agua, dando lugar a un crecimiento favorable en condiciones de estrés (Begum *et al.* 2019; Shi *et al.* 2023).

En contraste, la importancia de los oomicetos en las comunidades microbianas del suelo radica en que muchos de estos organismos son patógenos de plantas. Los estudios de la diversidad de oomicetos se han enfocado en suelos de actividad agrícola, en donde se cultivan plantas de importancia agroalimentaria, las cuales son huéspedes de muchos patógenos

microbianos. La información generada de este tipo de estudios permite analizar: 1) la presencia de oomicetos y que géneros están relacionados con actividades patogénicas en plantas, 2) el efecto de la rotación de cultivos en la diversidad de estos microorganismos, 3) los efectos de la aplicación de agroquímicos en la estructura comunitaria (Mácia-Vicente *et al.* 2020).

3. Las funciones de los hongos y oomicetos del suelo en las prácticas agrícolas.

La eubiosis es un término utilizado cuando se ha alcanzado el equilibrio microbiano en un ecosistema.

En los ecosistemas microbianos se pueden encontrar una gran cantidad de integrantes, las cuales están conformadas por organismos benéficos, neutros y patogénicos. Los organismos patogénicos representan una parte pequeña, pero importante de los microorganismos presentes. La disbiosis se



refiere a la pérdida de equilibrio microbiano en un ecosistema, lo cual afecta directamente al huésped e incluso provocando efectos negativos en su salud. Los conceptos expuestos se aplican directamente para los microbiomas. Por lo que el microbioma del suelo y la planta son indicadores directos del estado de saludables o enfermedad del agroecosistema (Frac *et al.* 2022).

Los hongos que habitan el suelo se pueden clasificar de acuerdo a su función ecológica. Los responsables de la formación del suelo se clasifican en el grupo de los reguladores del ecosistema.

Los que regulan enfermedades, plagas y el crecimiento de otros microorganismos se clasifican como controladores biológicos. Finalmente, está el grupo encargado de la estabilización de la materia orgánica del suelo y participar en la descomposición de la materia orgánica y entregar nutrientes para el crecimiento de las plantas (Frac *et al.* 2018). En suelos agrícolas los hongos micorrízicos arbusculares (AM) son la clase de microorganismos benéficos más importantes. Otro grupo importante son los hongos con acción antagónica hacia otros hongos que son patogénicos, tales como *Glomus sp.* o *Trichoderma sp.* Los hongos pertenecientes al género *Trichoderma* suelen ser empleados para el biocontrol de fitopatógenos y, también se pueden utilizar como bioestimulantes vegetales (Shi, 2023).

Por otro lado, los suelos agrícolas pueden poseer fitopatógenos. Los géneros más sobresalientes de patógenos de los grupos de hongos y oomicetos son: *Fusarium* (Michielse y Rep, 2009), *Verticillium* (Klosterman *et al.* 2009), *Rhizoctonia* (Hane *et al.* 2014), *Pythium* y *Phytophthora* (Ho *et al.* 2008). Estos géneros de fitopatógenos tienen importancia fitosanitaria a nivel mundial. Algunas prácticas agrícolas favorecen la selección de genotipos virulentos de fitopatógenos de plantas del reservorio natural de diversidad genética presente en los suelos agrícolas. En la naturaleza, la gran diversidad de plantas y de sus genotipos

(variaciones genéticas entre individuos) impide que las cepas que divergen como patógenas progresen con éxito. Esto se debe a que el proceso de divergencia se lleva a cabo en estrecha relación con la planta hospedera, la cual está rodeada de otras plantas pertenecientes a otras especies, géneros y familias; que a su vez no son susceptible a esta nueva cepa.

Sin embargo, en un campo de cultivo intensivo, donde predominan los monocultivos (plantas de la misma especie y variedad), una cepa patogénica de reciente divergencia cuenta con un gran número de hospederos vegetales que le permite aprovechar su nueva estrategia de patogenicidad. Los hongos que divergen como fitopatógenos de plantas cuentan con elementos en su genoma que les facilitan desarrollar su patogenicidad, así como de obtener mayor número de hospederos vegetales. Además, estos microorganismos pueden ser introducidos por el hombre,

mediante plantas o semillas infectadas a un nuevo nicho en donde podrían adaptarse con éxito (Stukenbrock y McDonald, 2008).

