



## A importância das interações biológicas e das simbioses micorrízicas em sistemas agrícolas

Gerusa Pauli Kist Steffen  
Ricardo Bemfica Steffen



GOVERNO DO ESTADO  
**RIO GRANDE DO SUL**  
SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA,  
PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL E IRRIGAÇÃO

**GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL  
SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA,  
PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL E IRRIGAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE DIAGNÓSTICO E PESQUISA  
AGROPECUÁRIA**

## **CIRCULAR:** **divulgação técnica**

**A IMPORTÂNCIA DAS INTERAÇÕES BIOLÓGICAS E DAS  
SIMBIOSSES MICORRÍZICAS EM SISTEMAS AGRÍCOLAS**

Gerusa Pauli Kist Steffen  
Ricardo Bemfica Steffen

Porto Alegre, RS  
2024

**Governador do Estado do Rio Grande do Sul:** Eduardo Figueiredo Cavalheiro Leite.

**Secretário da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação:** Giovani Feltes

**Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária**

Rua Gonçalves Dias, 570 – Bairro Menino Deus

Porto Alegre | RS – CEP: 90130-060

Telefone: (51) 3288.8000

<https://www.agricultura.rs.gov.br/ddpa>

**Diretor:** Caio Fábio Stoffel Efrom

**Comissão Editorial:**

Loana Silveira Cardoso; Lia Rosane Rodrigues; Bruno Brito Lisboa; Larissa Bueno Ambrosini; Flávio Nunes; Raquel Paz da Silva.

**Arte:** Rodrigo Nolte Martins

**Catálogo e normalização:** Flávio Nunes

S817i Steffen, Gerusa Pauli Kist.

A importância das interações biológicas e das simbioses micorrízicas em sistemas agrícolas / Gerusa Pauli Kist Steffen, Ricardo Bemfica Steffen. – Porto Alegre: SEAPI/DDPA, 2024.

40 p: il. – (Circular : divulgação técnica, ISSN 2675-1348 ; 21)

Continuação de: Circular técnica, 1995-2016.

1. Microbiologia do solo. 2. Micorrizas. 3. Microrganismos benéficos. 4. Fertilidade biológica. I. Steffen, Ricardo Bemfica. II. Título. III. Série.

CDU 579.64

**REFERÊNCIA**

STEFFEN, Gerusa Pauli Kist; STEFFEN, Ricardo Bemfica. **A importância das interações biológicas e das simbioses micorrízicas em sistemas agrícolas.** Porto Alegre: SEAPI/DDPA, 2024. 40 p. (Circular: divulgação técnica, 21).

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2 IMPORTÂNCIA DA FRAÇÃO BIOLÓGICA DO SOLO .....</b>	<b>11</b>
<b>3 COMO CONSTRUIR A FERTILIDADE BIOLÓGICA DO SOLO? .....</b>	<b>15</b>
<b>4 FUNGOS MICORRÍZICOS .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 O que são fungos micorrízicos?.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2 Qual a importância dos fungos micorrízicos para a produção vegetal? .....</b>	<b>22</b>
<b>4.3 Dependência de culturas à micorrização para expressão do seu potencial genético.....</b>	<b>27</b>
<b>4.4 Fungos micorrízicos e as interações microbianas no solo .....</b>	<b>29</b>
<b>4.5 Diversidade de fungos micorrízicos.....</b>	<b>31</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>36</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Funções dos organismos e microrganismos do solo. ....13
- Figura 2.** Exemplos de simbioses e interações rizosféricas entre plantas de soja e microrganismos do solo. Nódulos de bactérias fixadoras de nitrogênio (A), hifas de fungos não simbiotes (B), filmes bacterianos (C) e estruturas de fungos micorrízicos arbusculares no interior e na superfície de raízes (D). ....14
- Figura 3.** Simbiose micorrízica em fragmento de raiz de milho com a indicação das diferentes estruturas dos fungos micorrízicos associados às raízes.....20
- Figura 4.** Raízes de soja cultivadas em solos que proporcionaram diferentes níveis de micorrização (baixa e adequada).....22
- Figura 5.** Função das estrigolactonas no sistema solo/planta. ....24
- Figura 6.** Relação entre o incremento da porcentagem de colonização micorrízica e o incremento na qualidade do desenvolvimento da soja. Ensaio realizado em Santa Maria/RS, nas safras de 2020/2021 e 2021/2022. ....25
- Figura 7.** Correlação entre a porcentagem de colonização micorrízica e a eficiência quântica da fotossíntese na soja. Ensaio realizado em Santa Maria/RS, nas safras de 2020/2021 e 2021/2022. ....26

**Figura 8.** Efeito dos diferentes níveis de micorrização no desenvolvimento da parte aérea de plantas de milho e comparação visual das raízes das mesmas plantas com diferentes taxas de colonização micorrízica. ....29

**Figura 9.** Esporos de espécies de fungos micorrízicos arbusculares de importância agrícola e ambiental. ....34

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.** Benefícios da utilização de manejos biológicos na cultura da soja. Valores médios obtidos em ensaios realizados em Santa Maria/RS, nas safras de 2020/2021 e 2021/2022. 17

**Tabela 2.** Classificação dos fungos micorrízicos arbusculares dentro do Reino Fungi proposta por Redecker *et al.* (2013)..33

# **CIRCULAR: divulgação técnica**

## **A IMPORTÂNCIA DAS INTERAÇÕES BIOLÓGICAS E DAS SIMBIOSSES MICORRÍZICAS EM SISTEMAS AGRÍCOLAS**

Gerusa Pauli Kist Steffen<sup>1</sup>, Ricardo Bemfica Steffen<sup>2</sup>

---

1 Pesquisadora, Dra. em Ciência do Solo, Pós-doutora em Ciências Biológicas, Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária. [gerusa-steffen@agricultura.rs.gov.br](mailto:gerusa-steffen@agricultura.rs.gov.br)

2 Pesquisador, Dr. em Ciência do Solo, Pós-doutor em Organismos do Solo e Insumos Biológicos para Agricultura. [agronomors@gmail.com](mailto:agronomors@gmail.com)



# 1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola é um constante desafio e está em permanente evolução. As alterações climáticas, o surgimento de novas pragas, a escassez de recursos naturais, o aumento dos custos de produção, a necessidade de suprir a população com alimentos saudáveis e em abundância são desafios que exigem dos produtores, técnicos e das empresas agrícolas a busca por soluções, visando incrementar a produtividade das mais diversas culturas agrícolas sem descuidar das questões ambientais.

Mais do que problemas, os desafios são oportunidades para repensar técnicas e manejos antigos, substituindo-os ou adequando-os aos novos cenários, priorizando a manutenção da qualidade do solo, das plantas, das pessoas, enfim, do sistema produtivo como um todo.

