

Relevancia de los Holobiontes en los Ecosistemas: El Caso de los Hongos Endófitos Asociados a las Orquídeas

C.H. Moya Treviño¹, M.A. Gómez Govea², D.E. Aguirre Cavazos¹, M.J. Ek Ramos^{1*}

¹Unidad de Formulación de Biológicos, Departamento de Microbiología e Inmunología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.

²Laboratorio de Biología de la Conservación y Desarrollo Sostenible. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.

*Autor para correspondencia: maria.ekramos@uanl.edu.mx

Resumen

La familia Orchidaceae es una de las más diversas del reino vegetal, con más de 25,000 especies descritas y al menos 100,000 híbridos registrados. Su valor ornamental, así como su complejidad morfológica y fisiológica, las han convertido en modelos de interés científico y económico. Una característica central de estas plantas es su capacidad para establecer interacciones simbióticas especializadas con organismos como insectos polinizadores, hongos micorrízicos y, de manera creciente reconocida, microorganismos endófitos. Los endófitos habitan los tejidos internos de las plantas sin causar enfermedad aparente y se han asociado a beneficios como el crecimiento vegetal, la tolerancia al estrés y la defensa contra patógenos. En el caso de las orquídeas, tradicionalmente se les vinculó con la germinación, debido a la dependencia de hongos micorrízicos en sus primeras etapas. Sin embargo, estudios recientes han revelado comunidades endofíticas más diversas que incluyen bacterias y hongos no micorrízicos, distribuidos en diferentes tejidos de la planta. En el contexto del cultivo *in vitro*, utilizado ampliamente para la propagación clonal de orquídeas híbridas, la presencia de endófitos ha cobrado un interés particular. Estos microorganismos pueden persistir en los explantes aun después de los protocolos de desinfección, lo que evidencia su colonización sistémica y plantea preguntas sobre su papel funcional en condiciones controladas. En lugar de consi-

derarse contaminantes, se reconoce cada vez más que forman parte del microbioma inherente de la planta, incluso en ambientes artificiales. Las orquídeas híbridas propagadas *in vitro* representan un modelo atractivo para estudiar estas interacciones, pues combinan la complejidad genética derivada del mejoramiento con las condiciones uniformes del cultivo controlado. Esta combinación favorece la configuración de microbiotas particulares, cuya caracterización puede aportar información valiosa sobre la dinámica simbiótica en sistemas vegetales de alto valor comercial. Así, el análisis de los endófitos asociados a orquídeas híbridas no solo amplía la comprensión de su ecología microbiana, sino que también abre la posibilidad de explorar aplicaciones biotecnológicas relacionadas con la propagación vegetal, la sanidad del cultivo y el aprovechamiento de consorcios microbianos en la agricultura sustentable.

Palabras clave: orquídeas, hongos endófitos, simbiosis, cultivo *in vitro*, orquídeas híbridas, agricultura sustentable

Abstract

The Orchidaceae family is one of the most diverse in the plant kingdom, comprising over 25,000 described species and at least 100,000 registered hybrids. Their ornamental value, combined with their morphological and physiological complexity, has made them subjects of significant sci-

entific and economic interest. A key characteristic of these plants is their ability to form specialized symbiotic interactions with organisms such as pollinating insects, mycorrhizal fungi, and—increasingly recognized—endophytic microorganisms. Endophytes inhabit internal plant tissues without causing apparent disease and have been linked to benefits such as enhanced plant growth, stress tolerance, and defense against pathogens. In the case of orchids, these organisms were traditionally associated primarily with germination, given the plants' reliance on mycorrhizal fungi during their early developmental stages. However, recent studies have revealed more diverse endophytic communities—including bacteria and non-mycorrhizal fungi—distributed across various plant tissues. The presence of endophytes has garnered particular interest in the context of *in vitro* cultivation, a method widely used for the clonal propagation of hybrid orchids. These microorganisms can persist in explants even after disinfection protocols, demonstrating systemic colonization and raising questions regarding their functional role under controlled conditions. Rather than being viewed merely as contaminants, they are increasingly recognized as part of the plant's inherent microbiome, even in artificial environments. *In vitro* propagated hybrid orchids offer an appealing model for studying these interactions, as they combine the genetic complexity resulting from breeding programs with the uniform conditions of controlled cultivation. This combination fosters the development of distinct microbiotas, the characterization of which can provide valuable insights into symbiotic dynamics within high-value commercial plant systems. Thus, the analysis of endophytes associated with hybrid orchids not only broadens the understanding of their microbial ecology but also opens up the possibility of exploring biotechnological applications related to plant propagation, crop health, and the use of microbial consortia in sustainable agriculture.

