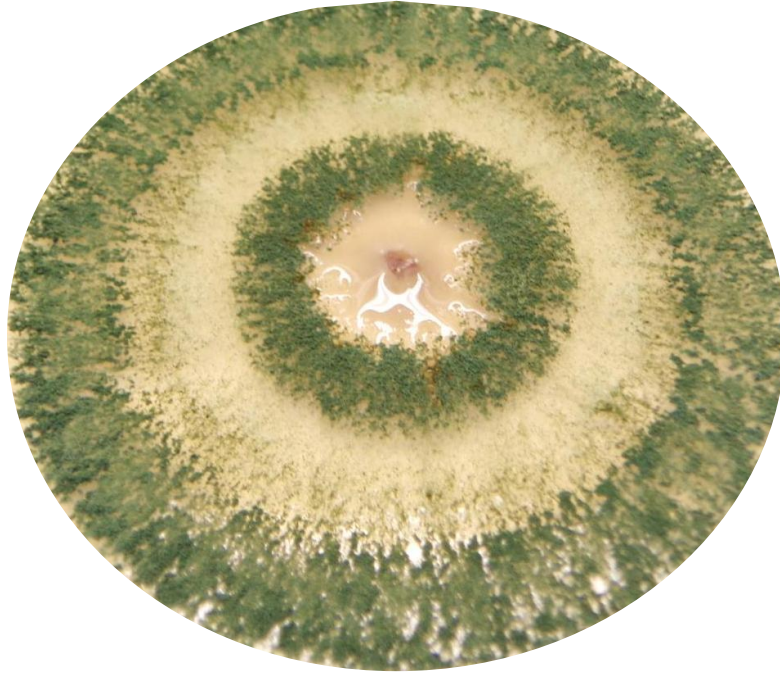


Trichoderma en Agricultura: El Aliado “Verde” para un Futuro Sostenible



Miguel Á. Lavilla¹ & Ana E. Fernández²

Prólogo

Durante décadas, la agricultura intensiva ha dependido en gran medida de insumos químicos sintéticos, como pesticidas y fertilizantes, para maximizar la producción. Si bien estos métodos han sido efectivos para satisfacer la demanda global de alimentos, su uso indiscriminado ha conllevado una serie de consecuencias negativas: degradación del suelo, contaminación del agua, pérdida de biodiversidad y riesgos para la salud humana y animal. Ante este panorama, la urgencia de adoptar alternativas más ecológicas y sostenibles se ha vuelto imperativa. Es aquí donde *Trichoderma* emerge como una solución prometedora, un aliado natural capaz de mitigar los efectos adversos de la agricultura convencional y, al mismo tiempo, potenciar los rendimientos y mejorar la calidad de las cosechas.

Este libro se adentra en la profunda y multifacética relación entre *Trichoderma* y la agricultura. Nuestro objetivo es proporcionar a agricultores, investigadores, estudiantes y a todos aquellos interesados en la sostenibilidad agrícola, un conocimiento exhaustivo y práctico sobre este extraordinario grupo de microorganismos. Exploraremos su biología, sus diversos mecanismos de acción y, lo más importante, sus aplicaciones concretas en el campo. Desde el control biológico de patógenos hasta la mejora de la absorción de nutrientes y la estimulación del crecimiento vegetal, *Trichoderma* demuestra una versatilidad asombrosa.

La agricultura moderna se enfrenta a desafíos sin precedentes: el cambio climático, la escasez de recursos hídricos, la degradación del suelo y la creciente resistencia de las plagas y enfermedades a los tratamientos convencionales. En este contexto, la adopción de estrategias biológicas y de manejo integrado se presenta como la vía más viable hacia un futuro agrícola resiliente y productivo. *Trichoderma* se alinea perfectamente con esta visión, ofreciendo una alternativa segura y eficaz que minimiza el impacto ambiental y promueve sistemas de producción más saludables y equilibrados.

A lo largo de estas páginas, desentrañaremos los secretos de cómo estos hongos microscópicos trabajan en sinergia con las plantas y el suelo. Analizaremos cómo pueden colonizar las raíces, creando una barrera protectora contra patógenos del suelo, compitiendo por nutrientes y espacio, o incluso produciendo compuestos antifúngicos. Descubriremos cómo su actividad metabólica puede solubilizar fosfatos y otros micronutrientes, poniéndolos a disposición de las plantas, y cómo pueden inducir mecanismos de defensa en la propia planta, fortaleciéndola frente a ataques bióticos y abióticos.

Este libro no se limita a la teoría. Presentaremos estudios de casos, recomendaciones prácticas para la formulación y aplicación de productos a base de *Trichoderma*, y discutiremos las mejores estrategias para su integración en programas de manejo de cultivos. Abordaremos su uso en una amplia gama de sistemas agrícolas, desde cultivos hortícolas y de granos hasta frutales y viñedos, destacando su compatibilidad con las prácticas de agricultura orgánica y ecológica.

Invitamos a nuestros lectores a embarcarse en este viaje de descubrimiento. Prepárense para conocer al "aliado verde" que está transformando la agricultura, un organismo que no solo protege, sino que también enriquece, estimula y regenera. *Trichoderma* representa una promesa de futuro: un futuro donde la productividad agrícola y la salud del planeta van de la mano, un futuro construido sobre la base de la biotecnología natural y la sabiduría de la tierra.

¹ Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Pergamino, Argentina. mllavilla@comunidad.unnoba.edu.ar (<https://orcid.org/0000-0002-7282-4696>). Autor de correspondencia.

² Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Pergamino, Argentina. aefernandez@comunidad.unnoba.edu.ar (<https://orcid.org/0009-0001-8625-6239>)

Dedicatoria
A mi hija Inés

Índice

Capítulo 1: Introducción al fascinante mundo de <i>Trichoderma</i>	6
Capítulo 2: Biología y diversidad de los hongos <i>Trichoderma</i>	8
Capítulo 3: Mecanismos de acción: cómo <i>Trichoderma</i> protege y promueve el crecimiento vegetal.....	10
Capítulo 4: <i>Trichoderma</i> como agente de control biológico: combatiendo enfermedades del suelo.....	13
Capítulo 5: El papel de <i>Trichoderma</i> en la mejora de la salud radicular y la absorción de nutrientes	16
Capítulo 6: Ecología y distribución: un análisis profundo del hábitat argentino.....	18

Capítulo 1

Introducción al Fascinante Mundo de *Trichoderma*

El suelo, esa capa aparentemente inerte y monótona que sustenta la vida vegetal, es en realidad un ecosistema vibrante y extraordinariamente complejo. Dentro de este microcosmos subterráneo, millones de organismos microscópicos trabajan en una intrincada red de interacciones, algunas beneficiosas, otras perjudiciales, pero todas cruciales para el equilibrio del ecosistema y la salud de las plantas que en él prosperan. Entre estos habitantes esenciales, un grupo de hongos se ha ganado un lugar destacado por su notable capacidad para mejorar la salud vegetal, proteger los cultivos de enfermedades y optimizar la nutrición. Nos referimos al género *Trichoderma*.

Lejos de ser un simple hongo más, *Trichoderma* representa una solución biológica multifacética, un "agente de cambio" natural con la capacidad de transformar prácticas agrícolas convencionales, a menudo insostenibles, en sistemas más eficientes, ecológicos y resilientes. La adopción de *Trichoderma* en la agricultura no es una moda pasajera, sino una respuesta bien fundamentada a la necesidad apremiante de reducir la dependencia de agroquímicos sintéticos, mitigar el impacto ambiental de la producción de alimentos y mejorar la salud general de los suelos y los cultivos.

La historia del descubrimiento y la aplicación de *Trichoderma* es un testimonio del poder de la observación científica y la innovación biotecnológica. Aunque los hongos del género *Trichoderma* han estado presentes en la naturaleza durante millones de años, su potencial como agentes beneficiosos para la agricultura comenzó a ser reconocido y explorado de manera más sistemática a mediados del siglo XX. Inicialmente, su estudio se centró en su papel como organismos de control biológico, especialmente en la lucha contra patógenos del suelo que causan enfermedades devastadoras en una amplia gama de cultivos. Sin embargo, a medida que la investigación avanzaba, se reveló una faceta mucho más amplia y compleja de sus actividades. Hoy en día, *Trichoderma* es reconocido no solo por su capacidad antifúngica, sino también por su habilidad para promover el crecimiento vegetal, mejorar la absorción de nutrientes, inducir resistencia en las plantas y suprimir la actividad de otros patógenos, incluyendo bacterias.

El término *Trichoderma* se utiliza a menudo para englobar las especies y cepas de este género que han demostrado ser particularmente efectivas y beneficiosas en contextos agrícolas. Esta denominación subraya la relevancia aplicada de estos organismos, diferenciándolos de otras especies de *Trichoderma* que pueden tener roles ecológicos diferentes o ser patógenas en otros organismos. La diversidad dentro del género *Trichoderma* es asombrosa, con cientos de especies descritas, cada una con sus propias características genéticas, fisiológicas y ecológicas. Esta diversidad es, en sí misma, una fuente de potencial. Los científicos han dedicado esfuerzos considerables a la identificación, caracterización y selección de cepas específicas de *Trichoderma* que exhiben las propiedades más deseables para aplicaciones agrícolas, tales como una rápida colonización de las raíces, una alta eficiencia de biocontrol, una fuerte capacidad de promoción del crecimiento y una buena adaptabilidad a diversas condiciones ambientales y de cultivo.

La respuesta radica en su impresionante abanico de mecanismos de acción, que trabajan en conjunto para crear un entorno más saludable y productivo para las plantas. En primer lugar, su capacidad como agente de control biológico es primordial.

Trichoderma es un antagonista natural de muchos hongos patógenos del suelo, como *Rhizoctonia solani*, *Fusarium* spp. y *Macrophomina phaseolina* que son responsables de enfermedades tan temidas como la pudrición carbonosa y el tizón. Los mecanismos mediante los cuales *Trichoderma* ejerce este control son variados y a menudo actúan de forma sinérgica. Pueden incluir la competencia directa por nutrientes y espacio en la rizosfera, la producción de enzimas líticas (como quitinasas y glucanasas) que degradan la pared celular de los patógenos, la producción de metabolitos secundarios antifúngicos y antibacterianos (como los tricotecenos y el ácido hipoclórico), y el parasitismo directo de las hifas de los patógenos (un proceso conocido como micoparasitismo).

Pero el papel de *Trichoderma* va mucho más allá de la simple supresión de patógenos. Otro de sus atributos más valiosos es su capacidad para actuar como promotor del crecimiento vegetal (PGPB, por sus siglas en inglés, *Plant Growth-Promoting Bacteria and Fungi* su traducción Bacterias y hongos promotores del crecimiento vegetal). Una vez colonizada la zona radicular de una planta, *Trichoderma* puede estimular su desarrollo de diversas maneras. Puede mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes, por ejemplo, al solubilizar compuestos de fósforo y potasio que de otro modo serían inaccesibles para la planta. También puede aumentar la producción de hormonas de crecimiento vegetal, como las auxinas, que promueven la elongación de las raíces y el desarrollo general de la planta. La colonización de la raíz por *Trichoderma* puede llevar a un sistema radicular más denso y extenso, lo que a su vez mejora la capacidad de la planta para absorber agua y nutrientes, y el ancla mejor en el suelo.

Además, *Trichoderma* puede inducir en las plantas mecanismos de defensa sistémicos, un fenómeno conocido como "inducción de resistencia sistémica" (ISR). Esto significa que, al interactuar con las raíces, *Trichoderma* puede "activar" las defensas naturales de la planta, haciéndola más resistente no solo a patógenos fúngicos y bacterianos, sino también, en algunos casos, a plagas de insectos. Esta inducción de resistencia es un mecanismo de defensa no específico, lo que significa que la planta se vuelve más resistente a una amplia gama de amenazas. La planta no es solo protegida de manera pasiva por la presencia del hongo, sino que se prepara activamente para defenderse.