A agricultura praticada com os objetivos de evitar a degradação do ambiente produtivo, estimulando a vida do solo, favorecendo a fertilidade biológica, priorizando interações microbianas, melhorando os atributos físicos do solo, aumentando a diversidade de plantas e compostos bioativos é conhecida como agricultura regenerativa (Schreefel *et al.*, 2020; Schulte *et al.*, 2022). Em resumo, trata-se de uma agricultura que busca alcançar resultados produtivos sem descuidar da proteção do solo e do ambiente, valendo-se das interações biológicas como forma de otimizar a produção vegetal. Neste contexto, uma das bases fundamentais da agricultura regenerativa é a compreensão dos processos que ocorrem no solo e de suas interações biológicas.

Durante o decorrer da última década, o conceito de solo permaneceu o mesmo. No entanto, houve significativas alterações quanto à forma de compreender as interações que ocorrem neste sistema tão complexo e dinâmico, as quais resultam na produção de plantas. O conceito de solo é amplo e vai muito além de questões geológicas.

O solo é um organismo vivo correspondente à camada mais superficial da crosta terrestre, constituído por materiais minerais e orgânicos resultantes das interações dos fatores de formação (clima, organismos vivos, material de origem e relevo) ao longo do tempo, sendo capaz de sustentar plantas, armazenar água, transformar resíduos e suportar edificações. A fração biológica interage de diversas formas com a fração mineral e o ambiente físico do solo, interferindo diretamente na sua qualidade produtiva. Outro ponto importante que merece ser refletido e citado é o efeito da atividade humana sobre os diferentes tipos de solo, capaz de gerar profundos impactos sociais, econômicos e ambientais (Amundson, 2021).

O solo não é um corpo mineral inerte. É um sistema trifásico, formado por uma fração sólida (que corresponde a 50%), uma fração líquida (25%) e uma fração gasosa (25%). E embora a maior parte da fração sólida do solo seja constituída por minerais, 2 a 5% correspondem à fração da matéria orgânica. E é justamente esta pequena fração da matéria orgânica que representa a fração viva do solo, fundamental para a produção de plantas, sendo responsável pelas importantes interações que ocorrem entre o solo, as plantas e o clima.

Os fungos micorrízicos fazem parte da vasta comunidade de microrganismos envolvidos na produção vegetal. O termo “mico” significa fungo e “riza”, raiz. Portanto, as micorrizas compreendem um grupo de fungos simbiotes que se associam com as raízes das plantas de uma forma completamente benéfica, através de uma simbiose perfeita. Os fungos beneficiam as plantas fornecendo água, nutrientes e compostos orgânicos envolvidos na nutrição e proteção vegetal, enquanto as plantas fornecem açúcares e carboidratos indispensáveis ao metabolismo fúngico.

Embora a ocorrência das simbioses micorrízicas tenha sido descoberta há mais de um século e que a ciência tenha clareza sobre os benefícios que essas associações proporcionem à agricultura, grande parte dos produtores ainda desconhece a importância das micorrizas e, por esta razão, não utilizam manejos que visem à preservação e manutenção de simbioses em seus sistemas produtivos. Sendo assim, esta circular técnica possui o objetivo de divulgar a produtores rurais e à comunidade técnica ligada à produção vegetal, informações relacionadas à existência e importância das associações entre plantas e microrganismos benéficos em sistemas produtivos, bem como os benefícios da adoção de técnicas e manejos que visem à melhoria da fertilidade biológica do solo para o incremento dos patamares produtivos das mais diferentes culturas agrícolas.

*“O papel dos infinitamente pequenos na natureza é infinitamente grande.”*

Louis Pasteur (Dubos, 1967)

## **2 IMPORTÂNCIA DA FRAÇÃO BIOLÓGICA DO SOLO**

A fração biológica do solo é fundamental para a produção agrícola e está diretamente relacionada com a manutenção da qualidade dos solos e da sustentabilidade da agricultura, assuntos que vêm sendo amplamente discutidos nos últimos anos.

Muitos agricultores já perceberam que mesmo manejando corretamente as questões químicas e físicas do solo, muitas vezes não atingem os patamares produtivos desejados. Altas produtividades dependem de solos quimicamente equilibrados, fisicamente estruturados e biologicamente ativos. Portanto, é necessário considerar os três pilares que sustentam a qualidade do solo e a produtividade agrícola:

- 1) a química ou fertilidade do solo;
- 2) a física ou estrutura do solo;
- 3) a biologia e microbiologia do solo.

Todos os pilares precisam ser considerados, pois não basta nutrir bem as plantas se o solo estiver compactado e não possibilitar o crescimento das raízes. Não basta descompactar o solo se não houver o suprimento dos 17 nutrientes essenciais para as plantas. Não basta fornecer os 17 elementos essenciais para as plantas e descompactar o solo se não estiverem presentes os microrganismos que fornecerão os compostos orgânicos estruturais, que também são essenciais para o crescimento vegetal.

Dentre os compostos estruturais fornecidos às plantas pelos microrganismos estão aminoácidos, hormônios, ácidos

orgânicos e fitoalexinas, que são cadeias carbônicas essenciais para o desenvolvimento vegetal (Mason-Jones *et al.*, 2023; Thepbandir; Athinuwat, 2024; Kandeler, 2024). É curioso perceber que 96% dos elementos que constituem as plantas não são manejados nos sistemas agrícolas por meio da fertilização mineral. Carbono, oxigênio e hidrogênio compõem 96% dos elementos presentes nos tecidos de espécies vegetais. Assim, apenas 4% dos elementos que constituem os tecidos vegetais correspondem aos macro e micronutrientes adicionados por meio de formulações minerais ou organominerais. Este fato demonstra claramente a importância da matéria orgânica do solo e das interações biológicas, que são as principais fontes de carbono, oxigênio e hidrogênio para as plantas. Portanto, mais do que suprir as necessidades nutricionais via fertilização mineral, é preciso investir em bioestímulos microbianos e em interações rizosféricas, visando garantir o adequado funcionamento dos processos biogeoquímicos que ocorrem na interface solo-planta-atmosfera.

Embora a atividade da grande diversidade de organismos e microrganismos presentes no solo não seja diretamente percebida ou compreendida por muitos produtores, ela possui papel fundamental para a agricultura e a regulação de todos os ecossistemas terrestres. São a presença e a atividade dos organismos e microrganismos que compõem a fração viva do solo que garantem a realização de inúmeros serviços sistêmicos, através das múltiplas funções que desempenham no sistema solo (Figura 1).