Keywords: orchids, endophytic fungi, symbiosis, *in vitro* culture, hybrid orchids, sustainable agriculture.

El Holobionte: Concepto y evolución del término “endófito”

El término endófito se utiliza para describir a los microorganismos que colonizan de manera interna los tejidos de las plantas durante al menos una parte de su ciclo de vida. Tradicionalmente, se pensaba que

los endófitos eran principalmente hongos ascomicetos; sin embargo, estudios más recientes han demostrado que también pueden incluir bacterias, arqueas y, en algunos casos, protistas (Hardoim et al., 2015). Su característica central es que habitan los tejidos vegetales sin causar síntomas evidentes de enfermedad en condiciones normales (Sarsaiya et al., 2019).

La definición de endófito ha evolucionado con el tiempo. A principios del siglo XIX, algunos botánicos creían que las plantas eran organismos “estériles” libres de microorganismos internos, siguiendo las ideas de Pasteur sobre la esterilidad de los organismos sanos. No obstante, a finales del mismo siglo, diversos investigadores comenzaron a reportar la presencia de bacterias y hongos al interior de tejidos vegetales aparentemente sanos, lo que sentó las bases para una nueva concepción de la relación planta-microbio (Hardoim et al., 2015).

En 1991, Petrini propuso una definición ampliamente aceptada: “todos aquellos organismos que habitan en órganos de plantas y que durante algún momento de su ciclo de vida colonizan tejidos internos sin causar daño aparente a su hospedero” (Petrini, 1991, en Hardoim et al., 2015). Sin embargo, investigaciones posteriores cuestionaron esta visión al demostrar que muchos endófitos pueden actuar como patógenos latentes bajo ciertas condiciones de estrés o senescencia, lo que dificulta trazar una línea clara entre mutualismo, comensalismo y parasitismo (Rodríguez et al., 2009; Hardoim et al., 2015). Actualmente, se reconoce que la interacción planta-endófito es dinámica y puede oscilar en este espectro dependiendo de factores como el genotipo de la planta, la especie microbiana, la densidad poblacional y las condiciones ambientales (Malarvizhi et al., 2023).

Este marco conceptual se complementa con la noción del “holobionte” y el “hologenoma”, que plantean que la unidad de evolución no es únicamente el genoma de la planta, sino el conjunto formado por la

planta y su microbioma asociado. Así, los endófitos no son meros acompañantes, sino parte integral del sistema adaptativo de las plantas, contribuyendo a su supervivencia y diversificación (Hardoim et al., 2015; Rosenberg & Zilber-Rosenberg, 2018).

Importancia del estudio de los microorganismos endófitos

El estudio de los microorganismos endófitos asociados a orquídeas presenta un enorme potencial biotecnológico. Estos simbioses pueden sintetizar fitohormonas, enzimas, compuestos antimicrobianos y moléculas señalizadoras que favorecen el desarrollo vegetal o confieren resistencia a factores de estrés. Su caracterización puede conducir a la obtención de cepas con valor en biofertilización, biocontrol de fitopatógenos o producción de metabolitos secundarios de interés comercial.

A pesar de ello, muchas de estas asociaciones perma-

necen poco exploradas, particularmente en híbridos ornamentales tropicales, cuyas raíces genéticas y condiciones de propagación pueden favorecer la aparición de consorcios microbianos únicos. Identificar y estudiar estos microorganismos desde un enfoque integral puede ampliar nuestra comprensión sobre su papel ecológico, así como abrir nuevas líneas de investigación en microbiología aplicada, fitopatología y biotecnología vegetal (Figuras 1 y 2).

En el caso particular de los híbridos ornamentales, el aislamiento y caracterización de endófitos puede contribuir a: 1) Optimizar protocolos de micropropagación *in vitro*, al entender qué microorganismos persisten como colonizadores internos; 2) Identificar cepas con propiedades de biocontrol que reduzcan la incidencia de enfermedades en viveros y cultivos comerciales; 3) Explorar la producción de metabolitos secundarios con aplicaciones farmacológicas y cosméticas (Dearnaley et al., 2012).