La importancia de la caracterización adecuada y constante de la diversidad del microbioma, para determinar si está en equilibrio, así como el desarrollo y aplicación de métodos para incrementar a los microorganismos benéficos dentro de un ecosistema desequilibrado o disbiótico, son necesarios para obtener una producción sostenible, disminuir o eliminar la aplicación de agroquímicos y para favorecer la protección del ambiente (Frac *et al.* 2018).

4. Los hongos y los oomicetos tienen la maquinaria molecular para poder interactuar con una planta.

Las plantas persisten a la presencia de patógenos, los cuales pueden ser desfavorables para su supervivencia, gracias a que cuentan con diferentes estrategias de defensa, las cuales, son multifacéticas y adaptables, lo que ayuda a contrarrestar a los agentes patógenos y, a su vez permite la asociación con los microorganismos benéficos (Vlot *et al.* 2021). Existen mecanismos de detección como en un primer nivel de interacción entre plantas y microorganismos, hay mecanismos de detección y reconocimiento mutuo. No obstante, el éxito de asociación de los microbios al interactuar con las plantas no depende totalmente de la capacidad de la planta para percibirlos como beneficiosos.

Los microorganismos benéficos o patógenos secretan pequeñas proteínas efectoras, para promover la colonización del hospedero manipulando los mecanismos celulares de la planta en su beneficio. La función más importante de las proteínas efectoras es la supresión de las señales de defensa de las plantas modulando las vías de señalización del jasmonato, el salicilato o el etileno. Lo anterior con el fin de que el microorganismo se integre como parte del microbioma endofítico del hospedero

o pueda desarrollar su ciclo infeccioso, en el caso de un patógeno (Lucke *et al.* 2020).

Estas proteínas se pueden clasificar según su naturaleza molecular en proteínas, metabolitos secundarios o ARN pequeños.

Inicialmente se consideró que los efectores eran específicos de los patógenos, pero cada vez más se reconoce que estas moléculas no son secretadas exclusivamente por los microorganismos patógenos con la finalidad de lograr la infección de la célula vegetal. Se ha reportado que los genomas de hongos y oomicetos patógenos tienen una gran cantidad de genes que codifican para proteínas efectoras en contraste con sus respectivas contrapartes no patogénicas. Los patógenos de plantas llevan a cabo la estrategia de reprogramación de las células del hospedero en su beneficio para establecer con éxito la infección, mediante las proteínas efectoras que secretan durante la infección (Dodds y Rathjen, 2010). Por



ejemplo, la familia de los hongos *Ustilaginaceae*, donde encontramos a *Ustilago maydis* causante del huitlacoche, utilizan a la proteína Pep1 para suprimir los mecanismos de defensa temprana de la planta, en específico se suprime el “estallido oxidativo”, lo cual es indispensable para la virulencia de este grupo de hongos (Doehlemann *et al.* 2009). Algunas de las proteínas efectoras pueden ser reconocidas mediante los receptores codificados por los genes R de las plantas, lo que desencadena una respuesta inmunitaria. Tales receptores son considerados con una actividad de avirulencia (AVR), debido que el reconocimiento de las proteínas efectoras resulta en la pérdida de virulencia del patógeno en los hospederos vegetales que portan los receptos inmunitarios correspondientes (Petit-Houdenot y Fudal, 2017).

La hipótesis de que los hongos micorrízicos codifican proteínas efectoras que se dirigen a las proteínas

del hospedero vegetal para promover una simbiosis positiva se planteó por Marti y colaboradores (2016). Solo se han caracterizado cuatro proteínas efectoras de hongos micorrízicos mutualistas que se dirigen a las proteínas de la célula hospedera para promover la colonización al eludir la respuesta inmune desplegada por las plantas. Por ejemplo, la proteína secretada 7 (SP7, por sus siglas en inglés) del hongo micorrízico arbuscular ingresa a la célula vegetal he interrumpe la señalización de defensa al secuestrar la respuesta mediada por proteínas de la planta, denominada factor 19 de respuesta a etileno (Ethylene Response Factor 19) (Kloppholz *et al.* 2011). El hongo ectomicorrízico *Laccaria bicolor* secreta la proteína LbMiSSP7 (Mycorrhizal induced small secreted protein) que interactúa con una proteína correceptora de la planta encargada de modular la respuesta de defensa mediada por jasmonato (Plett *et al.* 2011a).