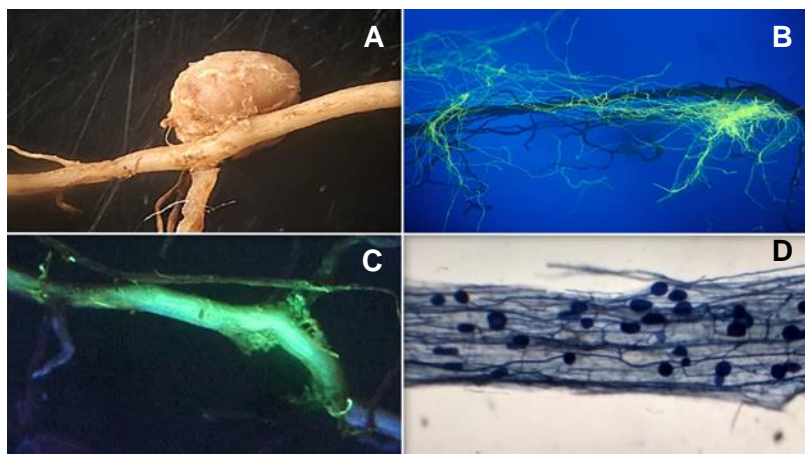
## Funções dos organismos e microrganismos no solo

- ✓ Regulação dos processos de ciclagem de nutrientes e decomposição da matéria orgânica;
- ✓ Produção de compostos e metabólitos que estimulam o crescimento vegetal da parte aérea e do sistema radicular;
- ✓ Fixação biológica de nitrogênio;
- ✓ Controle biológico de pragas e doenças;
- ✓ Produção de compostos solubilizadores de nutrientes;
- ✓ Simbioses micorrízicas que aumentam a área de absorção do sistema radicular, elevando a capacidade da planta em buscar água, nutrientes e tolerar períodos de seca;
- ✓ Degradação de compostos tóxicos;
- ✓ Elevar a resistência da planta a períodos de déficit hídrico e estresse térmico;
- ✓ Conferir maior tolerância das plantas a estresses bióticos (presença de pragas e doenças);
- ✓ Aumentar a eficiência dos processos fotossintéticos;
- ✓ Elevar a produtividade e a qualidade produtiva.

**Figura 1.** Funções dos organismos e microrganismos do solo.

Fonte: Os autores.

Os microrganismos que vivem na rizosfera são influenciados pela atividade das raízes e são fundamentais para os sistemas agrícolas e naturais, por participarem ativamente dos ciclos biogeoquímicos e da ciclagem da matéria orgânica (Figura 2). A comunidade microbiana composta majoritariamente por fungos e bactérias (Figura 2), estimula o enraizamento, produz substâncias promotoras de crescimento, fixa biologicamente nitrogênio da atmosfera, facilita a absorção de nutrientes e protege as plantas contra patógenos, auxiliando-as em condições de estresses climáticos e presença de elementos tóxicos (Schreefel *et al.*, 2020; Giller *et al.*, 2021; Schaefer *et al.*, 2021; Zhang; Peng, 2021; Kalamulla *et al.*, 2022, Wahab *et al.*, 2023).



**Figura 2.** Exemplos de simbioses e interações rizosféricas entre plantas de soja e microrganismos do solo. Nódulos de bactérias fixadoras de nitrogênio (A), hifas de fungos não simbiotes (B), filmes bacterianos (C) e estruturas de fungos micorrízicos arbusculares no interior e na superfície de raízes (D).

Fonte: Ricardo Bemfica Steffen, Gerusa Pauli Kist Steffen

Por todas estas razões, é seguro afirmar que solos biologicamente ativos apresentam maior potencial para proporcionar altas produtividades com qualidade, maior rentabilidade e produzir com menor impacto ambiental.

### **3 COMO CONSTRUIR A FERTILIDADE BIOLÓGICA DO SOLO?**

O termo fertilidade biológica do solo se refere às interações que ocorrem entre microrganismos e a nutrição vegetal. Sendo assim, manter a atividade microbiana dos solos é essencial para garantir a qualidade dos sistemas produtivos.

Alguns grupos de microrganismos essenciais para as culturas agrícolas, e bem conhecidos dos produtores, são as bactérias fixadoras de nitrogênio, bactérias e fungos solubilizadores de fosfatos, agentes de controle biológico, fungos micorrízicos arbusculares, fungos e bactérias promotoras de crescimento vegetal.

Dentre os fungos benéficos, existe uma diversidade de espécies que se associam com as raízes das plantas, disponibilizando nutrientes que se encontram em formas indisponíveis ou pouco disponíveis para absorção, atuando no controle biológico de fitopatógenos, reduzindo efeitos de condições de estresse, ampliando a área de absorção de água e nutrientes, liberando substâncias orgânicas com ação similar a hormônios que estimulam o crescimento vegetal. Enfim, microrganismos que proporcionam uma série de benefícios para as plantas e contribuem para a manutenção da qualidade dos sistemas produtivos. Para estimular a



fertilidade biológica do solo, basta manter condições para que os microrganismos benéficos permaneçam ativos nos sistemas agrícolas, atuando nos mais diversos processos e ciclos biogeoquímicos relacionados à produção vegetal.

Não por coincidência, os atuais recordes de produtividade de grãos observados no Brasil estão associados a manejos biológicos associados ao uso de rotações de culturas eficientes, utilizando diversidade de plantas de cobertura. Quanto maior a diversidade vegetal, maior a diversidade de compostos e a diversidade de microrganismos benéficos. Estes manejos são responsáveis por incrementar a qualidade biológica do solo e proporcionar condições para um bom desenvolvimento das plantas (Tabela 1).

O solo deve ser visto como uma unidade de produção o ano inteiro, e não somente no período de safra. Por isso é tão importante o planejamento e a compreensão dos processos que ocorrem no solo, a interação com as diferentes formas de vida que habitam o mesmo sistema. Conhecendo estas interações, é possível melhorar a qualidade e a produtividade das culturas, garantindo a longevidade e a sustentabilidade do solo.

Estimular os ciclos biológicos no solo e aumentar as simbioses entre comunidades microbianas e o sistema radicular das plantas resultam em estímulo ao desenvolvimento vegetal. O enraizamento é um importante resultado observado nas áreas que utilizam manejos biológicos das culturas. Todo o complexo enzimático e hormonal e a diversidade de ácidos orgânicos, que se encontram no solo em maior concentração nas áreas com manejos biológicos, resultam em maior desenvolvimento de

raízes nas plantas cultivadas. A biomassa de raízes é um fator importante e determinante da produtividade vegetal, principalmente quando ocorrem períodos de déficit hídrico ou estresses provocados pelo excesso de calor.

**Tabela 1.** Benefícios da utilização de manejos biológicos na cultura da soja. Valores médios obtidos em ensaios realizados em Santa Maria/RS, nas safras de 2020/2021 e 2021/2022.

Parâmetros	Sem manejos biológicos	Com manejos biológicos	Incremento (%)
Micorrização (%)	18,25	42,40	132,32
Nodulação da soja (Número de nódulos)	86,5	158,4	83,12
Peso de nódulos (mg)	123,2	195,1	58,36
Volume radicular (cm <sup>3</sup> )	27,4	35,2	28,46
Glomalina (mg g <sup>-1</sup> de solo)	2,52	3,48	38,09
Número de vagens por planta	112,7	175,1	55,36
Peso de 1000 grãos (g)	152,3	174,8	14,77
Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	3,752	4,168	11,08

Fonte: Os Autores.

## **4 FUNGOS MICORRÍZICOS**

### **4.1 O que são fungos micorrízicos?**

“Plantas não têm raízes, elas têm micorrizas”. Essa sentença foi proferida em 1948 por John Laker Harley no livro “Mycorrhiza and Soil Ecology”, com o intuito de alertar a comunidade científica para o fato de que, em condições naturais, a maioria das espécies de plantas se encontra associada a um grupo de fungos do solo, denominados de fungos micorrízicos arbusculares, numa simbiose mutualística obrigatória. O papel fundamental das micorrizas na produção de plantas foi descoberto ainda no século 19, no ano de 1885, pelo alemão Albert Frank. O termo micorriza tem origem grega, em que “mico” significa fungo e “riza” raízes. Embora os estudos com fungos micorrízicos sejam antigos e consolidados, o conhecimento sobre sua importância e a preocupação com manejos que favoreçam sua multiplicação no campo ainda são recentes e merecem ser mais bem difundidos.