En el contexto de una agricultura que busca la sostenibilidad, la adopción de *Trichoderma* se presenta como una estrategia inteligente y poderosa. Permite reducir la dependencia de fungicidas y otros pesticidas químicos, lo que se traduce en menores costos de producción, menor riesgo de contaminación ambiental, menor exposición de los trabajadores agrícolas a sustancias tóxicas y, en última instancia, en la producción de alimentos más seguros y saludables. Además, al mejorar la salud del suelo y la eficiencia en el uso de nutrientes, *Trichoderma* contribuye a la regeneración de los ecosistemas agrícolas, promoviendo la biodiversidad del suelo y mejorando su estructura y fertilidad a largo plazo. Es un componente clave en la transición hacia modelos de agricultura orgánica, ecológica y de precisión.

A lo largo de los próximos capítulos, nos sumergiremos en la biología detallada de estos fascinantes hongos, exploraremos en profundidad los diversos mecanismos a través de los cuales ejercen sus efectos beneficiosos, y desglosaremos las aplicaciones prácticas y las estrategias de manejo más efectivas. Analizaremos su uso en una variedad de cultivos, desde los básicos de granos hasta las delicadas frutas y hortalizas, y discutiremos los desafíos y las oportunidades que presenta su implementación a gran escala. El objetivo final es empoderar a nuestros lectores con el conocimiento y las herramientas necesarias para aprovechar al máximo el potencial de *Trichoderma*, un verdadero "aliado verde" para una agricultura más productiva, resiliente y sostenible.

Capítulo 2

Biología y Diversidad de los Hongos *Trichoderma*

El género *Trichoderma* pertenece al filo Ascomycota, una vasta y diversa división del reino Fungi que incluye a organismos con esporas sexuales producidas dentro de una estructura en forma de saco llamada asca.

Dominio: Eukaryota

Reino: Fungi

División: Ascomycota

Subdivisión: *Pezizomycotina*

Clase: *Sordariomycetes*

Orden: *Hypocreales*

Familia: *Hypocreaceae*

Género: *Trichoderma*

Dentro de los Ascomycota, *Trichoderma* se clasifica en el orden *Hypocreales*, una familia que alberga una gran variedad de hongos, muchos de los cuales son conocidos por sus interacciones ecológicas, incluyendo patogenicidad, simbiosis y antagonismo. La característica distintiva de *Trichoderma* es su modo de reproducción asexual, que produce esporas verdes (conidios) en esporangios ramificados, de ahí su nombre, que proviene del griego "trichos" (pelo) y "derma" (piel), en referencia a su aspecto algodonoso o peludo.

La morfología de los hongos *Trichoderma* es típicamente filamentosa, caracterizada por hifas septadas. En cultivo, forman colonias que varían en color desde el blanco hasta el verde intenso (Figura 1), siendo este último el color característico de sus conidios (entre 3–5 μ de largo y 2–4 μ de ancho). Las estructuras reproductivas asexuales, los conidióforos, son altamente ramificados y dan lugar a fiálides, células especializadas que producen los conidios en cadenas.

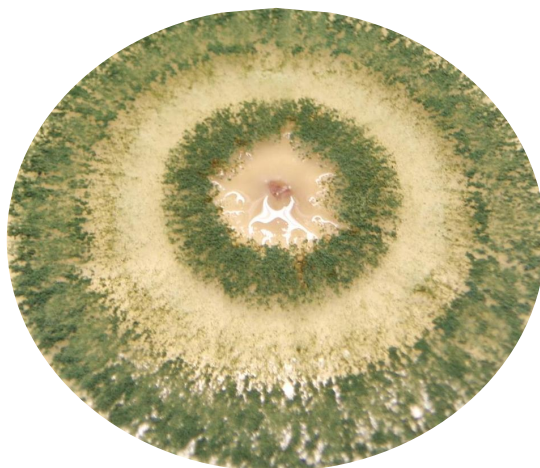


Figura 1. Micelio de *Trichoderma* spp.

Los conidios suelen ser esféricos u ovoides y de color verde, lo que les confiere el aspecto distintivo del género. En cuanto a la reproducción sexual, muchas especies de *Trichoderma* producen cleistotecios (100 y 500 micrómetros), que son cuerpos fructíferos cerrados que contienen las ascas. Sin embargo, en muchas aplicaciones prácticas y en el medio natural, la reproducción asexual es la más predominante. La capacidad de producir esporas en grandes cantidades y su resistencia a condiciones ambientales adversas (como la desecación) contribuyen a su amplia distribución y éxito ecológico.

La diversidad dentro del género *Trichoderma* es notable y ha sido objeto de intensa investigación taxonómica y filogenética. Tradicionalmente, la identificación de especies se basaba en características morfológicas y culturales, pero con el advenimiento de las técnicas de biología molecular, especialmente el análisis de secuencias de ADN (como el gen del ADN ribosomal 18S, ITS (GenBank: PX493488.1) y el factor de elongación 1-alfa), se ha logrado una clasificación más precisa y una mejor comprensión de las relaciones evolutivas entre las diferentes especies. Actualmente, se reconocen cientos de especies de *Trichoderma*, y este número sigue creciendo a medida que se exploran nuevos ambientes y se aplican técnicas moleculares más avanzadas.

Algunas de las especies de *Trichoderma* más estudiadas y de mayor relevancia agrícola incluyen:

Trichoderma harzianum: Probablemente la especie más conocida y ampliamente utilizada en agricultura. Es reconocida por su eficacia en el control de una amplia gama de patógenos fúngicos del suelo y foliares, y por su capacidad para promover el crecimiento vegetal. Se encuentra comúnmente en suelos y compost.

Trichoderma viride: Otra especie muy común, con propiedades similares a *T. harzianum* en términos de biocontrol y promoción del crecimiento. Su nombre se refiere al color verdoso de sus conidios.

Trichoderma asperellum: Conocida por su rápida colonización de raíces y su alta capacidad de biocontrol. A menudo se utiliza en formulaciones para la protección de semillas y plantas jóvenes.

Trichoderma koningii: Conocida por su producción de enzimas y metabolitos secundarios con actividad biocontroladora.