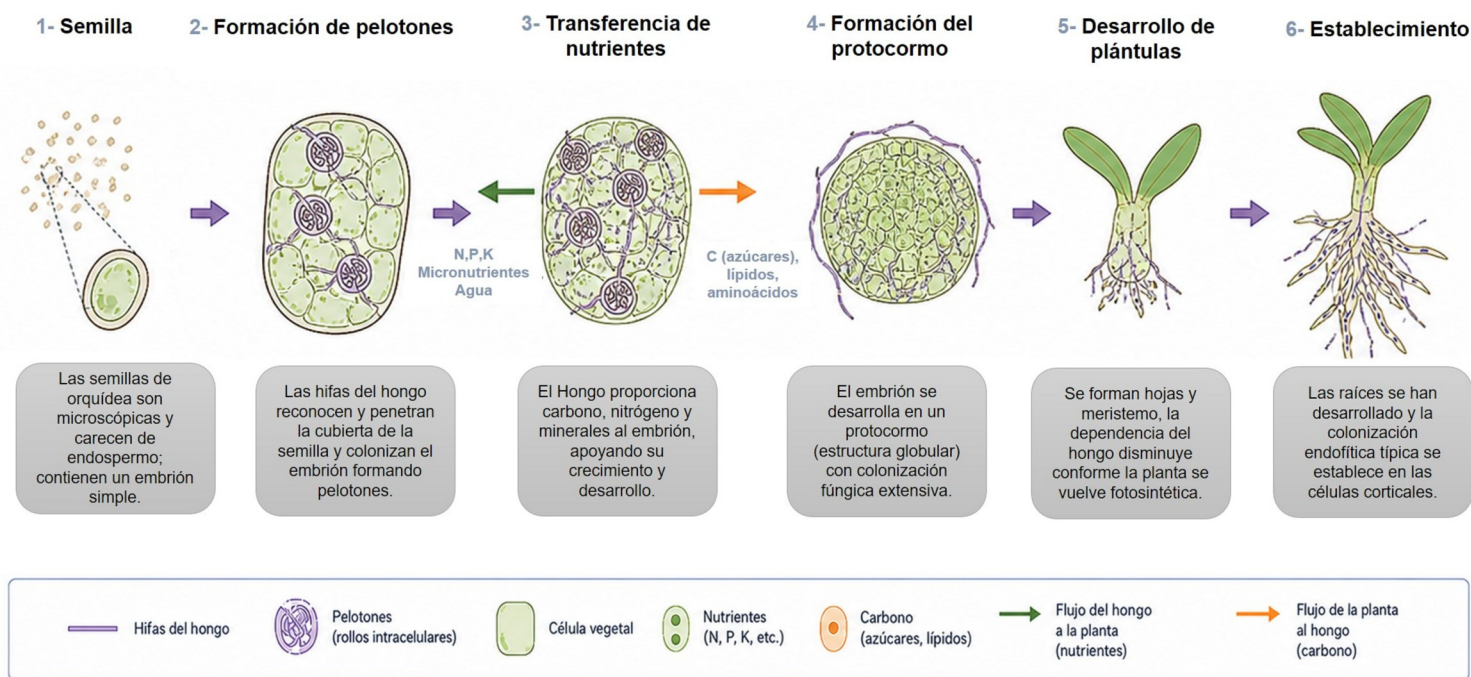
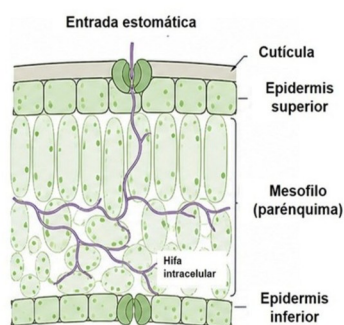


Figura 1. Germinación de semillas de orquídea mediada por hongos. Las hifas fúngicas penetran las semillas de orquídea carentes de endospermo, colonizan las células embrionarias y forman pelotones, permitiendo la transferencia de nutrientes que favorece el desarrollo del protocormo. A medida que la plántula se diferencia y se vuelve fotosintética, la dependencia del hongo disminuye y se establece la colonización típica de las raíces.

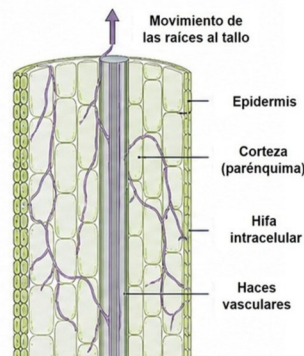
a) Colonización de la raíz (intercambio de nutrientes)



b) Colonización de la hoja (protección y tolerancia al estrés)



c) Colonización del tallo (propagación interna)