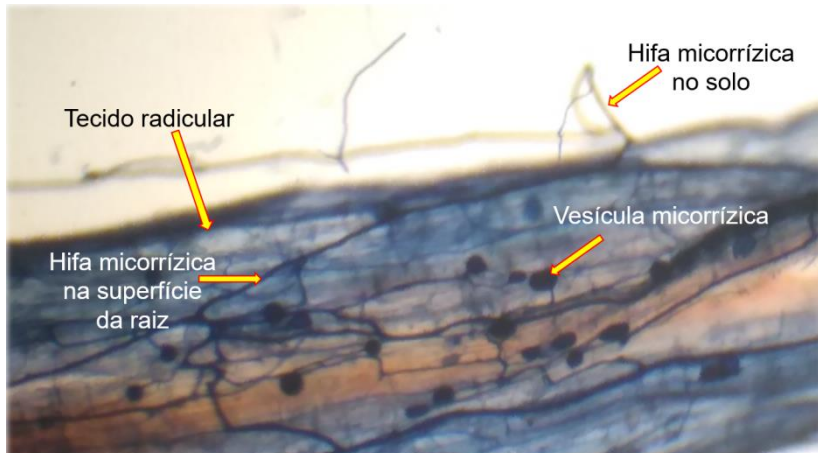
Dentre as inter-relações biológicas estabelecidas no ecossistema solo, as simbioses entre plantas e microrganismos heterotróficos como o caso das micorrizas, destaca-se pelos benefícios proporcionados à produção vegetal. Segundo Brady e Weil (2002), as micorrizas são consideradas a simbiose de maior expressão ecológica e econômica entre fungos de solo e raízes de plantas vasculares.

São conhecidas por micorrizas as espécies de fungos que se associam com as raízes das plantas através de uma associação totalmente benéfica para ambos. Cerca de 90% das plantas terrestres formam associações micorrízicas.

Com base nas características morfológicas, anatômicas e estruturais, as micorrizas podem ser agrupadas em endomicorrizas (micorrizas arbusculares), ectendomicorrizas, ectomicorrizas, micorrizas arbutoides, monotroides, ericoides e orquidoides, sendo as micorrizas arbusculares e as ectomicorrizas as de maior importância econômica para as áreas agrícola e florestal (Smith; Read, 2008). E essa divisão é importante porque as associações entre os fungos com as plantas são específicas, ou seja, as espécies de fungos não se associam com qualquer espécie vegetal. Espécies que se associam com espécies florestais, por exemplo, não são as mesmas que se associam com culturas agrícolas anuais.

As micorrizas arbusculares associam-se com diversos cultivos ao redor do mundo, incluindo as culturas produtoras de grãos de maior interesse agrícola. A simbiose micorrízica possibilita uma constante troca de nutrientes entre a planta hospedeira e a célula fúngica. Esses processos envolvem diferentes estruturas dos fungos, denominadas de arbúsculos, vesículas e hifas (Figura 3).

Os arbúsculos são estruturas ramificadas que ficam em contato com a membrana plasmática das células radiculares, possibilitando a troca de nutrientes entre a planta hospedeira e o fungo (Smith; Read, 2008). As vesículas são estruturas globosas nas quais são armazenados nutrientes utilizados pelos fungos (Bonfante-Fasolo, 1984). Já as hifas fúngicas são as estruturas que possibilitam a absorção e translocação de nutrientes e água do solo para a planta (Graham *et al.*, 1982).



**Figura 3.** Simbiose micorrízica em fragmento de raiz de milho com a indicação das diferentes estruturas dos fungos micorrízicos associados às raízes.

Fonte: Ricardo Bemfica Steffen, Gerusa Pauli Kist Steffen

Nas últimas décadas, o interesse pelo bioestímulo e pela inoculação de fungos micorrízicos em espécies de interesse agrícola se intensificou devido aos benefícios que esses microrganismos proporcionam às plantas, tornando possível o estabelecimento das culturas em solos que apresentam condições sub-ótimas de disponibilidade de água, nutrientes ou mesmo com a presença de poluentes.

As micorrizas arbusculares e as ectomicorrizas promovem incremento significativo da área de absorção radicular das plantas colonizadas, maximizando o aproveitamento de água e nutrientes, como o fósforo, o nitrogênio, o potássio e alguns micronutrientes não fungistáticos (Smith; Read, 2008).

Na relação mutualística estabelecida entre as raízes da planta e o fungo, ocorre uma micotrofia, onde o fungo proporciona à planta maior área de absorção de água e nutrientes minerais, devido à extensão de suas hifas no solo, e em contrapartida, a planta libera na forma de exudatos radiculares alguns fotossintatos, compostos orgânicos e aminoácidos, beneficiando o desenvolvimento fúngico (Zeppa *et al.*, 2005).

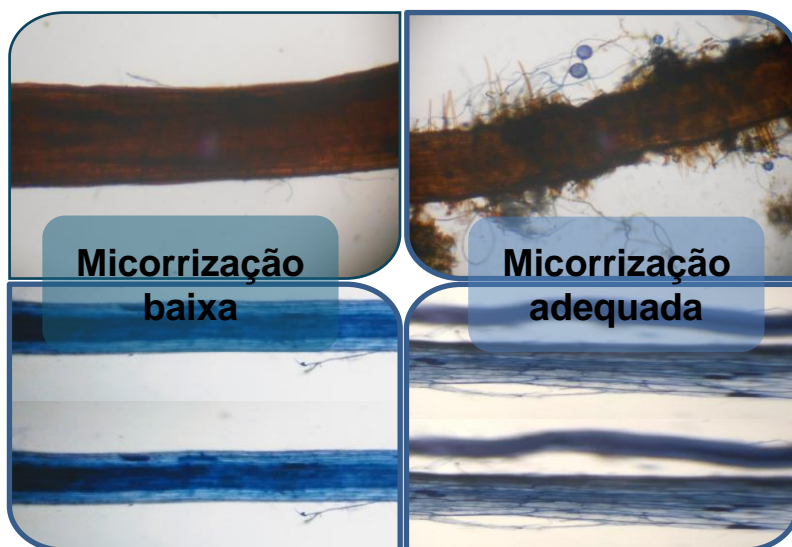
Segundo Duponnois *et al.* (2008), na micorrizosfera, termo utilizado para descrever a região onde acontecem as interações e associações entre os fungos e o sistema radicular das plantas, ocorrem vários processos que influenciam não somente a interação fungo-planta, mas o balanço nutricional e a estabilização dos ecossistemas microbianos.