La investigación filogenética ha revelado que lo que antes se consideraba una sola especie puede, de hecho, agrupar varias especies distintas con diferentes propiedades. Por ejemplo, el complejo *T. harzianum* ha sido objeto de mucha reclasificación. Esta complejidad en la taxonomía subraya la importancia de utilizar métodos moleculares para una identificación precisa de las cepas utilizadas en aplicaciones comerciales y de investigación

Además de las características morfológicas y moleculares, la diversidad de *Trichoderma* también se manifiesta en su genoma. Los genomas de *Trichoderma* son a menudo relativamente grandes y contienen un repertorio significativo de genes para la producción de enzimas hidrolíticas, metabolitos secundarios y toxinas. Estos genes son cruciales para sus funciones de biocontrol y su adaptación a diversos ambientes. La ingeniería genética y la genómica comparativa están jugando un papel cada vez más importante en la comprensión de los mecanismos moleculares que subyacen a la eficacia de *Trichoderma* y en la identificación de cepas con características mejoradas.

La ecología de *Trichoderma* en el suelo es otro aspecto fascinante. Su capacidad para colonizar la rizosfera (la zona del suelo inmediatamente adyacente a las raíces de las plantas) es fundamental para su eficacia. La rizosfera es un ambiente rico en nutrientes y exudados radiculares, lo que la convierte en un hábitat atractivo para muchos microorganismos. *Trichoderma* ha desarrollado estrategias eficientes para competir por este espacio y los recursos disponibles. Su rápido crecimiento micelial, su capacidad para producir esporas resistentes y su producción de enzimas extracelulares le confieren ventajas competitivas. La interacción con las plantas es a menudo simbiótica; aunque *Trichoderma* puede ser un antagonista de patógenos, muchas cepas beneficiosas establecen una relación mutuamente ventajosa con las raíces de las plantas, sin causarles daño.

Comprender la biología y la diversidad de *Trichoderma* es el primer paso para desatar su pleno potencial en la agricultura. Cada cepa es un organismo único con un conjunto específico de habilidades. La investigación continua en taxonomía, ecología y genética molecular es esencial para identificar, caracterizar y optimizar el uso de estas cepas, asegurando que se seleccionen los "campeones" adecuados para los desafíos específicos que enfrentamos en la producción de alimentos a nivel mundial.

Capítulo 3

Mecanismos de acción: cómo *Trichoderma* protege y promueve el crecimiento vegetal.

La eficacia de *Trichoderma* como herramienta agrícola no se basa en un único modo de acción. Esta versatilidad es lo que lo convierte en un agente tan poderoso y adaptable. Los mecanismos por los cuales *Trichoderma* protege las plantas y promueve su crecimiento pueden agruparse en varias categorías principales: biocontrol de patógenos, promoción directa del crecimiento vegetal e inducción de resistencia en la planta hospedera. A menudo, estos mecanismos actúan de manera sinérgica, amplificando los beneficios generales para el cultivo.

1. Biocontrol de Patógenos

El mecanismo más conocido y estudiado de *Trichoderma*. Los hongos *Trichoderma* son antagonistas naturales de una amplia gama de patógenos fúngicos y bacterianos del suelo y foliares que causan enfermedades significativas en los cultivos. Los principales mecanismos de biocontrol incluyen:

Competencia: *Trichoderma* es un colonizador muy eficiente de la rizosfera y de los sustratos de crecimiento. Compite activamente con los patógenos por nutrientes esenciales (como hierro, carbohidratos y nitrógeno) y por los sitios de adhesión en la superficie de la raíz. Dada su rápida tasa de crecimiento y su capacidad para adaptarse a la disponibilidad de nutrientes, *Trichoderma* a menudo supera a los patógenos en esta competencia, impidiendo que se establezcan y causen daño.

Micoparasitismo: Algunas especies de *Trichoderma* son capaces de parasitar directamente a otros hongos. Esto implica el reconocimiento del hongo patógeno, la formación de apresorios (estructuras de fijación) sobre las hifas del patógeno, la producción de enzimas líticas (como quitinasas, glucanasas y proteasas) que degradan la pared celular del patógeno, y la subsecuente absorción de los componentes liberados. El micoparasitismo es un mecanismo de alimentación para *Trichoderma* y una forma directa de eliminar al patógeno.

Producción de Metabolitos Secundarios Antagonistas: Los hongos *Trichoderma* producen una amplia variedad de compuestos bioactivos, incluyendo antibióticos, enzimas y otros metabolitos secundarios. Estos compuestos pueden inhibir el crecimiento de los patógenos, dañar sus membranas celulares o interferir con sus procesos metabólicos. Ejemplos incluyen diversos tipos de antibióticos (como los derivados de piridinas y pirimidinas), terpenoides, y toxinas como los tricotecenos (son un grupo de micotoxinas, sustancias químicas tóxicas) producidas por diversos hongos, incluyendo *Fusarium*, *Myrothecium* y, en menor medida, algunas especies de *Trichoderma*). La producción de estos metabolitos puede ocurrir tanto en el medio de cultivo como en la rizosfera.

Degradación de Enzimas Patogénicas: Algunos patógenos fúngicos secretan enzimas (como pectinasas, celulasas) que les permiten invadir los tejidos de la planta. *Trichoderma* puede producir enzimas que degradan estas enzimas patogénicas, reduciendo así la capacidad del patógeno para penetrar y dañar la planta.

2. Promoción del Crecimiento Vegetal (PGP):

Trichoderma no solo protege a las plantas, sino que también contribuye activamente a su crecimiento y desarrollo saludable. Los mecanismos de PGP incluyen:

Mejora de la absorción de nutrientes:

Solubilización de fosfato: Muchas cepas de *Trichoderma* son capaces de solubilizar el fósforo inorgánico y orgánico en el suelo. El fósforo es un nutriente esencial para las plantas, pero a menudo se encuentra en formas poco disponibles. *Trichoderma* lo libera mediante la producción de ácidos orgánicos (como ácido cítrico y glucónico) y fosfatasas, haciéndolo accesible para la absorción radicular.

Secuestro y metabolismo de hierro: El hierro es otro nutriente crucial que puede ser limitante en muchos suelos. *Trichoderma* produce sideróforos, que son moléculas de

alta afinidad por el hierro. Al secuestrar el hierro, *Trichoderma* puede hacerlo más disponible para la planta, mientras que al mismo tiempo lo priva de los patógenos que también lo necesitan. Algunas cepas también pueden ayudar a la planta en la asimilación de hierro.

Disponibilidad de micronutrientes: Similar al fósforo y el hierro, *Trichoderma* puede mejorar la disponibilidad de otros micronutrientes esenciales como el zinc y el manganesio.