d) Resumen general

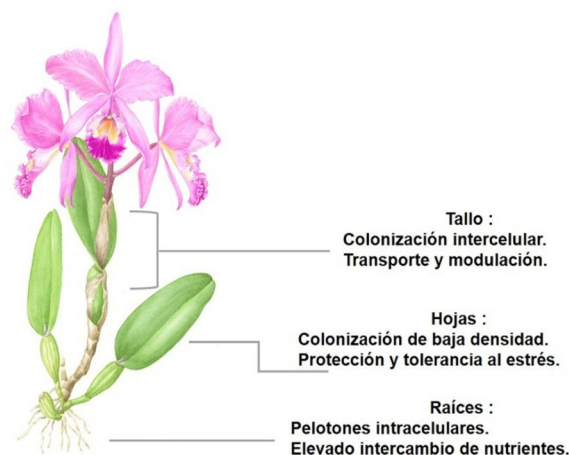


Figura 2. Colonización de hongos endófitos en tejidos de orquídeas. a) En las raíces, las hifas fúngicas penetran la epidermis y colonizan las células corticales, formando pelotones (estructuras enrolladas intracelulares). Los nutrientes se transfieren del hongo a la planta, mientras que la planta suministra compuestos de carbono al hongo. b) En las hojas, las hifas entran a través de los estomas y colonizan el mesófilo de manera intercelular, contribuyendo a la defensa de la planta y a la tolerancia al estrés abiótico. c) En los tallos, las hifas se dispersan principalmente de forma intercelular a través de tejidos del parénquima, con presencia intracelular limitada, desplazándose desde las raíces hacia las partes aéreas. d) Vista general de los roles funcionales de los endófitos en los órganos de la orquídea del género *Cattleya*.

La integración de estudios morfológicos, bioquímicos y moleculares puede permitir generar un panorama más completo de la diversidad endofítica en híbridos ornamentales. Al mismo tiempo, esto contribuirá a la comprensión de la dinámica ecológica de estas asociaciones y a su aprovechamiento en aplicaciones concretas (Hardoim et al., 2015).

Herramientas moleculares para el estudio de hongos endófitos

Los hongos presentan una gran diversidad en su forma, ecología, metabolismo y genética. Tradicionalmente, se identifican mediante características fenotípicas como las estructuras que producen esporas. Sin embargo, estos métodos morfológicos son

bastante limitados, especialmente para quienes no tienen experiencia en el trabajo con cultivos de hongos, ya que pueden resultar complicados e interpretarlos resulta difícil (Raja et al., 2017).

La identificación de hongos ha evolucionado notablemente en los últimos años, gracias al uso de herramientas moleculares, como la secuenciación de la región ITS (Internal Transcribed Spacer), considerada el “código de barras” genético de estos organismos (Schoch et al., 2012). El uso de este marcador ofrece varias ventajas claras, entre ellas una alta tasa de amplificación en todos los linajes de hongos con cebadores universales, una longitud de fragmento adecuada y un amplio repertorio de bases de datos disponibles (Sun y Guo, 2012). A diferencia de los

métodos tradicionales, basados en características morfológicas, la secuenciación de la región ITS permite identificar especies de hongos con mayor precisión, incluso las que no pueden cultivarse en el laboratorio.

Esta herramienta ofrece una manera rápida, confiable y accesible para determinar qué hongos están presentes en un ambiente específico. Además, las tecnologías de secuenciación de alto rendimiento han ampliado significativamente estas capacidades, ya que permiten analizar simultáneamente cientos o miles de muestras y generar una gran cantidad de información sobre la diversidad fúngica y su distribución en distintos ecosistemas (Lindahl et al., 2013). Por ello, la secuenciación no solo identifica quiénes están presentes, sino que también ayuda a comprender cómo se organizan y responden los microorganismos en los ecosistemas (Raja et al., 2017). Estas herramientas nos han permitido profundizar en la diversidad fúngica y en las interacciones entre plantas y microorganismos. En conjunto, la integración de estas tecnologías constituye una base esencial para el estudio y la gestión de la biodiversidad (Figura 3).

La familia Orchidaceae y la relevancia de los híbridos ornamentales. Ejemplo: Mokara

La familia Orchidaceae es una de las más diversas y fascinantes del reino vegetal. Con más de 28,000 especies descritas distribuidas en cerca de 760 géneros, constituye la familia más grande de angiospermas (Sarsaiya et al., 2019). Las orquídeas se encuentran en prácticamente todos los ecosistemas terrestres, desde selvas tropicales hasta regiones templadas, con excepción de los desiertos extremos y zonas polares (Hardoim et al., 2015). Esta amplitud ecológica está acompañada de una extraordinaria variabilidad morfológica, fisiológica y genética, lo que ha per-

mitido a estas plantas adaptarse a nichos altamente especializados (Sarsaiya et al., 2019).