Além dos benefícios já citados, quando em simbiose com o vegetal, os fungos micorrízicos produzem fitohormônios (ácido indol acético – AIA, e alguns compostos derivados de auxinas) em resposta à produção de compostos fenólicos liberados pelas raízes da planta no momento da colonização. Esses fitohormônios são excretados na micorrizosfera e ficam biodisponíveis para as plantas, apresentando efeito indireto importante para o crescimento vegetal (Smith; Read, 2008).

Aproximadamente 150 espécies de fungos micorrízicos arbusculares estão presentes em solos agrícolas e a simbiose destes fungos com as plantas depende de uma complexa sequência de interações, cuja relação simbiótica resulta numa perfeita integração morfológica, fisiológica e funcional.

## 4.2 Qual a importância dos fungos micorrízicos para a produção vegetal?

No campo, observa-se maior crescimento e qualidade sanitária das plantas que formam associações micorrízicas. Estes efeitos decorrem do fato das plantas micorrizadas serem capazes de explorar um volume de solo significativamente maior em busca de água e nutrientes (especialmente o fósforo). O conjunto de hifas dos fungos atua como uma extensão do volume radicular das plantas, além de sintetizar compostos que disponibilizam formas de nutrientes que estariam inacessíveis às plantas se não fosse a ação dos fungos (Figura 4).



**Figura 4.** Raízes de soja cultivadas em solos que proporcionaram diferentes níveis de micorrização (baixa e adequada).

Fonte: Ricardo Bemfica Steffen, Gerusa Pauli Kist Steffen

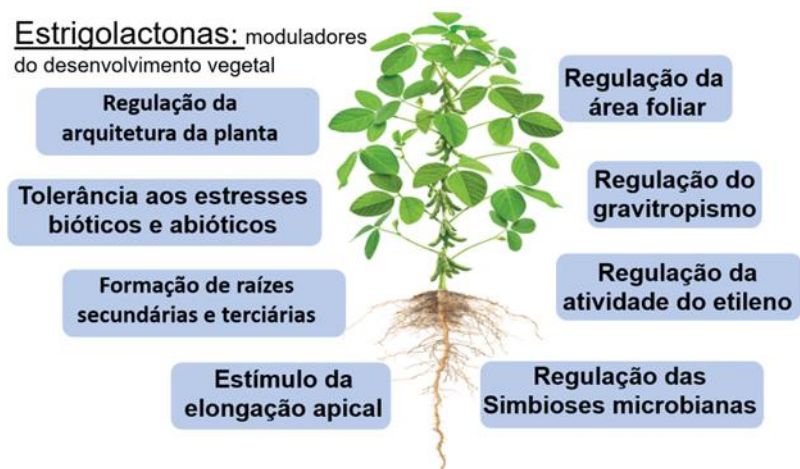
Por apresentarem maior velocidade de crescimento do que as raízes e por serem muito mais finas, as hifas fúngicas conseguem buscar água e nutrientes em distâncias muito maiores do que os limites do sistema radicular, acessando microporos e espaços entre agregados inacessíveis até mesmo para as raízes mais finas. Além disso, em situações de presença de elementos tóxicos no solo, as hifas atuam na imobilização destes elementos, impedindo que eles sejam absorvidos pelas raízes.

Os fungos micorrízicos, em especial os fungos micorrízicos arbusculares, quando em simbiose com as raízes, auxiliam na produção e liberação de compostos orgânicos chamados de estrigolactonas (Silva; Montoya, 2022; Cauich-Cauich *et al.*, 2023; Vuelta-Lorenzo *et al.*, 2023). Estes compostos exercem importante função no sistema solo/planta por estimularem tanto o desenvolvimento das plantas como de microrganismos, e as interações rizosféricas (Figura 5).

Sabe-se também que os fungos micorrízicos desempenham importante função de sinalização bioquímica para outros microrganismos simbiotes no solo. O fato de o sistema radicular de uma planta cultivada estar em simbiose com determinados fungos micorrízicos garante o estabelecimento de novas associações e a manutenção dos processos bioquímicos na rizosfera. Até mesmo a fixação biológica de nitrogênio na soja possui interação com a micorrização.



**Estrigolactonas:** moduladores do desenvolvimento vegetal



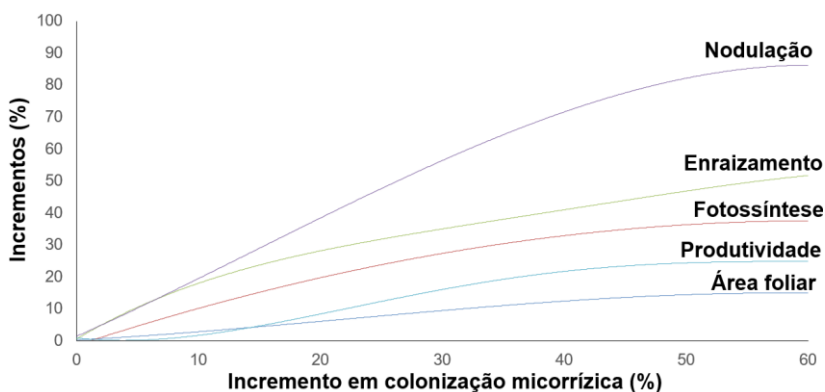
**Figura 5.** Função das estrigolactonas no sistema solo/planta.

Fonte: Os autores.

A presença ampla dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em simbiose com as leguminosas que se associam com os rizóbios para a fixação biológica do nitrogênio, caracterizando um sistema simbiótico tripartite envolvendo planta-FMA-rizóbio, tem influenciado a nodulação em número de nódulos e em biomassa de nódulos secos (Liu *et al.*, 2020; Qin *et al.*, 2023). Observa-se que a inoculação conjunta de FMA e estirpes de rizóbio influencia positivamente o crescimento vegetal, o número de nódulos, o peso de nódulos secos, a taxa de colonização micorrízica e os teores de nitrogênio e fósforo nas plantas (Mpongwana *et al.*, 2024).

Utilizando como exemplo a cultura da soja, a colonização micorrízica nas raízes proporciona às plantas maior equilíbrio fisiológico e desenvolvimento vegetal no

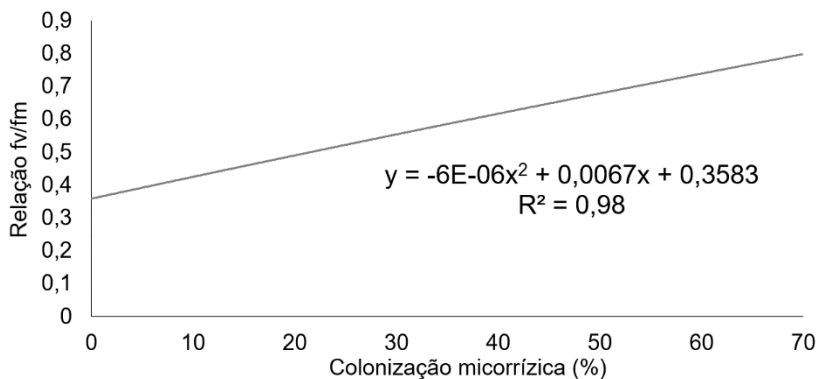
campo. Parâmetros agrônômicos diretamente ligados à produtividade como índice de área foliar, eficiência fotossintética, nodulação (fixação biológica de nitrogênio) e enraizamento são significativamente superiores em plantas cuja taxa de colonização micorrízica esteja mais elevada (Figura 6).