Producción de fitohormonas: Algunas cepas de *Trichoderma* son capaces de sintetizar y liberar hormonas vegetales, como auxinas (por ejemplo, ácido indolacético, AIA) y giberelinas. Estas hormonas promueven el crecimiento de las raíces (alargamiento, ramificación, desarrollo de pelos radiculares), el crecimiento del tallo y la floración, lo que resulta en plantas más grandes y vigorosas.

Mejora de la estructura del suelo y la salud de la rizosfera: La actividad de *Trichoderma* puede influir positivamente en la estructura física del suelo, mejorando la agregación y la aireación. Al promover un sistema radicular más sano y denso, también contribuye a la estabilidad del suelo. Además, al suprimir patógenos y liberar compuestos beneficiosos, *Trichoderma* ayuda a crear un ambiente rizosférico más saludable.

3. Inducción de Resistencia Sistémica (ISR):

Un mecanismo cada vez más reconocido y valioso es la capacidad de *Trichoderma* para "entrenar" a la planta a defenderse a sí misma. La inducción de resistencia sistémica es un estado fisiológico en el que la planta se vuelve más resistente a patógenos y, en algunos casos, a plagas, sin que el hongo *Trichoderma* esté en contacto directo con la parte susceptible de la planta. Los mecanismos de ISR son complejos y se cree que implican la señalización hormonal dentro de la planta. Cuando *Trichoderma* coloniza las raíces, puede desencadenar vías de señalización (a menudo relacionadas con el ácido jasmónico y el etileno) que activan genes de defensa en toda la planta. Esto puede resultar en:

Producción de proteínas de defensa: La planta comienza a producir proteínas y enzimas implicadas en la defensa, como las proteínas relacionadas con la patogénesis (PR proteins), que tienen actividades antifúngicas y antibacterianas.

Acumulación de compuestos antimicrobianos: La planta puede acumular fitoalexinas, compuestos antimicrobianos de bajo peso molecular que son tóxicos para los patógenos.

Fortalecimiento de paredes celulares: Puede haber un aumento en la lignificación o en la deposición de calosa en las paredes celulares de la planta, lo que dificulta la penetración de los patógenos.

Mayor tolerancia al estrés: La inducción de ISR también puede conferir a la planta una mayor tolerancia a diversos tipos de estrés abiótico, como la sequía, la salinidad y las temperaturas extremas.

Es importante destacar que estos mecanismos no son mutuamente excluyentes y a menudo se solapan. Por ejemplo, la competencia por nutrientes puede debilitar al patógeno, mientras que la producción de antibióticos lo elimina directamente. La promoción del crecimiento radicular puede facilitar la colonización por *Trichoderma* y al mismo tiempo aumentar la capacidad de absorción de nutrientes de la planta, mientras que la inducción de resistencia protege a la planta de las amenazas.

La eficacia de un mecanismo particular puede variar significativamente entre las diferentes especies y cepas de *Trichoderma*, así como en función de las condiciones ambientales (suelo, clima, tipo de cultivo). Por lo tanto, la selección de la cepa correcta para una aplicación específica es crucial. La investigación continua se centra en dilucidar la base genética y molecular de estos mecanismos, lo que permitirá desarrollar cepas de *Trichoderma* aún más eficientes y optimizar su uso en sistemas agrícolas sostenibles. Al comprender cómo funciona *Trichoderma*, podemos aprovechar mejor su potencial para mejorar la salud de los cultivos, aumentar la productividad y reducir la dependencia de insumos químicos, allanando el camino hacia una agricultura verdaderamente verde.

Capítulo 4

Trichoderma como agente de control biológico: combatiendo enfermedades del suelo.

Las enfermedades del suelo representan una de las mayores amenazas para la agricultura a nivel mundial. Patógenos fúngicos y bacterianos que residen en el suelo pueden infectar las raíces y el sistema vascular de las plantas, causando una variedad de problemas que van desde la pudrición de semillas y plántulas hasta marchitamientos devastadores y la muerte prematura de plantas maduras. La naturaleza oculta de estos patógenos, su persistencia en el suelo y la dificultad para erradicarlos una vez establecidos, hacen que el control químico sea a menudo costoso, temporal y con consecuencias ambientales adversas significativas. Es en este desafiante escenario donde *Trichoderma* emerge como un actor principal en el control biológico, ofreciendo una alternativa robusta y sostenible.

El género *Trichoderma* alberga un arsenal formidable de estrategias para combatir patógenos del suelo, lo que lo convierte en uno de los grupos de microorganismos más estudiados y aplicados en biocontrol. Su efectividad no se debe a un único mecanismo, sino a la combinación sinérgica de varias acciones que, en conjunto, logran suprimir de manera significativa el desarrollo y la virulencia de los patógenos. Los patógenos de suelo más comunes y contra los cuales *Trichoderma* ha demostrado ser eficaz incluyen miembros de los géneros *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, *Phytophthora*, *Sclerotinia*, *Verticillium*, *Macrophomina* y varias especies de bacterias patógenas.

Los mecanismos clave mediante los cuales *Trichoderma* actúa como agente de control biológico de patógenos del suelo son:

Competencia por recursos y espacio: Los patógenos del suelo, al igual que los microorganismos beneficiosos, requieren nutrientes y un nicho ecológico para sobrevivir y proliferar. *Trichoderma* es un competidor excepcional. Sus esporas germinan rápidamente en la rizosfera en respuesta a los exudados radiculares, y sus hifas crecen vigorosamente. Compiten agresivamente con los patógenos por los nutrientes disponibles, como fuentes de carbono, nitrógeno y oligoelementos esenciales como el hierro. Además, compiten por los sitios de colonización en la superficie de las raíces, que son cruciales para la infección. Al ocupar estos nichos y agotar los recursos antes que los patógenos, *Trichoderma* puede prevenir la colonización y el establecimiento de

las infecciones. La rápida colonización de la raíz por *Trichoderma* es un factor crítico que limita el acceso de los patógenos.