Desde la perspectiva económica y ornamental, las orquídeas ocupan un lugar privilegiado dentro de la horticultura global. Se comercializan masivamente como plantas de ornato y también son objeto de micropropagación en laboratorios especializados (Malarvizhi et al., 2023). Dentro de este grupo, los híbridos intergenéricos como *Mokara* -resultado del cruce entre *Arachnis*, *Ascocentrum* y *Vanda*- poseen una gran aceptación en mercados asiáticos, europeos y americanos por sus flores vistosas, duraderas y con una amplia gama de colores (Sarsaiya et al., 2019). Sin embargo, la propagación masiva de estas plantas no está exenta de desafíos: la susceptibilidad a enfermedades, la lenta tasa de multiplicación en condiciones naturales y la necesidad de un control riguroso de contaminantes microbianos representan limitantes para la producción a gran escala (Hardoim et al., 2015).

Diversidad y funciones de los endófitos fúngicos en plantas cultivadas

Los endófitos fúngicos se encuentran prácticamente en todas las divisiones del reino vegetal, desde algas hasta angiospermas, y han demostrado ofrecer ventajas adaptativas notables a sus hospederos (Hardoim et al., 2015). En cultivos agrícolas, diversos estudios han mostrado que la presencia de endófitos incrementa la resistencia contra patógenos, insectos herbívoros y nemátodos, además de mejorar la tolerancia a factores abióticos como salinidad, sequía, metales pesados o temperaturas extremas (Malarvizhi et al., 2023).

Por ejemplo, en gramíneas como el trigo y el arroz se han identificado endófitos de los géneros *Fusarium*, *Chaetomium*, *Cladosporium* y *Penicillium*, que mejoran la resistencia a plagas y enfermedades y, al mis-

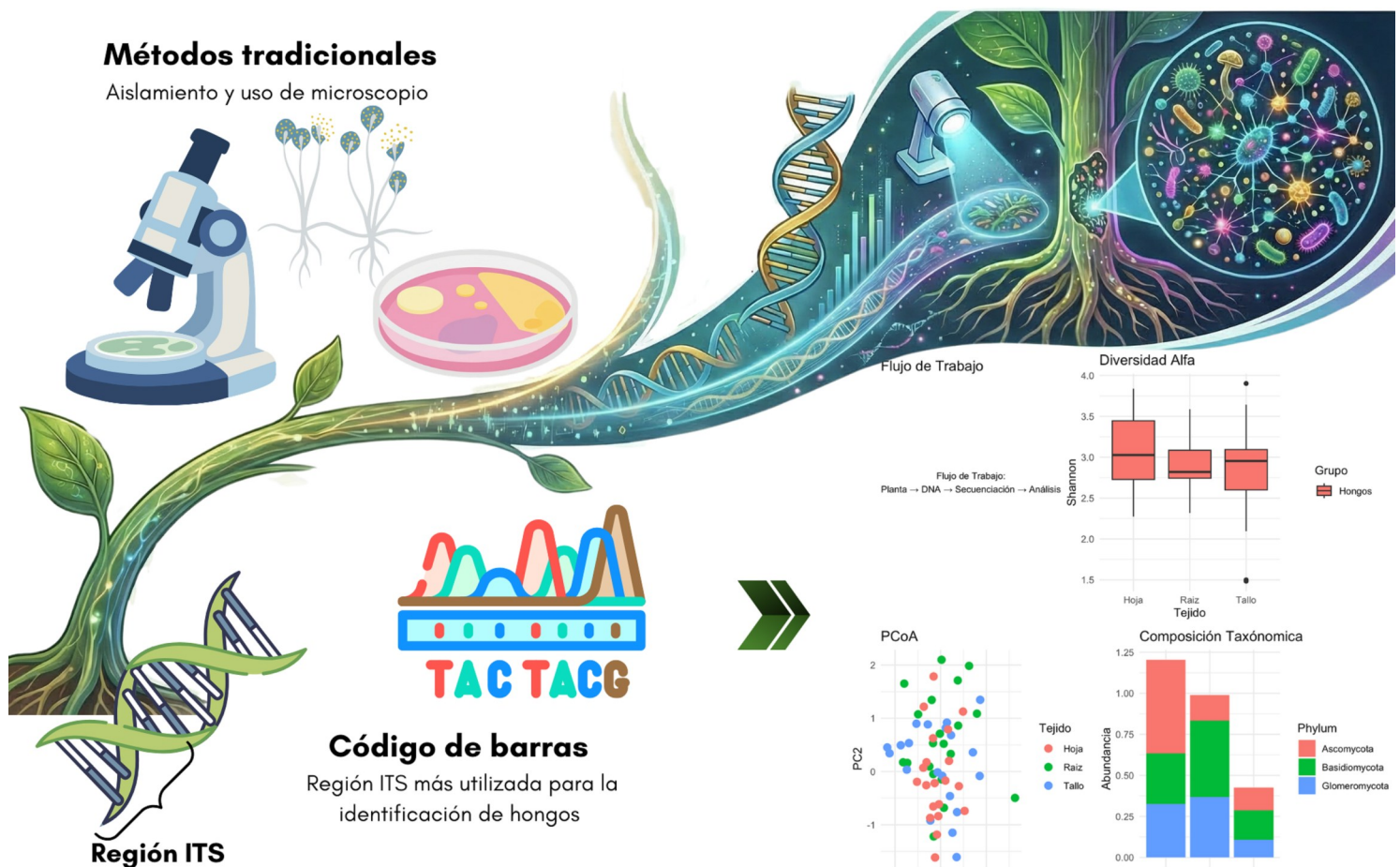


Figura 3. Comparación entre métodos tradicionales y moleculares para el estudio de hongos en plantas. Los métodos tradicionales se basan en el aislamiento en cultivo y la observación microscópica. En el enfoque molecular, el ADN se extrae de hojas, raíces o tallos y se analiza la región ITS, utilizada como código de barras para identificar hongos. Las gráficas de la derecha representan la diversidad de hongos dentro de cada tejido (índice de Shannon), las diferencias en la composición de las comunidades entre tejidos (PCoA) y la abundancia relativa de los principales grupos taxonómicos identificados.

mo tiempo, incrementan la productividad de los cultivos (Rodríguez *et al.*, 2009). En maíz y caña de azúcar, especies de *Aspergillus* y *Epicoccum* han mostrado la capacidad de inducir tolerancia a la sequía, además de producir metabolitos secundarios con efectos antimicrobianos (Malarvizhi *et al.*, 2023).

La importancia de estos hallazgos radica en que posicionan a los endófitos como una alternativa viable y sustentable frente al uso intensivo de agroquímicos. La producción de metabolitos como alcaloides, terpenoides, flavonoides y lignanos no solo protege a la planta, sino que ofrece un potencial biotecnológico enorme en áreas farmacéuticas e industriales

(Sarsaiya *et al.*, 2019).

Hongos endófitos en Orchidaceae: particularidades y retos

Las orquídeas, por su biología singular, han sido objeto de especial interés en estudios sobre endófitos. Tradicionalmente, se ha reconocido la importancia de las micorrizas en la germinación de semillas (Figura 2), ya que estas carecen de endospermo y dependen de hongos simbiosntes para obtener nutrientes durante sus primeras etapas de desarrollo (Dearnaley *et al.*, 2012). No obstante, investigaciones recientes han ampliado el panorama al demostrar

que, además de las micorrizas, existe una comunidad diversa de endófitos no micorrízicos colonizando raíces, tallos y hojas (Sarsaiya et al., 2019).

Estos hongos endofíticos de Orchidaceae (OFEs) cumplen múltiples funciones: estimulan el crecimiento, incrementan la resistencia frente a patógenos, modulan la absorción de nutrientes y favorecen la adaptación a condiciones adversas (Sarsaiya et al., 2019). Se ha documentado que géneros como *Colletotrichum*, *Alternaria* y *Annulohyphoxylon* pueden sintetizar metabolitos bioactivos con potencial farmacológico y agrícola (Chen et al., 2013; Etanke et al., 2021). Asimismo, se ha observado que la colonización endofítica puede variar entre tejidos, con algunos grupos confinados a órganos aéreos y otros a raíces, lo que sugiere patrones de especialización aún poco comprendidos (Rodríguez et al., 2009).

A pesar de estos avances, la investigación en OFEs presenta varios retos. Menos del 30% de los géneros de orquídeas han sido estudiados en relación con su microbiota endofítica, lo que deja un vasto campo inexplorado (Sarsaiya et al., 2019). Además, persiste la dificultad metodológica para diferenciar endófitos verdaderos de patógenos latentes, especialmente en condiciones de cultivo *in vitro*, donde la presencia de microorganismos suele interpretarse como contaminación (Hardoim et al., 2015). La estandarización de protocolos de desinfección y el uso combinado de técnicas de cultivo clásico con herramientas moleculares (ITS para hongos, 16S rRNA para bacterias) son estrategias clave para avanzar en este campo (Etanke et al., 2021).

Comunidad de hongos endófitos reportados en Orchidaceae

Las orquídeas mantienen comunidades endofíticas complejas y estructuralmente diversas. En su revisión sobre Orchidaceae, Sarsaiya et al. (2019) destacan

que la mayoría de los géneros estudiados albergan consorcios de hongos endófitos que participan en crecimiento, defensa y producción de metabolitos secundarios.

En raíces de la orquídea epífita *Aerides odorata*, Shamsudin et al. (2025) aislaron, entre otros, *Fusarium*, *Clonostachys* y *Trichoderma*, concluyendo que los hongos endofíticos de orquídeas incluyen tanto micorrízicos como no micorrízicos con funciones de biocontrol y promoción de crecimiento (Shamsudin et al., 2025). De manera similar, estudios en *Dendrobium longicornu* han revelado comunidades dominadas por *Penicillium*, *Fusarium*, *Coniochaeta*, *Alternaria* y *Cladosporium* (Shah et al., 2022).

Yang et al. (2023) caracterizaron una cepa endofítica de *Cladosporium* aislada de *Sesuvium portulacastrum* y demostraron que este hongo no solo coloniza tejidos internos sin causar síntomas, sino que además promueve el crecimiento en diferentes especies de plantas mediante producción de la auxina ácido indolacético (IAA, por sus siglas en inglés) y la presencia de clústeres génicos asociados a metabolismo de nitrógeno y esteroides.

Algo análogo puede plantearse para *Penicillium* y *Talaromyces*. Condé et al. (2025) describieron nuevas especies endofíticas de *Penicillium* y *Talaromyces*, a partir de raíces de *Cattleya*, empleando una aproximación polifásica para demostrar que estos hongos están realmente adaptados al tejido radicular de orquídeas y no son simples contaminantes ambientales.

Shah et al. (2025) demostraron que extractos de cepas endofíticas de *Fusarium*, aisladas de *Dendrobium moschatum*, son capaces de estimular tanto la germinación de semillas de la orquídea hospedera, como el desarrollo de protocormos de un no hospedero, lo que indica un papel positivo en etapas tempranas del

ciclo de vida. Aunque *Fusarium* incluye numerosos patógenos de plantas, estos resultados subrayan que su papel como endófito puede ser ambivalente y contexto-dependiente.

Shah et al. (2022) mostraron que especies de *Penicillium*, *Fusarium*, *Coniochaeta*, *Alternaria* y *Cladosporium* aisladas de *D. longicornu* son capaces de colonizar raíces, formar pelotones y producir IAA, incrementando la longitud de raíz y parte aérea y mejorando la aclimatación de las plantas. Dearnaley et al. (2012) revisan la diversidad de asociaciones en Orchidaceae y señalan que, aunque la atención ha recaído históricamente en hongos tipo micorriza específicos para cada tipo de orquídea, éstas pueden asociarse con varios linajes micorrízicos diferentes, lo cual amplía el espectro de simbiontes potenciales.

Relevancia biotecnológica

Cladosporium, *Penicillium*, *Coniochaeta*, *Talaromyces*, *Fusarium* no patógeno y *Trichoderma*, han sido ampliamente documentados como promotores de crecimiento vegetal, productores de fitohormonas, solubilizadores de nutrientes o agentes de biocontrol, lo que sugiere aplicaciones directas en sistemas de cultivo *in vitro* y en vivero.

Uno de los géneros con mayor potencial es *Cladosporium*. Investigaciones recientes han demostrado que cepas endofíticas de *Cladosporium* pueden producir IAA, modular vías metabólicas relacionadas con estrés y mejorar el crecimiento en diversas plantas modelo. Yang et al. (2023), por ejemplo, reportaron que un aislamiento endofítico de *Cladosporium angulosum* promovió de manera significativa el crecimiento de raíces y tejidos aéreos en especies de *Arabidopsis* y arroz, atribuyendo dicho efecto a la producción de IAA y a la presencia de clústeres génicos asociados con metabolismo primario.

Asimismo, géneros como *Penicillium* y *Talaromyces*, también han sido identificados como endófitos adaptados a orquídeas. Condé et al. (2025) describieron nuevas especies de ambos géneros aisladas de *Cattleya*, empleando una aproximación polifásica que confirmó su capacidad para colonizar tejidos radiculares sin causar daño, lo que respalda su potencial uso como simbiontes benéficos en cultivos comerciales. Estos hongos suelen producir metabolitos secundarios y enzimas que facilitan la adquisición de nutrientes, además de contribuir a la tolerancia a estrés abiótico.

Por otra parte, el género *Coniochaeta* ha demostrado ser un endófito con propiedades destacadas en orquídeas. Shah et al. (2022) mostraron que especies de *Coniochaeta*, junto con *Penicillium* y *Cladosporium*, incrementan la formación de raíces, aumentan biomasa y mejoran el establecimiento de plántulas de *Dendrobium longicornu*, atribuible en parte a la producción de IAA y otros compuestos bioactivos.

El caso de *Fusarium* es especialmente relevante, dada su dualidad ecológica: algunas especies son patógenas mientras que otras actúan como endófitos mutualistas. Shah et al. (2025) demostraron que extractos de *Fusarium* endofítico pueden estimular la germinación de semillas de orquídeas y promover el desarrollo de protocormos aun en especies no hospederas, lo que resalta su potencial aplicado en fases tempranas del ciclo de vida. Esto resulta especialmente valioso para programas de micropropagación de híbridos ornamentales.

Otro género de importancia es *Trichoderma*, bien conocido por sus capacidades de biocontrol, antagonismo frente a patógenos y promoción de crecimiento. En viveros comerciales, *Trichoderma* es ampliamente utilizado para reducir enfermedades radiculares y estimular el crecimiento.

Finalmente, las levaduras basidiomicotas como *Naganishia*, *Hannaella* y *Saitozyma*, documentadas en orquídeas subtropicales y epífitas, indican un posible papel en la modulación de estrés osmótico y la protección antioxidante. Estas levaduras poseen una notable tolerancia ambiental y han sido reportadas como simbioses que mejoran la resiliencia del hospedero frente a fluctuaciones ambientales, lo cual podría ser aprovechado para mejorar la aclimatación de plantas micropropagadas.

En conjunto, la presencia de hongos productores de fitohormonas, solubilizadores de nutrientes, antagonistas de patógenos y moduladores de respuestas de estrés indica que el microbioma endofítico de orquídeas posee un valor biotecnológico considerable. Estos resultados permiten plantear la futura elaboración de consorcios microbianos específicos, diseñados para mejorar la eficiencia de la micropropagación, promover la aclimatación y reducir la dependencia de agroquímicos en la producción de híbridos ornamentales.

Conclusiones

La presencia simultánea de hongos con roles potenciales en promoción de crecimiento, tolerancia a estrés, adquisición de nutrientes, producción de metabolitos bioactivos y biocontrol refleja que la comunidad endofítica presente como un ensamblaje funcional diverso, respalda la visión de la planta como un holobionte, en el que la interacción entre hospedero y microbiota contribuye a su estabilidad y adaptación.

El hallazgo de géneros con funciones conocidas en promoción de crecimiento, como *Cladosporium*, *Coniochaeta*, *Penicillium* y *Fusarium* no patógeno, destaca el valor biotecnológico del microbioma. Es-

tos hongos podrían emplearse como inoculantes para mejorar procesos de micropropagación, germinación, desarrollo de protocormos y aclimatación, reduciendo la necesidad de reguladores de crecimiento sintéticos o agroquímicos.

Perspectivas

Una de las prioridades es el aislamiento en cultivo puro de los géneros con mayor potencial biotecnológico, tales como *Cladosporium*, *Coniochaeta*, *Penicillium*, *Fusarium* no patógeno y *Trichoderma*, de híbridos ornamentales seleccionados valiosos. Su caracterización fisiológica y metabólica permitirá evaluar propiedades específicas tales como producción de IAA, solubilización de fósforo, síntesis de compuestos antioxidantes y antagonismo frente a patógenos. Esta información será crucial para determinar su utilidad real como bioinoculantes en *Mokara* u otras orquídeas híbridas.

La coexistencia de hongos potencialmente patógenos -como *Curvularia*, *Colletotrichum* o *Epicoccum*- con hongos antagonistas como *Trichoderma*, *Purpureocillium* y *Coniochaeta*, abre la posibilidad de explorar interacciones de competencia y biocontrol. Ensayos de confrontación *in vitro* y en sustratos de cultivo permitirán identificar endófitos con propiedades protectoras que podrían disminuir el uso de fungicidas en sistemas de producción ornamental.

La integración de endófitos benéficos y micorrízicos en la producción de orquídeas puede mejorar rendimiento, calidad y tolerancia a estrés, lo que representa una estrategia sostenible para la industria ornamental. Asimismo, comprender el papel de los endófitos en híbridos comerciales puede promover programas de conservación y restauración en especies nativas de Orchidaceae.