5. Hongos benéficos y su interacción con las plantas.

En 1904 se describió el término “rizosfera”, como el área alrededor de la raíz de la planta que está habitada por una población única de organismos. La mayoría de los estudios se han centrado en los microorganismos bacterianos, lo que aún sigue contrastando con los enfocados a hongos y oomicetos, porque siguen siendo escasos.

Los hongos asociados a las plantas están presentes en tres regiones: la región epífita, la región endófito y la rizosfera. La región epífita de las plantas son las partes aéreas, como las hojas, en esta asociación el hongo la protege al hospedero de los patógenos. La región endófito se refiere a las partes internas de la planta, como las semillas, tallo y raíces. Los hongos que colonizan estas regiones no actúan como patógenos y establecen una interacción simbiótica. Finalmente, la rizosfera es la zona en contacto directo de la planta con el suelo y esta región es influenciada directamente por la raíz (Devi *et al.* 2023; García-Latorre *et al.* 2023).

Entre los microorganismos que residen en la rizosfera se encuentran los hongos promotores de crecimiento vegetal (PGPF). Estos hongos son muy cotizados en el sector agrícola por su potencial benéfico como biofertilizantes y agentes de control biológico.

El mecanismo empleado por estos hongos para promover el crecimiento vegetal son mecanismos directos, como la solubilización de macronutrientes como el fósforo, el potasio y el zinc del suelo. Así como la utilización de mecanismos indirectos, como la producción de precursores de auxinas, citoquininas, etileno, ácido abscísico y sideróforos que son reguladores del crecimiento vegetal. Además, los hongos para ejercer su actividad de agentes de control biológico emplean mecanismos antifúngicos o antagonísticos hacia otros hongos, así como provocar la activación del sistema de defensa de la planta. Los géneros de hongos PGPF más conocidos son

Aspergillus, *Fusarium*, *Trichoderma*, *Penicillium* y *Phoma*. El más estudiado por promover el crecimiento vegetal y ser un agente de control biológico o biocontrol es el género *Trichoderma* (Tyśkiewicz *et al.* 2022).

La importancia de conocer los beneficios que estos hongos aportan se debe a la dependencia de los agroquímicos, como los fertilizantes y pesticidas, en la producción agrícola y una de sus consecuencias directas de su uso a gran escala es el aumento en los costos de la cadena productiva y su efecto en el poder adquisitivo de la canasta básica. Si bien estos son eficientes en reducir pérdidas del cultivo debido a deficiencia de nutrientes, maleza, enfermedades e insectos plaga, el uso excesivo de estos agroquímicos está afectando negativamente al ambiente, aunado a efectos nocivos a la salud humana y animal. Por ejemplo, se ha determinado efectos perjudiciales en especies no objetivo (abejas y otros insectos polinizadores, hongos y bacterias benéficas) lo que afecta directamente a la diversidad natural de las especies nativas en el campo.

Además, su uso constante ha afectado negativamente la calidad del suelo y el agua y las plagas están desarrollando resistencia por su manejo inadecuado. Ante estos peligros, se busca una agricultura sustentable y amigable con el ambiente y la salud humana, en donde los hongos y otros microorganismos puedan ser la base para lograr este objetivo, realizando más estudios con los que podamos acrecentar su comprensión y elaborar estrategias de manejo eficiente e integral (Tudi *et al.* 2021).

6. Hongos y oomicetos como agentes patógenos en la interacción con la planta.

La seguridad alimentaria se ve amenazada por las enfermedades infecciosas emergentes causadas por hongos y oomicetos. En la historia evolutiva de plantas y patógenos fúngicos se



han establecido relaciones altamente especializadas y extremadamente complejas, creando un patrón de selección mutua. Hechos de relevancia histórica han sido grabados debido a patógenos de plantas, un ejemplo es la hambruna irlandesa representada en la escultura en Dublín "Famine".