Micoparasitismo: Este es uno de los mecanismos más fascinantes y específicos de *Trichoderma*. Implica que *Trichoderma* no solo compita, sino que también ataque y parasite directamente a otros hongos, incluyendo a sus congéneres y a patógenos. El proceso típicamente comienza con el reconocimiento de las hifas del hongo hospedero. *Trichoderma* responde formando apresorios en contacto con la hifa del patógeno. A continuación, secreta una batería de enzimas líticas extracelulares, como quitinasas, β -glucanasas y proteasas. Estas enzimas rompen las paredes celulares del hongo patógeno, liberando sus componentes celulares que *Trichoderma* absorbe y utiliza como nutrientes. Esta acción no solo elimina al patógeno, sino que también enriquece el entorno rizosférico con nutrientes que pueden beneficiar a la planta. La especificidad de las enzimas y la interacción molecular en el micoparasitismo son áreas activas de investigación para comprender mejor la eficiencia de diferentes cepas de *Trichoderma*.

Producción de antibióticos y metabolitos antifúngicos: *Trichoderma* es un prolífico productor de una amplia gama de metabolitos secundarios con actividad biológica, muchos de los cuales son antifúngicos y antibacterianos. Estos compuestos pueden difundirse en el medio de cultivo y actuar a distancia para inhibir el crecimiento o matar a los patógenos. Algunos de los metabolitos más importantes incluyen:

Ácidos orgánicos: Como el ácido cítrico y el ácido glucónico, que reducen el pH del medio y crean condiciones desfavorables para muchos patógenos.

Enzimas: Además de las enzimas líticas usadas en micoparasitismo, *Trichoderma* puede producir otras enzimas que afectan a los patógenos.

Toxinas antifúngicas y antibacterianas: incluyen compuestos de bajo peso molecular como tricotecenos, peptaiboles, piridinas y derivados de pirimidina, que interfieren con procesos celulares vitales de los patógenos. La producción de estos compuestos es a menudo dependiente de la cepa y de las condiciones ambientales.

Degradación de enzimas patogénicas: los patógenos del suelo a menudo necesitan secretar enzimas para degradar las estructuras de la planta y poder invadirla. Por ejemplo, muchos hongos patógenos producen enzimas como celulasas y pectinasas para romper la pared celular de las plantas. *Trichoderma* puede producir enzimas que degradan estas enzimas patogénicas, inactivándolas y reduciendo así la capacidad del patógeno para infectar la planta.

Impacto en patógenos específicos:

***Fusarium* spp.:** Ampliamente reconocido como causa de marchitamientos vasculares (como la fusariosis) y pudriciones de raíz. *Trichoderma* es muy eficaz contra muchas especies de *Fusarium* a través de la competencia, micoparasitismo y producción de metabolitos antifúngicos.



Figura 2. Control biológico de *Fusarium* spp. por parte de *Trichoderma* spp.

Rhizoctonia solani: Causa de la enfermedad del "damping-off" o tizón de plántulas, y otras pudriciones en una gran variedad de cultivos. *Trichoderma* compete por sitios de colonización y produce enzimas que degradan las hifas de *R. solani*.



Figura 3. Control biológico de *Rhizoctonia solani* por parte de *Trichoderma* spp.

Consideraciones para la aplicación en control biológico:

La eficacia del control biológico con *Trichoderma* depende de varios factores:

Selección de la Cepa: La diversidad de *Trichoderma* implica que no todas las cepas son igualmente efectivas contra todos los patógenos o en todas las condiciones. Es crucial seleccionar cepas específicas que hayan demostrado ser virulentas contra el patógeno objetivo y que se adapten al cultivo y al entorno.

Dosis y Momento de Aplicación: Una dosis suficiente de la cepa viable de *Trichoderma* debe ser aplicada en el momento adecuado para permitir su colonización antes de que el patógeno cause daño. Las aplicaciones en la semilla, en la plántula, en el suelo o vía riego por goteo son comunes.

Condiciones Ambientales: La temperatura, la humedad, el pH del suelo y la presencia de otros microorganismos pueden influir en la supervivencia y actividad de *Trichoderma*.

Compatibilidad con Otros Insumos: La compatibilidad de *Trichoderma* con fungicidas, fertilizantes y otras prácticas agrícolas debe ser cuidadosamente considerada. Algunos agroquímicos pueden ser perjudiciales para *Trichoderma*.

En resumen, *Trichoderma* es un pilar fundamental en las estrategias de control biológico de enfermedades del suelo. Su capacidad para competir, parasitar, producir metabolitos inhibitorios y degradar componentes patogénicos lo convierte en un adversario formidable para una amplia gama de patógenos. Al integrar *Trichoderma* en programas de manejo de cultivos, los agricultores pueden reducir significativamente la dependencia de fungicidas químicos, mejorar la salud del suelo y garantizar cosechas más sanas y productivas de manera sostenible. La lucha contra las enfermedades del suelo es una batalla continua, y *Trichoderma* es, sin duda, uno de nuestros aliados más poderosos en ella.

Capítulo 5

El Papel de *Trichoderma* en la mejora de la salud radicular y la absorción de nutrientes.

El sistema radicular es la base de la salud y productividad de cualquier planta. Es a través de las raíces que la planta se ancla al suelo, absorbe agua y nutrientes esenciales, y establece interacciones vitales con el microbioma del suelo. Una raíz sana y vigorosa es fundamental para la supervivencia y el rendimiento del cultivo, especialmente bajo condiciones de estrés. *Trichoderma*, más allá de su papel en el control de patógenos, es un extraordinario promotor de la salud radicular y la eficiencia en la absorción de nutrientes, actuando como un verdadero "ingeniero biológico" de la rizosfera.

La rizosfera, esa zona del suelo íntimamente conectada a las raíces de las plantas, es un entorno dinámico y metabólicamente activo. Las plantas secretan exudados radiculares (azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos) que nutren a una comunidad diversa de microorganismos. *Trichoderma* ha evolucionado para prosperar en este nicho y, al colonizar las raíces, desencadena una serie de efectos beneficiosos que mejoran tanto la estructura y función de la raíz como la capacidad de la planta para nutrirse.