**Figura 6.** Relação entre o incremento da porcentagem de colonização micorrízica e o incremento na qualidade do desenvolvimento da soja. Ensaios realizados em Santa Maria/RS, nas safras de 2020/2021 e 2021/2022.

Fonte: Os autores.

A simbiose micorrízica proporciona às plantas maior eficiência quântica da fotossíntese, ou seja, quanto maior for a porcentagem de colonização micorrízica das raízes, maior será a eficiência das plantas em converter energia luminosa em energia química (Figura 7).



**Figura 7.** Correlação entre a porcentagem de colonização micorrízica e a eficiência quântica da fotossíntese na soja. Ensaios realizados em Santa Maria/RS, nas safras de 2020/2021 e 2021/2022.

Fonte: Os autores.

Além destes efeitos nutricionais, resultados de pesquisa comprovaram efeitos adicionais relacionados com a maior absorção e o aproveitamento de água, produção de fitohormônios estimulantes de crescimento, proteção do sistema radicular devido às hifas atuarem como uma barreira natural de impedimento à penetração de patógenos, e maior eficiência no sistema de fixação de nitrogênio por leguminosas (Tang *et al.*, 2023; Wahab *et al.*, 2023; Robdrup *et al.*, 2024).

Vasta diversidade de compostos e moléculas, como auxinas, citocininas, giberelinas, vitaminas e compostos orgânicos bioativos se acumulam em maior quantidade em plantas micorrizadas.

Por todo o exposto, é evidente o papel fundamental das simbioses micorrízicas para a alta performance das plantas cultivadas, em especial para as culturas agrícolas de maior interesse econômico. Não por acaso, estratégias de manejo que priorizam interações microbianas na rizosfera e a manutenção da atividade biológica nos solos estão entre as ferramentas técnicas mais relevantes para a obtenção de alta eficiência agrônômica.

### **4.3 Dependência de culturas à micorrização para expressão do seu potencial genético**

A grande maioria das plantas vasculares é dependente de associações micorrízicas. No geral, são consideradas plantas dependentes de associações micorrízicas as que apresentam raízes grossas ou bastante lignificadas.

A dependência micorrízica é calculada pela diferença entre a produtividade das culturas na presença e na ausência de simbioses micorrízicas. O conhecimento desta relação é essencial para a compreensão da importância da manutenção do inóculo micorrízico em solos agrícolas. O exemplo máximo de dependência micorrízica é a mandioca (*Manihot esculenta*). A pesquisa aponta que 98% do potencial produtivo da mandioca estão relacionados com a qualidade das associações micorrízicas estabelecidas (Otun; Achilonu, 2023). Por esta razão, pode-se afirmar que a produção de mandioca é improvável em solos sem a presença de inóculo micorrízico.

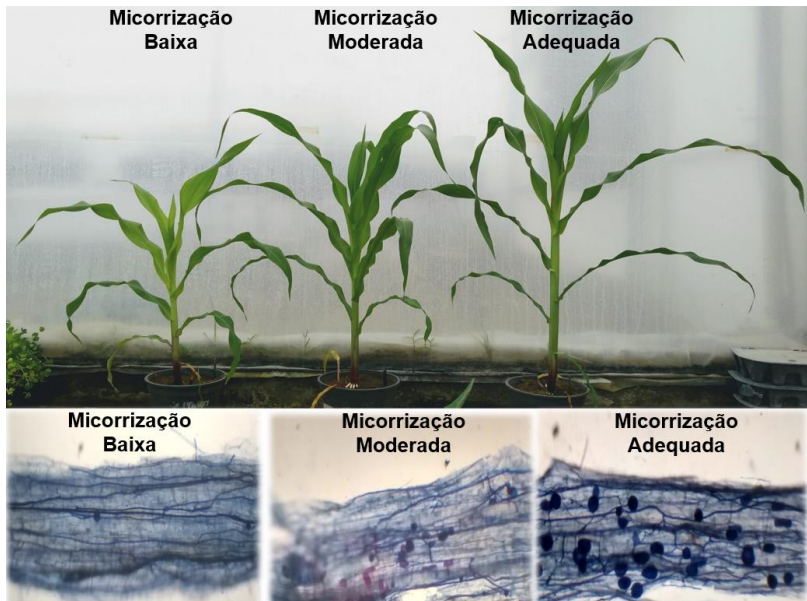
O grau de dependência das espécies de plantas ao estabelecimento de simbioses micorrízicas é classificado em muito alto, médio, baixo ou até mesmo nulo (Guzman *et al.*,

2021). Dentre as culturas de interesse agrícola, o arroz, por exemplo, possui dependência muito baixa a este tipo de associação. Tanto em condições de sequeiro como no cultivo em lâmina de água, o arroz não depende diretamente desta associação. Culturas de inverno como trigo, cevada e centeio possuem dependência moderada ao estabelecimento de associações micorrízicas. Já a soja, o feijão, o milho e o sorgo possuem alta dependência às associações com fungos micorrízicos arbusculares. Portanto, estas importantes culturas de grãos irão expressar seu potencial genético se, dentre todos os fatores de produtividade que devem ser atendidos, a associação micorrízica também estiver sendo contemplada (Figura 8).

Estudos demonstram que incrementos de 25 a 40% na porcentagem de colonização micorrízica das plantas podem resultar em incrementos de 12 e 35% na produtividade de soja e milho, respectivamente.

Então, sabendo-se que culturas de grande interesse agrícola como a soja, o milho e o feijão são dependentes por associações micorrízicas, é fácil compreender a importância e os benefícios do produtor priorizar manejos que estimulem o equilíbrio biológico nos solos.

Estes manejos devem, fundamentalmente, utilizar ferramentas como rotação de culturas, uso de plantas de cobertura eficientes do ponto de vista de presença de compostos bioativos, adoção de programas adequados e precisos de fertilização e controle fitossanitário, evitando o uso desnecessário de moléculas químicas que possam influenciar de forma negativa a população microbiana benéfica presente no solo.



**Figura 8.** Efeito dos diferentes níveis de micorrização no desenvolvimento da parte aérea de plantas de milho e comparação visual das raízes das mesmas plantas com diferentes taxas de colonização micorrízica.

Fonte: Ricardo Bemfica Steffen, Gerusa Pauli Kist Steffen

#### **4.4 Fungos micorrízicos e as interações microbianas no solo**

A interação entre os fungos micorrízicos e demais microrganismos rizosféricos (fungos e bactérias) representa um eficiente mecanismo de promoção da qualidade do solo, não somente em relação ao aspecto biológico, mas também

da qualidade físico-química do solo (Thepbandit; Athinuwat, 2024). As inter-relações que ocorrem em solos biologicamente ativos resultam em ambientes produtivos de alta eficiência, por estabelecerem alto nível de fertilidade sistêmica (Anghinoni; Vezzani, 2021).

Cada grupo de microrganismos desempenha funções específicas no solo e na interface solo/planta, as quais contribuem de forma expressiva para a produção vegetal. Abaixo estão listados os principais benefícios das interações rizosféricas que ocorrem entre as plantas e os diferentes grupos de microrganismos.

#### Micorrizas arbusculares:

- Incremento da absorção de água e nutrientes através da rede de hifas que formam no solo;
- Aumento da vida útil das raízes absorventes;
- Solubilização de nutrientes presentes no solo, tornando mais fácil a absorção pela planta;
- Aumento da capacidade fotossintética da planta, aumentando a produção de biomassa vegetal;
- Aumento da resistência das plantas a infecções causadas por patógenos de solo;
- Aumento da tolerância das plantas à presença de metais pesados, elementos e compostos tóxicos;
- Diminuição dos efeitos fitotóxicos causados por algumas moléculas químicas de pesticidas;
- Estímulo ao estabelecimento de outras simbioses microbianas;
- Diminuição de perdas produtivas causadas por estresse ambientais.

### Fungos benéficos rizosféricos

- Controle biológico de fitopatógenos causadores de doenças;
- Promoção de crescimento vegetal;
- Indução da resistência sistêmica em plantas;
- Mudança da composição da microflora nas raízes;
- Melhoria na absorção de nutrientes, como o nitrogênio;
- Aumento da solubilidade de nutrientes no solo;
- Maior desenvolvimento do sistema radicular.

### Bactérias benéficas rizosféricas

- Síntese de fitohormônios e vitaminas;
- Fixação biológica de nitrogênio;
- Solubilização de fósforo inorgânico;
- Exsudação de metabólitos importantes para as inter-relações microbianas;
- Controle biológico de patógenos de solo;
- Maior desenvolvimento do sistema radicular.
- Inibição da síntese do etileno.

## **4.5 Diversidade de fungos micorrízicos**

A taxonomia de fungos micorrízicos arbusculares está em constante atualização e pleno desenvolvimento, especialmente com o auxílio de ferramentas de identificação molecular. Por existirem algumas divergências entre os diferentes grupos de taxonomistas que propõem as alterações e atualizações da lista de gêneros e espécies de fungos micorrízicos arbusculares, são reconhecidas cinco propostas



de classificação dentro do Reino Fungi para este grupo de fungos.

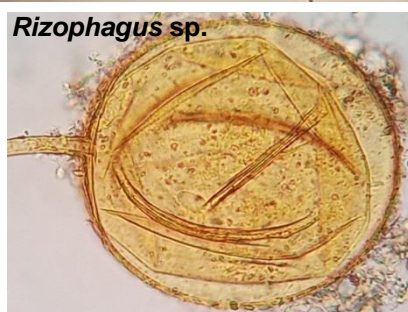
As mais recentes são as classificações propostas por Redecker *et al.* (2013) e por Wijayawardene *et al.* (2018), as quais divergem em número de gêneros e espécies. Neste trabalho, será apresentada a classificação consenso proposta por Redecker *et al.* (2013) (Tabela 2), por ser a classificação utilizada pela equipe responsável pela Coleção Internacional de Cultura de Glomeromycota (CICG) da Universidade Regional de Blumenau, e pelo professor doutor Sidney Luiz Stürmer, criador e curador da CICG (CICG, 2024).

Dentro do Reino Fungi, os fungos micorrízicos arbusculares pertencem ao filo Glomeromycota e à classe Glomeromycetes, composta por quatro ordens: Glomerales, Diversisporales, Archaeosporales e Paraglomerales. Até o mês de dezembro de 2023, já haviam sido descritas 337 espécies de fungos micorrízicos arbusculares.

Alguns esporos micorrízicos pertencentes a espécies de importância agrícola podem ser visualizados na figura 9.

**Tabela 2.** Classificação dos fungos micorrízicos arbusculares dentro do Reino Fungi proposta por Redecker *et al.* (2013).

<b>Ordem</b>	<b>Família</b>	<b>Gênero</b>	
Glomerales	Glomeraceae	Glomus	
		Funneliformis	
		Sclerocystis	
Glomerales	Glomeraceae	Septoglomus	
		Rhizophagus	
Glomerales	Claroideoglomeraceae	Claroideoglomus	
	Diversisporales	Diversisporaceae	Diversispora
Redeckera			
Otopora			
Tricispora			
Corymbiglomus			
Diversisporales	Sacculosporaceae	Sacculospora	
	Acaulosporaceae	Acaulospora	
	Pacisporaceae	Pacispora	
	Diversisporales	Gigasporaceae	Gigaspora
			Scutellospora
Racocetra			
Cetraspora			
Dentiscutata			
Diversisporales	Gigasporaceae	Intraornatospora	
		Paradentiscutata	
		Archaeosporaceae	Archaeospora
Archaeosporales	Ambisporaceae	Ambispora	
	Geosiphonaceae	Geosiphon	
Paraglomerales	Paraglomeraceae	Paraglomus	



**Figura 9.** Esporos de espécies de fungos micorrízicos arbusculares de importância agrícola e ambiental.

Fonte: Gerusa Pauli Kist Steffen, Ricardo Bemfica Steffen

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A diversidade de comunidades microbianas no solo e as interações que ocorrem entre os microrganismos, o solo e as plantas são fundamentais para a qualidade e a sustentabilidade da produção agrícola. Os benefícios das interações entre plantas e microrganismos vão muito além da nutrição vegetal e da ciclagem de nutrientes. Muitas espécies microbianas atuam no controle biológico de fungos, bactérias e nematoides que causam doenças e prejuízos às culturas agrícolas. Outros grupos de microrganismos do solo estimulam o enraizamento e promovem o crescimento vegetal, ampliando a eficiência produtiva das culturas e a tolerância a fatores de estresse. Plantas que se encontram em simbiose ou em algum outro tipo de interação rizosférica com microrganismos benéficos são mais tolerantes ao desenvolvimento de doenças e mais resistentes a condições de estresses ambientais, como déficit hídrico, excesso de temperatura, presença de sais ou elementos tóxicos. Portanto, não há dúvidas sobre a importância e os benefícios da adoção de manejos e tecnologias que estimulem as interações microbianas nos sistemas agrícolas. Considerando o cenário de mudanças climáticas, pressão de pragas e doenças e o aumento dos períodos de estiagem no estado do Rio Grande do Sul nos últimos anos, a microbiologia agrícola representa uma forte aliada dos produtores para amenizar os fatores de estresses bióticos e ambientais, que são responsáveis por perdas significativas de produtividade das mais diversas culturas agrícolas.

## REFERÊNCIAS

AMUNDSON, R. Factors of soil formation in the 21st century. **Geoderma**, Wageningen, v. 391, p. 114960, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114960>.

ANGHINONI, I.; VEZZANI, F. M. Systemic soil fertility as product of system self-organization resulting from management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 45, e0210090, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210090>.

BONFANTE-FASOLO, P. Anatomy and morphology of VA mycorrhizae. In: POWELL, C. L. I.; BAGYARAJ (ed.). **VA Mycorrhiza**. Boca Raton: CRC Press, 1984. p. 3-33.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 13th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2002. 960p.

CAUICH-CAUICH, R. *et al.* Evaluación de consorcios micorrícicos arbusculares nativos en interacción con niveles de fósforo en la promoción del crecimiento y fotosíntesis de *Stevia rebaudiana* Bertoni. **Biotecnia**, Hermosillo, v. 25, n. 1, p. 67-80, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i1.1765>.

CICG: Coleção Internacional de Cultura de Glomeromycota. Blumenau: FURB, 2024. Disponível em: <https://sites.google.com/site/cicgfma/home>. Acesso em: 20 mar. 2024.

DUBOS, R. **Pasteur e a Ciência Moderna**. São Paulo, SP: Edart, 1967. 124p.

DUPONNOIS, R.; GALIANA, A.; PRIN, Y. The mycorrhizosphere effect: a multitrophic interaction complex

improves mycorrhizal symbiosis and plant growth. *In*: SIDDIQUI, Z. A.; AKHTAR, M. S.; FUTAI, K. (ed.). **Mycorrhizae: sustainable agriculture and forestry**. Dordrecht: Springer, 2008. p. 227-240.

GILLER, K. E. *et al.* Regenerative agriculture: an agronomic perspective. **Outlook on Agriculture**, Wageningen, v. 50, n. 1, p. 13-25, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/0030727021998063>.

GRAHAM, J. H.; LINDERMAN, R. G.; MENGE, J. A. Development of external hyphae by different isolates of mycorrhizal *Glomus* spp. in relation to root colonization and growth of troyer citrange. **New Phytologist**, Lancaster, v. 91, n. 2, p. 183-189, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1982.tb03304.x>.

GUZMAN, A. *et al.* Crop diversity enriches arbuscular mycorrhizal fungal communities in an intensive agricultural landscape. **New Phytologist**, Lancaster, v. 231, n. 1, p. 447-459, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.17306>.

HARLEY, J. L. Mycorrhiza and soil ecology. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 23, n. 2, p. 127-158, 1948.

KALAMULLA, R. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable agriculture. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 19, 12250, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912250>.

KANDELER, E. Physiological and biochemical methods for studying soil biota and their functions. *In*: PAUL, E. A.; FREY, S. D. (ed.) **Soil microbiology, ecology and biochemistry**. 5<sup>th</sup> ed. Amsterdam: Elsevier, 2024. p. 193-227. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822941-5.00007-7>.

LIU, A. *et al.* The impacts of domestication and agricultural practices on legume nutrient acquisition through symbiosis

with rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi. **Frontiers in Genetics**, Lausanne, v. 11, 583954, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.583954>.

MASON-JONES, K. *et al.* Intracellular carbon storage by microorganisms is an overlooked pathway of biomass growth. **Nature Communications**, London, v. 14, n. 1, p. 2240, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37713-4>.

MPONGWANA, S. *et al.* Improving soil fertility through dual inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* on a eutric cambisol cultivated with forage legumes in a semi-arid region. **Heliyon**, London, v. 10, n. 2, e24817, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24817>.

OTUN, S.; ACHILONU, I. Recent advances in plant: arbuscular mycorrhizal fungi associations and their application to Cassava crops. *In*: SOUSA, R. N. de (ed.). **Arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture-new insights**. London: IntechOpen, 2023. p. 25-44. DOI: 10.5772/intechopen.104271.

QIN, Y. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium facilitate nitrogen and phosphate availability in soybean/maize intercropping systems. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 23, n. 2, p. 2723-2731, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01229-z>.

REDECKER, D. *et al.* An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). **Mycorrhiza**, Diepnbeek, v. 23, p. 515-531, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y>.

ROBDRUP, M. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi under intercrop, regenerative, and conventional agriculture systems. *In*: AHAMMED, G. J.; HAJIBOLAND, R. (ed.). **Arbuscular**

**mycorrhizal fungi and higher plants:** fundamentals and applications. Singapore: Springer Nature, 2024. p. 287-318.

SCHAEFER, D. A. *et al.* Arbuscular mycorrhiza and sustainable agriculture. **Circular Agricultural Systems**, Fayetteville, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48130/CAS-2021-0006>.

SCHREEFEL, L. *et al.* Regenerative agriculture: the soil is the base. **Global Food Security**, Stuttgart, v. 26, 100404, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>.

SCHULTE, L. A. *et al.* Meeting global challenges with regenerative agriculture producing food and energy. **Nature Sustainability**, London, v. 5, n. 5, p. 384-388, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00827-y>.

SILVA, H. D. D.; MONTOYA, L. V. G. Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. **El Higo Revista Científica**, Estelí, v. 12, n. 2, p. 2-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15196>.

SMITH, S. E.; READ, D. J. (ed.). **Mycorrhizal symbiosis**. 3rd ed. London: Elsevier, 2008. 800 p.

TANG, B. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi benefit plants in response to major global change factors. **Ecology Letters**, Oxford, v. 26, n. 12, p. 2087-2097, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.14320>.

THEPBANDIT, W.; ATHINUWAT, D. Rhizosphere microorganisms supply availability of soil nutrients and induce plant defense. **Microorganisms**, Basel, v. 12, n. 3, p. 558, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030558>.

VUELTA-LORENZO, D. R. *et al.* Irrigation with magnetically treated water on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) inoculated



with arbuscular mycorrhizal fungi. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, San José de las Lajas, v. 32, n. 4, 2023.

WAHAB, A. *et al.* Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. **Plants**, Basel, v. 12, n. 17, p. 3102, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12173102>.

WIJAYAWARDENE, N. N. *et al.* Notes for genera: basal clades of Fungi (including *Aphelidiomycota*, *Basidiobolomycota*, *Blastocladiomycota*, *Calcarisporiellomycota*, *Caulochytriomycota*, *Chytridiomycota*, *Entomophthoromycota*, *Glomeromycota*, *Kickxellomycota*, *Monoblepharomycota*, *Mortierellomycota*, *Mucoromycota*, *Neocallimastigomycota*, *Olpidiomycota*, *Rozellomycota* and *Zoopagomycota*). **Fungal Diversity**, Kunming, v. 92, p. 43-129, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13225-018-0409-5>.

ZEPPA, S. *et al.* *Tilia platyphyllos* Scop.-*Tuber brumale* Vittad. vs. *T. platyphyllos* Scop.-*T. borchii* Vittad. ectomycorrhizal systems: a comparison of structural and functional traits. **Plant Physiology and Biochemistry**, Karlsruhe, v. 43, p. 709-716, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2005.06.008>.

ZHANG, Z.; PENG, X. Bio-tillage: a new perspective for sustainable agriculture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 206, 104844, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104844>.



GOVERNO DO ESTADO  
**RIO GRANDE DO SUL**  
SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA,  
PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL E IRRIGAÇÃO

**Secretaria de Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação**  
**Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária**

Avenida Getúlio Vargas, 1384 - Menino Deus  
CEP 90150-004 - Porto Alegre - RS  
Fone: (51) 3288-8000

[www.agricultura.rs.gov.br/ddpa](http://www.agricultura.rs.gov.br/ddpa)