El patógeno del tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) se introdujo en Europa en el año 1840, provocando la devastación alimentaria de la población irlandesa, ya que los cultivos de la papa resultaron ser altamente susceptibles a este patógeno. Este acontecimiento es conocido como la gran hambruna irlandesa que orillo a la población de este país a migrar en masa a Estados Unidos de América y a otras partes del mundo.

Se ha determinado, mediante la caracterización y análisis filogenéticos de los marcadores moleculares de *P. infestans*, que este patógeno tiene su origen en México (Goss *et al.* 2014). Como hecho

sobresaliente, en su centro de origen los cultivos no sufrieron pérdidas en su producción, ni provocó hambruna, la razón fue que en esta región las especies nativas de papa que contienen elementos en su genoma, los genes R que codifican para los receptores (AVR) que reconocen las proteínas efectoras de este patógeno y, a través de este reconocimiento a nivel molecular las plantas adquieren una resistencia natural al patógeno.

Actualmente estos patógenos afectan a cultivos como el chile *Capsicum* (Figura 2), chayote *Sechium edule* y otras hortalizas.



Figura 2. Enfermedad causada por *Phytophthora capsici* en chile. La numeración de 0-4 indica el grado de la severidad de los síntomas causados por el oomiceto en chile; del 0-1 sin síntomas visibles, 2 necrosis en el área de inoculación, 3 necrosis y marchitez en el área de inoculación, 4 necrosis en tejido sistémico.

Otro hecho histórico moldeado por patógenos vegetales es el del cultivo de plátano. La enfermedad más destructiva del plátano es causada por un hongo conocido como *Fusarium oxysporum* f. sp. Cubense, el cual puede estar en el suelo por mucho tiempo hasta que sea cultivado su hospedero preferencial. Reportado por primera vez en Australia, actualmente está disperso en todo el mundo. Provoca pérdidas económicas que orillaron a emplear variedad de plátano Cavendish, el cual era resistente al patógeno, expandiéndose como monocultivo. Lo cual provocó una disminución en la investigación del patógeno *Fusarium oxysporum* f. sp. Cubense. Actualmente, se reporta la aparición de una nueva raza de *Fusarium oxysporum* f. sp. Cubense, a la que la variedad Cavendish es susceptible junto con otros cultivares, esto ha generado una preocupación mundial promoviendo la investigación de esa interacción planta-patógeno como de alta prioridad (Ditta *et al.* 2018).

Los impactos de las enfermedades fúngicas en los cultivos tienen consecuencias directas en la economía, la alimentación y en la salud pública. Actualmente, se han estudiado y caracterizado infecciones persistentes de importancia agrícola ocasionadas por hongos y oomicetos, tales como la de *Magnaporthe oryzae* en el arroz, *Puccinia graminis* en el trigo, *Ustilago maydis* en el maíz, *Phytophthora infestans* en la papa y *Phakospora pachyrizi* en la soya; por mencionar las de mayor importancia. Cabe destacar que estas interacciones pueden variar regionalmente, lo que representan una amenaza constante y creciente para la seguridad alimentaria a nivel mundial.

7.- Aplicaciones de las interacciones planta - hongos y oomicetos.

La caracterización de las interacciones bióticas de las plantas con otros microorganismos ha permitido reconocer y clasificarlas en neutras, mutualistas, simbióticas y patogénicas. Además, se ha podido establecer la importancia de los organismos que pueden ser antagónicos a otros organismos, en especial a los organismos patógenos. A estos organismos se le ha clasificado como biocontroles por su efectividad para restringir o eliminar la propagación de organismos patógenos. De lo cual pueden derivarse los productos de tipo biocontrol. Estos productos biológicos para tener éxito a nivel comercial, deben satisfacer las necesidades de los agricultores en varios aspectos, como otorgar resultados positivos repetidos, precios accesibles, fácil uso y larga vida útil (Dutta *et al.* 2022).