Los mecanismos mediante los cuales *Trichoderma* mejora la salud radicular y la absorción de nutrientes son multifacéticos:

Colonización y protección de la raíz:

Estimulación del crecimiento radicular: Diversas cepas de *Trichoderma* son capaces de estimular directamente el crecimiento de las raíces. Esto se logra, en parte, a través de la producción de fitohormonas, particularmente auxinas (como el ácido indolacético, AIA). Las auxinas promueven la elongación de las células radiculares, el desarrollo de la raíz principal y la formación de raíces laterales y pelos radiculares. Un sistema radicular más grande y ramificado mejora la exploración del suelo, permitiendo a la planta acceder a más agua y nutrientes.

Aumento de la densidad radicular y los pelos radiculares: La estimulación de la ramificación y la formación de pelos radiculares por *Trichoderma* aumenta drásticamente la superficie de la raíz disponible para la absorción. Esto incrementa

significativamente la eficiencia con la que la planta puede captar agua y nutrientes disueltos en el suelo.

Prevención de la colonización por patógenos: Como se detalló en el capítulo anterior, *Trichoderma* compete por sitios de colonización en la raíz y ataca activamente a los patógenos. Al colonizar la raíz de manera temprana y vigorosa, crea una barrera biológica que impide que los patógenos del suelo infecten los tejidos radiculares. Una raíz libre de patógenos es una raíz sana, capaz de realizar sus funciones de absorción de manera óptima.

Mejora de la absorción y disponibilidad de nutrientes:

Solubilización de Fósforo: El fósforo (P) es un macronutriente esencial para el crecimiento vegetal, pero a menudo se encuentra en el suelo en formas insolubles y poco disponibles, especialmente el fósforo inorgánico unido a minerales del suelo o el fósforo orgánico. Muchas cepas de *Trichoderma* poseen la capacidad de solubilizar estas formas de fósforo. Lo logran secretando ácidos orgánicos (como el ácido glucónico, cítrico, oxálico) que reducen el pH en la proximidad de la raíz y secuestran cationes como el Ca^{2+} y el Fe^{3+} que estabilizan el fosfato. También producen enzimas fosfatasas que hidrolizan ésteres de fosfato orgánico, liberando fosfato inorgánico. Al aumentar la concentración de fósforo disponible en la rizosfera, *Trichoderma* asegura un suministro constante para la planta, lo cual es vital para la producción de energía, la transferencia de información genética y la formación de nuevas células.

Disponibilidad de Hierro (Fe): El hierro es un micronutriente esencial involucrado en la fotosíntesis y la respiración, pero su disponibilidad para las plantas se ve limitada en suelos alcalinos debido a su rápida oxidación y precipitación. *Trichoderma* produce sideróforos, que son moléculas quelantes de alta afinidad por el hierro. Estos sideróforos secuestran el hierro en el suelo, manteniéndolo en una forma soluble y disponible para ser absorbido por la planta. Esto es beneficioso tanto para la planta como para la propia *Trichoderma*, y al mismo tiempo priva al hierro a los patógenos que también lo necesitan.

Liberación de otros micronutrientes: Investigaciones sugieren que *Trichoderma* también puede contribuir a la disponibilidad de otros micronutrientes importantes, como el zinc y el manganeso, que son cofactores esenciales para muchas enzimas vegetales.

Mejora de la eficiencia de uso de nutrientes: Al aumentar la superficie de absorción de la raíz y la disponibilidad de nutrientes clave, *Trichoderma* permite que las plantas utilicen los nutrientes del suelo de manera más eficiente. Esto puede significar que se necesita menos fertilizante para alcanzar los mismos niveles de rendimiento, lo que es una ventaja económica y ambiental significativa.

Inducción de resistencia y tolerancia al estrés:

Si bien no es directamente un mecanismo de absorción de nutrientes, la inducción de resistencia por parte de *Trichoderma* (como se describe en el Capítulo 3) puede indirectamente mejorar la salud radicular y la capacidad de absorción. Una planta que está preparada para defenderse es menos susceptible a los daños causados por patógenos que comprometen el sistema radicular. Además, la ISR a menudo confiere una mayor tolerancia a las plantas frente a estrés abiótico como la sequía y la salinidad. La capacidad de la planta para resistir estos estresores, que a menudo afectan la absorción de agua y nutrientes, contribuye a mantener la salud radicular y la funcionalidad general del cultivo. Por ejemplo, en condiciones de sequía, un sistema

radicular más extenso y sano, promovido por *Trichoderma*, permite a la planta acceder a agua en capas más profundas del suelo.

La sinergia entre la protección contra patógenos, la estimulación del crecimiento radicular y la mejora de la nutrición es lo que hace que *Trichoderma* sea tan valioso. Una raíz sana es menos vulnerable a las enfermedades. Una raíz más grande y con más pelos radiculares puede absorber más eficientemente los nutrientes que *Trichoderma* ha ayudado a hacer disponibles. Los nutrientes adicionales y la reducción del estrés por patógenos, a su vez, promueven un crecimiento general más vigoroso de la planta.

La aplicación de *Trichoderma* en la agricultura, ya sea a través de tratamientos de semillas, aplicación al suelo, o incorporado en fertilizantes, es una estrategia eficaz para construir un sistema radicular robusto y optimizar la nutrición vegetal. Esto no solo se traduce en mayores rendimientos y mejor calidad del cultivo, sino también en plantas más resilientes, capaces de enfrentar los desafíos de un entorno agrícola cada vez más exigente al invertir en la salud.

Capítulo 6

Ecología y distribución: Un Análisis Profundo del Hábitat Argentino

La efectividad de cualquier organismo como agente de control biológico o promotor del crecimiento vegetal está intrínsecamente ligada a su ecología: dónde vive, cómo sobrevive, y cómo interactúa con su entorno biótico y abiótico. Este capítulo se sumerge en el estudio de su distribución geográfica dentro del país y los factores ecológicos que determinan su presencia, abundancia y éxito en diferentes hábitats, desde los suelos agrícolas hasta los ecosistemas naturales.

La distribución de *Trichoderma* en Argentina es un mosaico complejo, influenciado por una vasta gama de condiciones ambientales. Si bien se le ha identificado en diversas regiones, es probable que su abundancia y predominancia varíen significativamente. Los suelos de la Pampa Húmeda, la región agrícola por excelencia del país, son un foco de investigación natural, dada la importancia de los cultivos extensivos como la soja, el maíz y el trigo. En estas áreas, *Trichoderma* compete en un microbioma rico y dinámico, y su éxito puede depender de su capacidad para prosperar en suelos con ciertos niveles de materia orgánica, pH, y en presencia de comunidades microbianas locales.

Más allá de la Pampa, la distribución de *Trichoderma* se extiende a otras ecorregiones argentinas. En el Noroeste, con sus climas semiáridos y suelos a menudo salinos, las cepas de *Trichoderma* presentes deben poseer adaptaciones específicas para la tolerancia a la sequía y a altas concentraciones de sales. En la Patagonia, caracterizada por bajas temperaturas, vientos fuertes y suelos pobres en nutrientes, la presencia de *Trichoderma* podría estar asociada a ecosistemas esteparios o a áreas de vegetación más densa, donde las condiciones de humedad y temperatura son más favorables. Los ecosistemas de humedales, como los Esteros del Iberá, con sus suelos saturados de agua y alta materia orgánica, podrían albergar poblaciones adaptadas a condiciones de anaerobiosis parcial o a la presencia de patógenos específicos de plantas acuáticas o semiacuáticas.

Los factores abióticos juegan un papel crucial en la distribución de *Trichoderma*. La temperatura es uno de los más importantes; cada cepa tendrá un rango óptimo de temperatura para el crecimiento y la actividad metabólica. Las variaciones estacionales en Argentina, desde los veranos cálidos hasta los inviernos fríos, influirán en la dinámica poblacional de *Trichoderma*. El pH del suelo es otro factor determinante. *Trichoderma* en general tiende a preferir suelos ligeramente ácidos a neutros, pero las adaptaciones específicas de las cepas argentinas a suelos más alcalinos o ácidos son áreas de interés. La humedad del suelo, o el contenido de agua, es vital para el crecimiento y la dispersión de las esporas, y la tolerancia a la sequía o a condiciones de anegamiento definirá su nicho. La disponibilidad de nutrientes, especialmente de nitrógeno y carbono, también influirá en su abundancia y en su capacidad para competir con otros microorganismos del suelo.

Sin embargo, la ecología de *Trichoderma* no se limita a su interacción con el ambiente físico. Su rol en el suelo es principalmente como saprofita facultativo y, crucialmente, como un agente antagonista y promotor del crecimiento. Su distribución y abundancia están, por lo tanto, fuertemente influenciadas por la presencia de otros organismos. Su competencia por nutrientes y espacio con bacterias y otros hongos del suelo es intensa. La presencia de patógenos de plantas específicos, como hongos del género *Fusarium*, *Rhizoctonia* o *Phytophthora*, puede actuar como un "atrayente" ecológico, ya que *Trichoderma* ha evolucionado mecanismos para detectarlos y suprimirlos. Esto podría resultar en una mayor abundancia de *Trichoderma* en suelos con historial de enfermedades.

Además de su papel antagonista, *Trichoderma* interactúa con las plantas. Su colonización de la rizosfera y, en algunos casos, su establecimiento como endófito, lo vinculan estrechamente con la salud y el crecimiento de las plantas. La presencia de ciertas especies de plantas huésped, o la existencia de comunidades vegetales particulares, podría favorecer la presencia y proliferación de *Trichoderma*. Las prácticas agrícolas, como la labranza, el uso de fertilizantes y pesticidas, y la rotación de cultivos, alteran significativamente la estructura y la función de la comunidad microbiana del suelo, y por ende, afectan la ecología de *Trichoderma*. Los suelos sometidos a labranza intensiva pueden tener menor abundancia de hongos en general, mientras que la aplicación de ciertos fungicidas puede seleccionar negativamente a cepas sensibles de *Trichoderma*.

La biodiversidad genética dentro de la especie *Trichoderma* es también un componente clave de su ecología. Es probable que diferentes cepas, distribuidas geográficamente, posean adaptaciones ecológicas distintas. Las cepas aisladas de suelos salinos del Noroeste podrían ser más tolerantes a la salinidad que aquellas encontradas en la Pampa. Las cepas adaptadas a climas fríos de la Patagonia podrían tener una menor temperatura de crecimiento óptimo. La identificación de estas adaptaciones ecológicas específicas es fundamental para seleccionar la cepa más adecuada para una aplicación particular en una región dada de Argentina.

La investigación sobre la ecología y distribución de *Trichoderma* implica el uso de diversas metodologías. La recolección de muestras de suelo de diferentes regiones y hábitats, seguida de métodos de aislamiento y cultivo selectivo, permite identificar y cuantificar su presencia. Las técnicas de biología molecular, como la PCR cuantitativa (qPCR) y la secuenciación de ADN de muestras ambientales (metagenómica), están revolucionando este campo al permitir la detección y cuantificación de *Trichoderma* y

otras comunidades microbianas sin necesidad de cultivo, proporcionando una imagen más completa de su abundancia y distribución real en el suelo.

Comprender la ecología de *Trichoderma* también implica investigar su rol en la cadena trófica del suelo y en los ciclos biogeoquímicos. Como descomponedor, participa en la mineralización de materia orgánica y la liberación de nutrientes. Su interacción con otros microorganismos, como nematodos o protozoos, también contribuye a la complejidad de su nicho ecológico.

En conclusión, la ecología y distribución de *Trichoderma* en Argentina es un campo de estudio dinámico y esencial. Su presencia y éxito en diversos ambientes dependen de una intrincada red de factores abióticos y bióticos, así como de su propia diversidad genética. Este capítulo ha buscado delinear los contornos de su hábitat, desde la vasta Pampa hasta las estepas patagónicas y los humedales, destacando las presiones selectivas que han modelado a este guardián verde. Una comprensión profunda de su ecología es la base para el desarrollo de estrategias de manejo y aplicación que maximicen su potencial y aseguren su contribución a una agricultura y ecosistemas más resilientes y productivos en toda Argentina.

Lavilla, Miguel ángel

Trichoderma en agricultura : el aliado verde para un futuro sostenible / Miguel ángel Lavilla. – y Fernández 1a ed. - Pergamino : Miguel Angel Lavilla, 2026.

Tarjeta de memoria SD ("Secure Digital"), DOCX

ISBN 978-631-01-4816-8

1. Agricultura. I. Título.
CDD 338.1

ISBN 978-631-01-4816-8