El género *Trichoderma* ha sido estudiado y caracterizado desde 1970 con éxito en el manejo de enfermedades contra patógenos fúngicos y oomicetos. Adicionalmente, los factores estimulantes como la síntesis de fitohormonas y fitorreguladores inducidos por *Trichoderma* en las plantas favorecen la promoción de crecimiento, mejora en la estructura y funcionamiento de las raíces, incrementa la tasa germinación y la viabilidad de las semillas, así como un incremento en la eficiencia fotosintética,

floración, rendimiento y calidad de la producción. Actualmente en el mercado agrícola existen una gran cantidad de biofungicidas basadas en *Trichoderma*, representando el 60 % del mercado de hongos utilizados como agentes de control biológico en todo el mundo y se registran nuevos productos de manera constante. La aplicación de *Trichoderma* como agente de control biológico o biocontrol en campo ha enfrentado limitaciones en su eficacia contra los microorganismos a los que va dirigido, ya que las condiciones ambientales como la humedad del suelo y ambiental, la biodisponibilidad de nutrientes, la acidez o alcalinidad del suelo, así como el uso previo de agroquímicos afectan negativamente su actividad biológica (Woo *et al.* 2023). Lo que supone la necesidad de seguir buscando nuevos agentes de control biológico para que puedan ser empleados en conjunto o de manera secuencial con *Trichoderma*.



8. Conclusión y perspectivas futuras.

Los micobiosomas son parte integral de la biodiversidad de nuestro planeta Tierra y desempeñan un papel clave en los suelos. Los hongos del suelo desempeñan un papel crucial en el ambiente e influyen directamente en las actividades biológicas de las plantas como simbioses, patógenos o mediante la degradación de la materia orgánica. Sin embargo, las actividades humanas han provocado una alteración sustancial de los suelos afectando la diversidad de microorganismos que la habitan, incluyendo el micobiosoma. Este desequilibrio aumenta la emergencia de miembros con actividad patógena del micobiosoma e impide que microorganismos benéficos lleven a cabo sus funciones biológicas en el ambiente. Para hacer frente a los desafíos de la demanda de alimentos y el cuidado del ambiente, los estudios sobre micobiosomas relacionados con la patología y la protección de las plantas deben ser constantes e implementar enfoques multidisciplinarios, como el uso de herramientas tradicionales de aislamiento, cultivo y propagación, caracterización a nivel molecular de las interacciones y la bioinformática para la caracterización de los genomas y la dinámica ecológica del micobiosoma.

Referencias

- Begum, N., C., Qin M.A. Ahanger, S. Raza, M. I. Khan, M. Ashraf, ... & L. Zhang. 2019. *Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance*. *Frontiers in plant science*, (10), 1068.
- Blakney A. J., L.D. Bainard, M. St-Arnaud, & M. Hijri. 2023. *Soil chemistry and soil history significantly structure oomycete communities in Brassicaceae crop rotations*. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(1), e01314-22.
- Devi R., R. Verma, R. Dhalaria, A. Kumar, D. Kumar, S. Puri, ... & K. Kuca. 2023. *A systematic review on endophytic fungi and its role in the commercial applications*. *Planta*, 257(4), 70.
- Dita, M., M. Barquero, D. Heck, E. S. Mizubuti, & C. P. Staver. 2018. *Fusarium wilt of banana: current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management*. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1468.
- Dodds, P. N., & J.P. Rathjen. 2010. *Plant immunity: towards an integrated view of plant-pathogen interactions*. *Nature Reviews Genetics*, 11(8), 539-548.
- Doehlemann, G., K. Van Der Linde, D. Aßmann, D. Schwammbach, A. Hof, A. Mohanty... & R. Kahmann. 2009. *Pep1, a secreted effector protein of Ustilago maydis, is required for successful invasion of plant cells*. *PLoS pathogens*, 5(2), e1000290.

- Dutta P., L. Deb & A. K. Pandey. 2022. *Trichoderma-from lab bench to field application: Looking back over 50 years*. *Frontiers in Agronomy*, 4, 932839.
- Frąc, M., S. E. Hannula, M. Bełka, & M. Jędrzycka. 2018. *Fungal biodiversity and their role in soil health*. *Frontiers in Microbiology*, 9: 707.
- Frąc, M., E. S. Hannula, M. Bełka, J. F. Salles, & M. Jedryczka. 2022. *Soil mycobiome in sustainable agriculture*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1033824.
- García-Latorre, C., S. Rodrigo, Y. Marin-Felix, M. Stadler, & O. Santamaria. 2023. *Plant-growth promoting activity of three fungal endophytes isolated from plants living in dehesas and their effect on Lolium multiflorum*. *Scientific Reports*, 13(1), 7354.
- Goss, E. M., J.F. Tabima, D. E. Cooke, S. Restrepo, W. E. Fry, G. A. Forbes, ... & N.J. Grünwald. 2014. *The Irish potato famine pathogen Phytophthora infestans originated in central Mexico rather than the Andes*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(24), 8791-8796.
- Hane, J. K., J.P. Anderson, A. H. Williams, J. Sperschneider, & K. B. Singh. 2014. *Genome sequencing and comparative genomics of the broad host-range pathogen Rhizoctonia solani AG8*. *PLoS genetics*, 10(5), e1004281.
- Ho, H. H. 2018. *The taxonomy and biology of Phytophthora and Pythium*. *Journal of Bacteriology and Mycology*. 6, 40-45.
- Hu L., Z. Wu, C. Robert, X. Ouyang, T. Zust, A. Mestrot, J. Xu, M. Erb. 2021. *Soil chemistry determines whether defensive plant secondary metabolites promote or suppress herbivore growth*. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A* 118: e2109602118.
- Kawasaki A, P.G.Dennis, C. Forstner, A.K.H. Raghavendra, U. Mathesius, A.E. Richardson, E. Delhaize, M. Gilliam, M. Watt, P. R. Ryan. 2021. *Manipulating exudate composition from root apices shapes the microbiome throughout the root system*. *Plant Physiology* 187:2279–2295.
- Kloppholz, S., H. Kuhn, & N. Requena. 2011. *A secreted fungal effector of Glomus intraradices promotes symbiotic biotrophy*. *Current Biology*, 21(14), 1204-1209.
- Klosterman, S. J., Z. K. Atallah, G. E. Vallad, & K. V. Subbarao. 2009. *Diversity, pathogenicity, and management of Verticillium species*. *Annual review of phytopathology*, 47, 39-62.
- Lakshmanan, V., P. Ray, & K. D. Craven. 2017. *Toward a Resilient, Functional Microbiome: Drought Tolerance-Alleviating Microbes for Sustainable Agriculture*. *Plant Stress Tolerance* 163, 69–84.
- Lucke, M., M. G. Correa, & A. Levy. 2020. *The role of secretion systems, effectors, and secondary metabolites of beneficial rhizobacteria in interactions with plants and microbes*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 589416.



- Maciá-Vicente, J. G., B. Nam, & M. Thines. 2020. *Root filtering, rather than host identity or age, determines the composition of root-associated fungi and oomycetes in three naturally co-occurring Brassicaceae*. *Soil Biology and Biochemistry*, 146, 107806.
- Matari, N.H., J. E. Blair. 2014. *A multilocus timescale for oomycete evolution estimated under three distinct molecular clock models*. *BMC Ecology and Evolution*. 14, 101.
- Martin, F., A. Kohler, C. Murat, C. Veneault-Fourrey, & D. S. Hibbett. 2016. *Unearthing the roots of ectomycorrhizal symbioses*. *Nature Reviews Microbiology*, 14(12), 760-773.
- Michielse, C. B., & M. Rep. 2009. *Pathogen profile update: Fusarium oxysporum*. *Molecular plant pathology*, 10(3), 311.
- Odelade KA, & O.O. Babalola. 2019. *Bacteria, Fungi and Archaea Domains in Rhizospheric Soil and Their Effects in Enhancing Agricultural Productivity*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 12;16(20):3873.
- Petit-Houdenot, Y., & I. Fudal. 2017. *Complex interactions between fungal avirulence genes and their corresponding plant resistance genes and consequences for disease resistance management*. *Frontiers in plant science*, 8, 1072.
- Pirozynski, K. A., & D. W. Malloch. 1975. *The origin of land plants: a matter of mycotrophism*. *Biosystems*, 6(3), 153-164.
- Plett, J. M., M. Kemppainen, S. D. Kale, A. Kohler, V. Legué, A. Brun, A ... & F. Martin. 2011. *A secreted effector protein of Laccaria bicolor is required for symbiosis development*. *Current Biology*, 21(14), 1197-1203.
- Plett, J. M., & F. Martin. 2011. *Blurred boundaries: lifestyle lessons from ectomycorrhizal fungal genomes*. *Trends in Genetics*, 27(1), 14-22.
- Ray, P., V. Lakshmanan, J. L. Labbé, & K. D. Craven. 2020. *Microbe to microbiome: a paradigm shift in the application of microorganisms for sustainable agriculture*. *Frontiers in Microbiology* 11: 622926.
- Richards, T. A., J. B. Dacks, J. M. Jenkinson, C. R. Thornton, & N. J. Talbot. 2006. *Evolution of filamentous plant pathogens: gene exchange across eukaryotic kingdoms*. *Current Biology*, 16(18), 1857-1864.
- Rovenich, H., & B. P. Thomma. 2023. *Battle of the bugs: how an oomycete pathogen shapes the microbiota of its host*. *New Phytologist*. 239: 2320–2334.
- Saraiva, M., M. E. Ściślak, Y. T. Ascurra, T. M. Ferrando, N. Zic, C. Henard, ... & V. G. Vleeshouwers. 2022. *The molecular dialog between oomycete effectors and their plant and animal hosts*. *Fungal Biology Reviews*. 43; 100289.
- Shi, J., X. Wang, & E. Wang. 2023. *Mycorrhizal symbiosis in plant growth and stress adaptation: From genes to ecosystems*. *Annual Review of Plant Biology*, 74, 569-607.

- Stukenbrock, E. H., & B. A. McDonald. 2008. *The origins of plant pathogens in agro-ecosystems*. Annual Reviews Phytopathology, 46, 75-100.
- Tedersoo, L., M. Bahram, S. Põlme, U. Kõljalg, N. S. Yorou, R. Wijesundera, ... & K. Abarenkov. 2014. *Global diversity and geography of soil fungi*. Science, 346(6213), 1256688.
- Tedersoo, L., V. Mikryukov, A. Zizka, M. Bahram, N. Hagh-Doust, N., Anslan, S., ... & K. Abarenkov. 2022. *Global patterns in endemism and vulnerability of soil fungi*. Global Change Biology, 28(22), 6696-6710.
- Trivedi, P., J. E. Leach, S. T. Tringe, T. Sa, & B. K. Singh. 2020. *Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health*. Nature Reviews Microbiology, 18(11), 607-621.
- Tudi, M., H. Daniel Ruan, L. Wang, J. Lyu, R. Sadler, D. Connell, ... & D. T. Phung. 2021. *Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(3), 1112.
- Tyśkiewicz, R., A. Nowak, E. Ozimek, & J. Jaroszuk-Ścisł. 2022. *Trichoderma: The current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth*. International Journal of Molecular Sciences, 23(4), 2329.
- Vlot, A. C., J. H. Sales, M. Lenk, K. Bauer, A. Brambilla, A. Sommer, ... & S. Nayem. 2021. *Systemic propagation of immunity in plants*. New Phytologist, 229(3), 1234-1250.
- Woo, S. L., R. Hermosa, M. Lorito, & E. Monte. 2023. *Trichoderma: A multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture*. Nature Reviews Microbiology, 21(5), 312-326.
- Zhang, C., Y. Zhang, Z. Ding, & Y. Bai. 2019. *Contribution of microbial inter-kingdom balance to plant health*. Molecular Plant, 12(2), 148-149.

Cita

Caamal-Chan M.G., A. Loera-Muro, A. Barraza, L.G. Hernández Montiel. Los hongos y oomicetos, habitantes naturales del suelo: ¿Amigos o enemigos de las plantas?. **Recursos Naturales y Sociedad, 2024. Vol. 10 (2): 89-105.** <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.02.0008>

Sometido: 25 de abril de 2024

Aceptado: 20 de septiembre de 2024

Editor asociado: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández