



**Programa de Pós-Graduação em
Sociedade, Tecnologia e
Meio Ambiente**

UNIVERSIDADE EVANGÉLICA DE GOIÁS – UniEVANGÉLICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SOCIEDADE, TECNOLOGIA E MEIO
AMBIENTE (PPG STMA)

**ATIVIDADE MICORRÍZICA COMO BIOINDICADOR DE
QUALIDADE EM AGROECOSSISTEMAS CONSERVACIONISTAS**

VERONICA MARIA ESTEVÃO SILVA MACHADO

Anápolis - GO
2024

VERONICA MARIA ESTEVÃO SILVA MACHADO

**ATIVIDADE MICORRÍZICA COMO BIOINDICADOR DE
QUALIDADE EM AGROECOSSISTEMAS CONSERVACIONISTAS**

Anápolis - GO
2024

M149

Machado, Veronica Maria Estevão Silva

Atividade micorrízica como bioindicador de qualidade em agroecossistemas conservacionistas / Veronica Maria Estevão Silva Machado - Anápolis: Universidade Evangélica de Goiás, 2024.
29 p.; il.

Orientador: Prof. Dr. Jadson Belém de Moura.

Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em
Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente – Universidade Evangélica
de Goiás, 2024.

Catálogo na Fonte

Elaborado por Hellen Lisboa de Souza CRB1/1570

VERONICA MARIA ESTEVÃO SILVA MACHADO

**ATIVIDADE MICORRÍZICA COMO BIOINDICADOR DE
QUALIDADE EM AGROECOSSISTEMAS CONSERVACIONISTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente (PPSTMA) para fins de avaliação final no curso de especialização *stricto sensu* (mestrado acadêmico) em Ciências Ambientais da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA, como requisito parcial e obrigatório para a obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Jadson Belém de Moura

Anápolis- GO

2024



Programa de Pós-Graduação em
Sociedade, Tecnologia e
Meio Ambiente

FOLHA DE APROVAÇÃO

ATIVIDADE MICORRÍZICA COMO BIOINDICADOR DE QUALIDADE EM AGROECOSSISTEMAS CONSERVACIONISTAS

Veronica Maria Estevão Silva Machado

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Sociedade, Tecnologia e Meio
Ambiente/ PPG STMA da
Universidade Evangélica de Goiás/
UniEVANGÉLICA como requisito
parcial à obtenção do grau de
MESTRE.

Aprovado em 28 de agosto de 2024.

Linha de pesquisa: **Sistemas Agrícolas Sustentáveis**

Documento assinado digitalmente



JADSON BELEM DE MOURA

Data: 28/10/2024 21:02:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jadson Belém de Moura
Presidente/Orientador (UniEVANGÉLICA)

Documento assinado digitalmente



JOAO MAURICIO FERNANDES SOUZA

Data: 28/10/2024 21:28:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Mauricio Fernandes Souza
Examinador Interno (UniEVANGÉLICA)

Documento assinado digitalmente



LEONNARDO CRUVINEL FURQUIM

Data: 28/10/2024 21:14:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonnardo Cruvinel Furquim
Examinador Externo (SENAR/AR-GO)

VERONICA MARIA ESTEVÃO SILVA MACHADO

**ATIVIDADE MICORRÍZICA COMO BIOINDICADOR DE
QUALIDADE EM AGROECOSSISTEMAS CONSERVACIONISTAS**

Anápolis 28/10/2024

Banca examinadora

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Jadson Belém de Moura
Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA.

Membro Externo Titular: Prof. Dr. Leonardo Cruvinel Furquim
Serviço Nacional de Aprendizagem Rural - Senar

Membro Interno Titular: Prof. Dr. João Maurício Fernandes Souza
Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA.

Membro Suplente: Prof.^a Dra. Josana de Castro Peixoto
Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA.

Dedico esse trabalho a Deus que me direcionou a este caminho e me proporcionou realizar um sonho. Dedico também a minha mãe, exemplo de força e amor, e meu combustível para viver.

AGRADECIMENTOS

No decorrer dessa jornada inúmeras pessoas e organizações contribuíram para que fosse possível alcançar meus sonhos e objetivos, dentre as quais agradeço:

Inicialmente a Deus, por ter me direcionado a este caminho e permitido meu desenvolvimento no âmbito acadêmico e profissional.

A minha mãe, Maria Donodett, que sempre esteve comigo nessa trajetória, sendo a principal incentivadora da minha dedicação aos estudos.

Ao meu orientador Professor Jadson Belém de Moura, pela orientação e pelo apoio, atenção e dedicação aos orientandos nesta jornada tão desafiadora; agradeço também ao grupo de estudos SEDMO (Solo, Ecologia e Dinâmica da Matéria Orgânica) que me proporcionou grande aprendizado durante este período.

Aos demais professores do programa de mestrado em Sociedade, tecnologia e meio ambiente da Universidade Evangélica de Goiás pela significativa contribuição e desenvolvimento do conhecimento acadêmico.

Aos meus colegas da Faculdade Evangélica de Goianésia: Ariane, Ivandro, José Mateus, Maísa, Matildes e Rodrigo, por todo incentivo e compreensão nesses anos de caminhada.

À Universidade Evangélica de Goiás, pela estrutura no programa de mestrado em Sociedade Tecnologia e Meio Ambiente.

A todos vocês serei eternamente grata!

*“Quanto mais me aprofundo no conhecimento da ciência, maior é minha crença de que
Deus é perfeito”*

Lucivana Mourão

Sumário

Introdução 12

Metodologia..... 13

Resultados 16

Discussão 1

Conclusões 3

Referências 4

RESUMO

O crescente interesse por sistemas de produção agrícola sustentáveis, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), reflete a urgência em adotar práticas que preservem os recursos naturais e mantenham a biodiversidade. Estes sistemas conservacionistas, ao integrarem cultivo agrícola, pecuária e floresta, otimizam o uso do espaço, promovem a reciclagem de nutrientes e reduzem a erosão do solo. A capacidade de adaptar-se a adversidades climáticas e econômicas e de contribuir significativamente para o sequestro de carbono torna o sistema ILPF especialmente relevante no contexto das mudanças climáticas. O objetivo deste trabalho é investigar a atividade micorrízica do solo como um bioindicador eficaz de qualidade do solo em agroecossistemas conservacionistas, com foco especial no sistema ILPF. Os resultados indicam que a densidade de esporos e a taxa de colonização micorrízica variam significativamente entre diferentes sistemas de manejo, com maiores valores observados em sistemas de manejo convencional e controle, sugerindo que condições de estresse podem estimular a atividade micorrízica. Foi constatado que a biodiversidade de fungos micorrízicos é amplamente sustentada em sistemas conservacionistas, com uma ampla gama de gêneros adaptativos presentes em diferentes configurações de manejo. A atividade micorrízica provou ser um indicador confiável da qualidade do solo, refletindo a eficácia das práticas agrícolas conservacionistas e a saúde do ecossistema. A presença e diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em sistemas ILPF demonstram que práticas de manejo integrado e sustentável podem ser efetivamente monitoradas e ajustadas através de bioindicadores micorrízicos. Isso enfatiza a importância de práticas agrícolas que favoreçam a biodiversidade do solo e, por extensão, a sustentabilidade e resiliência dos agroecossistemas.

Palavras-chave: Fungos Micorrízicos Arbusculares, Agroecossistemas Conservacionistas, Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, Bioindicadores.

ABSTRACT

The growing interest in sustainable agricultural production systems, such as integrated crop-livestock-forestry (ICLF), reflects the urgency of adopting practices that preserve natural resources and maintain biodiversity. These conservation systems, by integrating crop cultivation, livestock, and forestry, optimize the use of space, promote nutrient recycling and reduce soil erosion. The ability to adapt to climatic and economic adversities and to contribute significantly to carbon sequestration makes ICLF systems especially relevant in the context of climate change. The objective of this work is to investigate soil mycorrhizal activity as an effective bioindicator of soil quality in conservation agroecosystems, with a special focus on ICLF systems. The results indicate that spore density and mycorrhizal colonization rate vary significantly between different management systems, with higher values observed in conventional and control management systems, suggesting that stress conditions can stimulate mycorrhizal activity. Mycorrhizal fungal biodiversity was found to be sustained in conservation systems, with a wide range of adaptive genera present in different management settings. Mycorrhizal activity has proven to be a reliable indicator of soil quality, reflecting the effectiveness of conservation agricultural practices and ecosystem health. The presence and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in ICLF systems demonstrate that integrated and sustainable management practices can be effectively monitored and adjusted through mycorrhizal bioindicators. This emphasizes the importance of agricultural practices that favor soil biodiversity and, by extension, the sustainability and resilience of agroecosystems.

Keywords: Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Conservationist Agroecosystems, Crop-Livestock-Forest Integration, Bioindicators.

ATIVIDADE MICORRÍZICA COMO BIOINDICADOR DE QUALIDADE EM AGROECOSSISTEMAS CONSERVACIONISTAS

Introdução

A crescente preocupação com a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola tem incentivado o desenvolvimento de práticas agrícolas mais conservacionistas, que visam a preservação dos recursos naturais e a manutenção da biodiversidade (Jansa et al., 2003; Roldán et al., 2007; Altieri et al., 2015; de Andrade Bonetti et al., 2017). Nesse contexto, os agroecossistemas conservacionistas, como o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), emergem como modelos promissores. Esses sistemas integrados não apenas otimizam o uso do espaço e dos recursos, mas também promovem a reciclagem de nutrientes, a redução da erosão do solo e o aumento da eficiência produtiva.

O sistema ILPF, em particular, representa uma estratégia inovadora para o uso sustentável da terra, combinando a produção agrícola, pecuária e florestal em uma mesma área (Silva et al., 2016; Valani et al., 2021). Este modelo cria um ambiente de produção mais equilibrado e resiliente, capaz de se adaptar às adversidades climáticas e econômicas (Borges et al., 2019). Além disso, a diversificação das atividades reduz os riscos econômicos, enquanto o aumento da cobertura vegetal contribui significativamente para a sequestro de carbono, uma resposta vital às mudanças climáticas (Pacheco et al., 2013).

Os benefícios dos sistemas de ILPF estendem-se diretamente ao solo, à atmosfera e às plantas. No solo, a alternância entre as diferentes culturas e o uso de práticas de manejo conservacionista melhoram a sua estrutura, aumentam a matéria orgânica e favorecem a atividade biológica (Sarto et al., 2020). Para a atmosfera, a maior cobertura vegetal ajuda na captura de gases de efeito estufa, enquanto as práticas de manejo reduzem as emissões de CO₂ provenientes das operações agrícolas (Leite et al., 2023). Já para as plantas, a diversidade de culturas promove uma maior resiliência a doenças e pragas, além de otimizar o uso de recursos hídricos e nutrientes (Pezzopane et al., 2020; Rodrigues et al., 2023).

No entanto, um dos principais desafios enfrentados na implementação e na mensuração dos benefícios dos sistemas de ILPF é a avaliação efetiva de sua sustentabilidade e eficácia. A complexidade dos inter-relacionamentos e

interdependências em sistemas tão diversificados dificulta a quantificação clara dos ganhos ambientais, sociais e econômicos. Portanto, é crucial desenvolver métodos eficazes para monitorar e avaliar esses benefícios de forma integrada e contínua (Stieven et al., 2014; de Andrade Bonetti et al., 2017; Moura et al., 2018).

Nesse sentido, os microrganismos do solo emergem como indicadores valiosos da qualidade ambiental e da saúde do ecossistema. Devido à sua sensibilidade às alterações no ambiente, esses organismos podem refletir as mudanças induzidas pelas práticas de manejo e servir como um termômetro da sustentabilidade do sistema (Stieven et al., 2014; Moura et al., 2018; Wołejko et al., 2020). Entre esses bioindicadores, destacam-se os fungos micorrízicos arbusculares, que estabelecem associações simbióticas com as raízes de muitas plantas cultivadas e desempenham um papel crucial na nutrição e na resistência das plantas (Souza et al., 2016; Silva et al., 2019; Santos et al., 2021).

Os fungos micorrízicos arbusculares são particularmente eficazes como bioindicadores em agroecossistemas conservacionistas devido à sua habilidade de responder a alterações na qualidade do solo, incluindo a disponibilidade de nutrientes e a presença de contaminantes (Abbott and Robson, 1991; Aguilera et al., 2017; Moura et al., 2017, 2022; Moura and Cabral, 2019; Adeyemi et al., 2021; Aker et al., 2022). A atividade micorrízica pode fornecer informações sobre a integridade e a funcionalidade do solo sob práticas de manejo integrado, sendo um indicador potencial da saúde do ecossistema (Silva et al., 2019; Santos et al., 2021).

Diante deste cenário, o objetivo deste trabalho é explorar a atividade micorrízica do solo como um bioindicador de qualidade em agroecossistemas conservacionistas, como o ILPF.

Metodologia

O estudo foi realizado em áreas localizadas na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – FEPE do Instituto de Ensino Superior de Rio Verde – IESRIVER/Faculdade Unibrás – Rio Verde - GO, na seguinte localização geográfica 17,75° S e 50,93° W, com 765 m de altitude. O solo predominante das áreas de estudo é classificado como Latossolo Vermelho (dos Santos et al., 2018), de textura muito argilosa (63% de argila, 12% de silte e 25% de areia). O clima da região é classificado como Aw tropical (Alvares et al., 2014), temperatura média anual é de 27,5 °C, com chuva nos meses de outubro a maio e seca de junho a setembro, com precipitações variando de 1.500 a 1.800 mm anuais.

Nos tratamentos avaliados, o material forrageiro utilizado foi o híbrido BRS RB331 Ipyporã, (*Urochloa brizantha* x *Urochloa ruziziensis*), também fez-se o uso do sorgo forrageiro BRS655 (*Sorghum bicolor*) e mudas de eucalipto do clone AEC-2111 (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*), o espaçamento dos eucaliptos, nos tratamentos com o componente arbóreo, foram de 22 metros entre renques e 2 metros entre plantas, com linha simples, com 227 árvores por hectare e 9,09% da área ocupada pelas árvores. O manejo da fertilidade solo seguiu as recomendações propostas por Sousa & Lobato(SOUSA & LOBATO, 2004), para todos os tratamentos, exceto para o Controle. Os tratamentos avaliados, estão detalhados a seguir:

T1) Controle: pastagem degradada com mais de 30 anos de uso extensivo - 1,36 UA/ha (com 507 dias de pastejo);

T2) Pasto adubado: calagem e adubação na pastagem degradada sem preparo prévio do solo - 1,68 UA ha⁻¹ (com 507 dias de pastejo);

T3) Convencional: plantio da braquiária Ipyporã com preparo convencional do solo e adubação - 2,05 UA ha⁻¹ (com 355 dias de pastejo) - uma fenação e pastejo posteriormente;

T4) Integração lavoura-floresta (ILF): preparo do solo convencional, cultivo de eucalipto consorciado com frutícolas e olerícolas - banana (*Musa* sp., subgrupo Prata), abacaxi Pérola (*Ananas comosus*) e melancia (*Citrullus lanatus*); como olerícola a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). Não houve pastejo animal.

T5) Integração pecuária-floresta (IPF): cultivo de eucalipto consorciado com braquiária Ipyporã para pastejo imediato proporcionado pela construção de cercas em torno dos renques de eucalipto - 2,68 UA ha⁻¹ (com 507 dias de pastejo);

T6) Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF feno): cultivo de eucalipto consorciado com braquiária Ipyporã para feno com duas fenações e pastejo, posteriormente, quando os eucaliptos atingiram 6 mm de DAP (diâmetro na altura do peito) - 4,15 UA ha⁻¹ (com 157 dias de pastejo);

T7) Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF silagem): cultivo de eucalipto consorciado com braquiária Ipyporã e sorgo forrageiro para silagem com duas colheitas e pastejo, posteriormente, quando os eucaliptos atingiram 6 mm de DAP (diâmetro na altura do peito) - 3,26 UA ha⁻¹ (com 157 dias de pastejo).

Em cada ambiente de estudo, foram coletadas amostras compostas (formadas por 11 amostras simples) do solo nas camadas de 0,00 - 0,20 m, totalizando 16 amostras compostas de solo por sistema. Para as avaliações de Química de solo, adotou-se a

metodologia descrita pela Embrapa (da Silva & DA SILVA, 2009). O pH foi determinado em água utilizando-se proporções de 1:2,5 (v/v) de solo: solução. Os cátions trocáveis (Ca^{2+} e Mg^{2+}), extraídos em KCl 1 mol L^{-1} , determinados por espectrometria de absorção atômica. O Al^{3+} , extraído por KCl 1 mol L^{-1} , foi determinado volumetricamente por titulação com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$. A acidez potencial foi determinada após extração com acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 7,0, sendo o H^+ e Al quantificados por titulação com NaOH . P , K^+ e Na^+ foram extraídos por extrator Mehlich¹, determinando-se o K^+ e o Na^+ por fotometria de chama e o P por colorimetria. A partir dos resultados obtidos do complexo sortivo, foram calculados os valores para soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions total (CTC) e efetiva (t), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%).

Os atributos químicos do solo, no ato da implantação do experimento, que caracterizaram a fertilidade da área de reforma de pastagens com o uso de sistemas integrados, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios dos teores de pH, fósforo (P), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), matéria orgânica (MO), soma das bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m), zinco (Zn), argila, silte e areia antes da implantação dos tratamentos. Rio Verde – GO, 2019.

Tratamento	pH	P	S	K	Ca	Mg	MO	SB	CTC	V	m
	CaCl_2	mg dm^{-3}			cmolc dm^{-3}		g dm^{-3}	cmolc dm^{-3}		%	
Controle	5,10	2,00	3,27	0,16	2,23	1,77	44,00	4,16	7,86	51,95	0,00
Pasto Adubado	5,00	0,93	2,1	0,36	1,05	1,03	38,75	2,43	5,48	43,70	0,00
Convencional	5,03	1,05	4,6	0,24	1,38	1,15	37,50	2,76	6,34	41,97	4,90
ILF¹	4,90	1,77	2,73	0,21	1,03	0,97	33,67	2,21	5,84	36,00	9,94
IPF²	5,00	1,45	3,1	0,22	1,20	1,10	34,67	2,52	6,02	40,86	4,97
ILPF³ feno	5,10	1,13	3,47	0,23	1,37	1,23	35,67	2,83	6,19	45,72	0,00
ILPF³ silagem	5,10	1,7	3,03	0,24	1,33	1,20	36,50	2,77	5,72	48,13	0,00
Média	5,03	1,43	3,18	0,23	1,37	1,21	37,25	2,81	6,21	44,05	2,83

¹: Integração lavoura-floresta; ²: Integração pecuária-floresta; ³: Integração lavoura-pecuária-floresta.

O delineamento experimental foi de blocos casualizados, sendo sete tratamentos e oito repetições. Para a determinação da porcentagem de colonização, as raízes foram clarificadas e coradas com 0,05% de Azul-de- Trypan em lactoglicerol (Phillips & Hayman, 1970), 1970) e a avaliação da colonização foi feita em microscópio estereoscópico, seguindo a técnica de interseção dos quadrantes (Giovannetti & Mosse, 1980). Para a identificação dos gêneros de FMAs a partir das características morfológicas, os esporos foram separados de acordo com seus morfotipos e montados

em lâminas com polivinil-lacto-glicerol (PVLG) puro e PVLG misturados com Melzer (1:1 v/v). Para subsidiar o trabalho de identificação, foram utilizados artigos originais da descrição das espécies e descrições das espécies fornecidas no site da “International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi” (INVAM, 2022).

Os dados foram submetidos à análise de variância, teste tukey a 5% de probabilidade, e as análises estatísticas foram realizadas pelo software Agrostat (Agrostat, 2020) e as análises de clusters, correspondência canônica, e índices de diversidade foram realizadas pelo software Past (Hammer, 2021).

Resultados

Foi verificada diferenças estatísticas ao se verificar a densidade de esporos no solo e a taxa de colonização micorrízica em raiz de plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionistas (Figura 1).

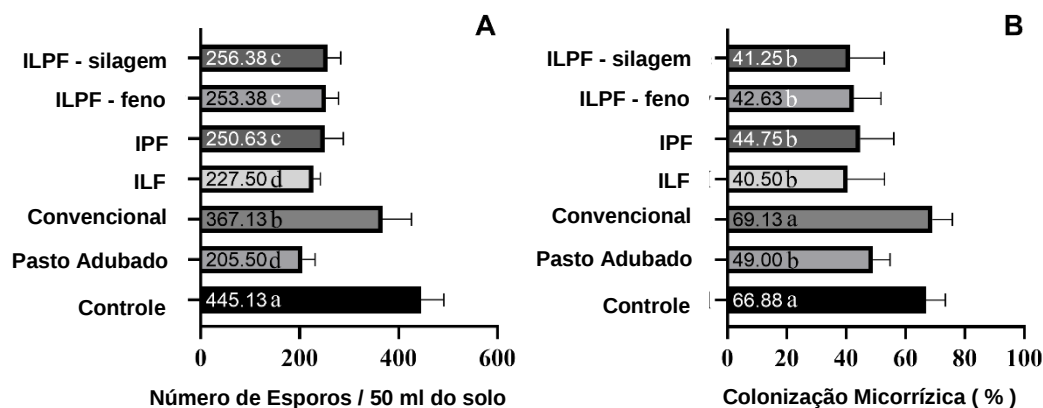


Figura 1. Densidade de esporos (A) e taxa de colonização micorrízica (B) de fungos micorrízicos arbusculares associados a plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionistas.

O tratamento controle foi aquele que apresentou maiores valores de densidade de esporos quando comparado aos demais tratamentos, seguido do tratamento de cultivo em sistema convencional (Figura 1A). Os valores de colonização micorrízica também seguem o mesmo padrão de resultados que a densidade de esporos (Figura 1B), onde o tratamento controle e cultivo convencional apresentaram as maiores médias de colonização.

Tabela 2. Gêneros de fungos micorrízicos arbusculares identificados em rizosfera de plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionistas.

Tratamento	Controle	Pasto Adubado	Convencional	ILF	IPF	ILPF - Feno	ILPF - Silagem
<i>Acaulospora</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Ambispora</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Archaeospora</i>	+	+	+	+	+	+	-
<i>Cetraspora</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Claroideoglomus</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Dentiscutata</i>	+	+	+	+	-	+	+
<i>Diversispora</i>	+	+	+	+	+	+	-
<i>Entrophospora</i>	-	+	+	+	+	+	-
<i>Funneliformis</i>	+	+	+	+	+	+	-
<i>Gigaspora</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Glomus</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Paraglomus</i>	-	+	+	-	+	+	-
<i>Racocetra</i>	+	+	+	+	+	-	-
<i>Rhizophagus</i>	+	+	+	+	+	+	-
<i>Scutellospora</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>Septoglomus</i>	+	+	+	+	+	-	-

A tabela 2 lista os gêneros de fungos micorrízicos arbusculares encontrados na rizosfera de plantas dos tratamentos investigados. Gêneros como *Acaulospora*, *Ambispora*, e *Claroideoglomus* estão presentes em todos os sistemas avaliados, sugerindo uma ampla adaptação destes fungos a diferentes condições de manejo. Contudo, alguns gêneros, como *Archaeospora* e *Racocetra*, são menos frequentes, o que pode indicar especificidades relacionadas às condições de solo e vegetação de cada sistema.

A análise de componentes principais (Figura 2) agrupa os tratamentos de acordo com a composição e abundância de fungos micorrízicos.

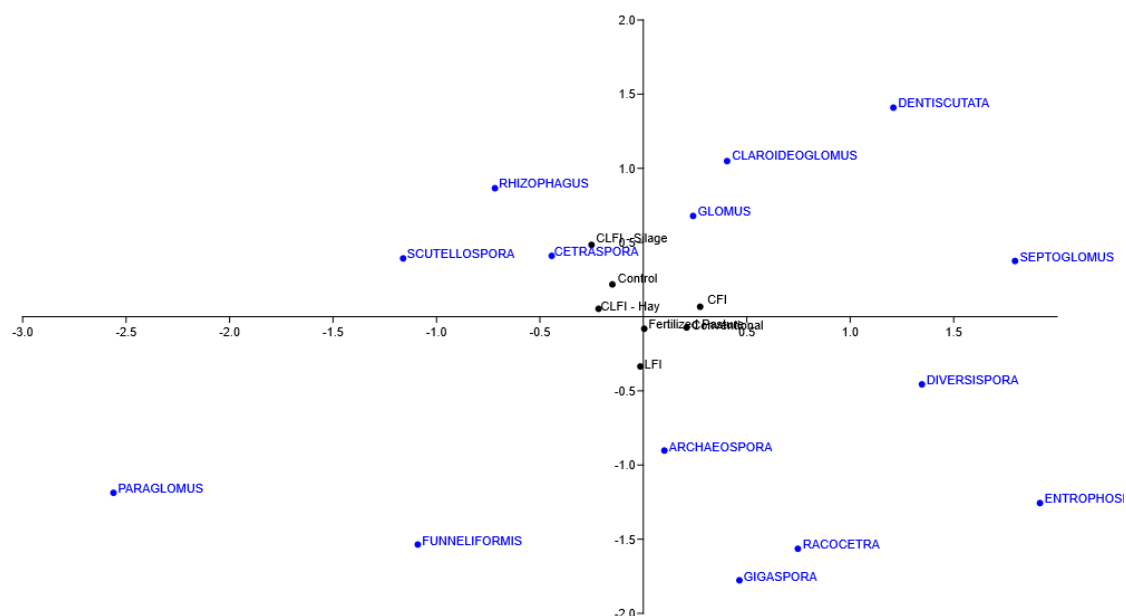


Figura 2. Análise de componentes principais de fungos micorrízicos arbusculares associados à plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionistas.

Esta análise sugere uma distinção clara entre os sistemas de manejo, refletindo como diferentes práticas agrícolas afetam a comunidade de micorizas. Os gêneros *Scutellospora* e *Glomus*, *Cetraspota*, *Rhizophagus* e *Claroideoglomus* são os que apresentam maior proximidade com todos os sistemas investigados. O Gênero *Paraglomus* apresenta menor afinidade ao se observar todos os tratamentos.

A Figura 3 apresenta uma Análise de Correspondência Canônica (CCA) dos fungos micorrízicos arbusculares associados às plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionista. Esta análise apresenta as relações entre os sistemas de cultivo e a comunidade de fungos micorrízicos no solo.

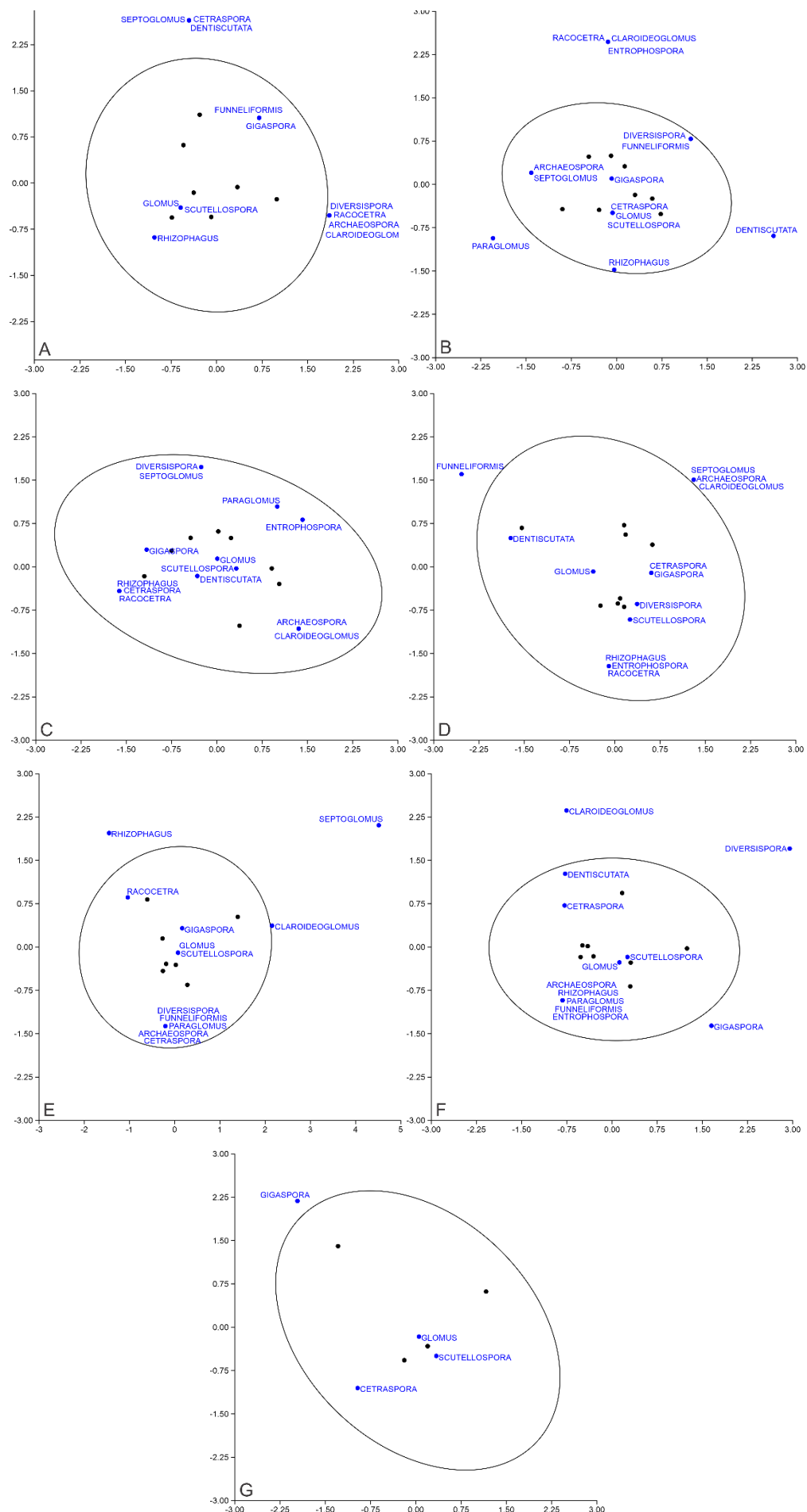


Figura 3. Análise de correspondência canônica de fungos micorrízicos arbusculares associados às plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionistas. Controle (A), Pasto adubado (B), Convencional (C), ILF (D), IPF (E), ILPF – feno (F) e ILPF – silagem (G).

A figura ilustra como diferentes práticas de manejo influenciam a comunidade micorrízica, com pontos que representam cada sistema agrupados de forma a refletir as similaridades e diferenças em termos de comunidades fúngicas presentes. Os gêneros que estão localizados dentro das elipses são frequentemente encontrados associados à rizosfera das plantas submetidas daquele tratamento, os gêneros fora da elipse são encontrados casualmente associados, apresentando baixa correlação com o tratamento.

A figura 4 mostra o agrupamento em Clusters de Gêneros de fungos micorrízicos arbusculares associados às plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionistas.

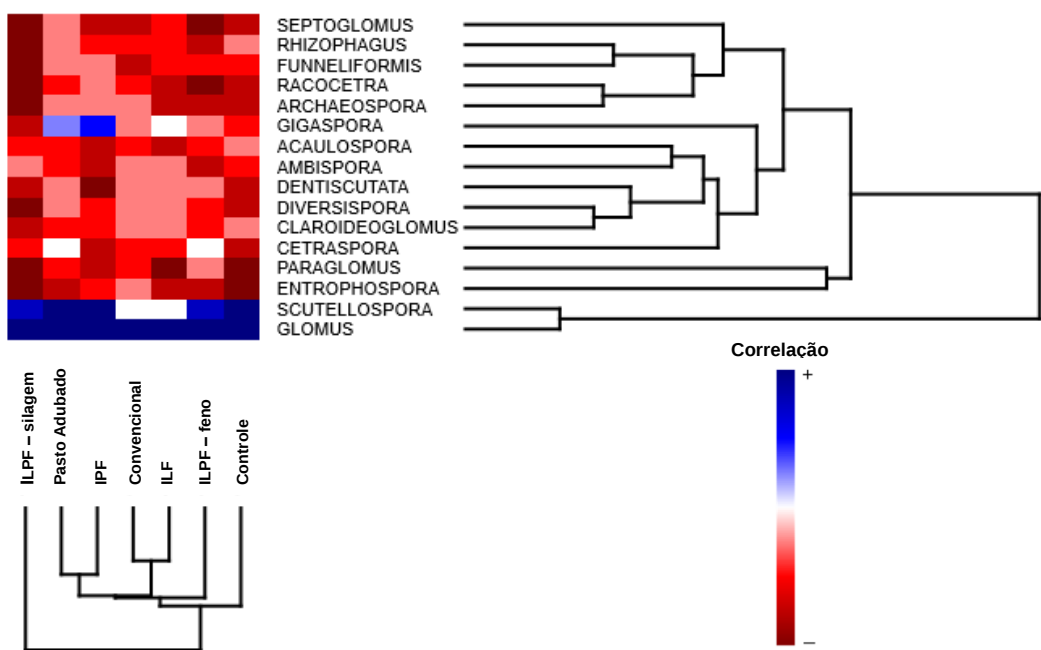


Figura 4. Agrupamento em Clusters de Gêneros de fungos micorrízicos arbusculares associados às plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionistas.

Os índices de diversidade de Simpson (1-D) e Shannon (Figura 5) para as comunidades de fungos micorrízicos nas rizosferas estudadas.

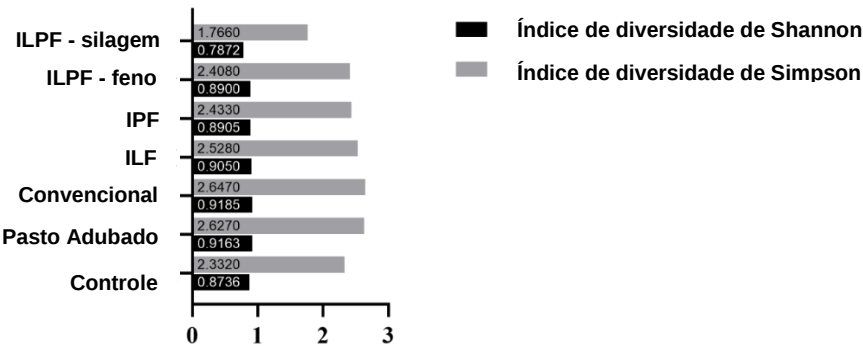


Figura 5. Índices de diversidade de Simpson (1-D) e Shannon de organismos em rizosfera de fungos micorrízicos arbusculares associados às plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionistas.

O Índice de Shannon H leva em conta não apenas a riqueza de espécies (número de espécies diferentes), mas também a equabilidade (uniformidade da distribuição das espécies). Valores mais altos indicam maior diversidade e distribuição mais uniforme das espécies na comunidade. Os índices de diversidade são maiores no tratamento de cultivo convencional e menores nos sistemas ILPF para silagem.

Discussão

A figura 1 apresenta os valores de Densidade de esporos (A) e taxa de colonização micorrízica (B) de fungos micorrízicos arbusculares associados às plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionistas. O tratamento controle e o cultivo convencional apresentaram as maiores médias tanto na densidade de esporos quanto na taxa de colonização micorrízica. De modo geral, a atividade micorrízica elevada é um indicador de estresse ambiental nas plantas (Begum et al., 2019a). Quando submetidas a condições inóspitas de desenvolvimento, as plantas se abrem a processos simbióticos com os fungos micorrízicos. Isso sugere que o tratamento controle e convencional promoveram condições mais estressantes que os demais tratamentos. Sistemas conservacionistas apresentam uma série de benefícios para o solo e para planta. O não revolvimento do solo melhora condições físicas como porosidade, agregação, infiltração de água e aeração, que proporcionam para planta um ambiente menos estressante (Balesdent et al., 2000; Abdollahi et al., 2014; de Andrade Bonetti et al., 2017). Estas práticas de manejo trazem benefícios para o desenvolvimento vegetal, o que pode refletir em uma baixa atividade micorrízica, visto que os processos de estresse é que estimulam uma maior atividade destes fungos no solo e na raiz (Abdollahi et al., 2014; Alguacil, 2015).

Esses resultados reforçam a importância de escolher práticas de manejo que favoreçam a biodiversidade do solo, especialmente em sistemas integrados como o ILPF, que visam a sustentabilidade a longo prazo.

A presença de múltiplos gêneros identificados (tabela 2) em quase todos os tratamentos sugere que os agroecossistemas conservacionistas, independentemente das práticas específicas, podem suportar uma diversidade razoável de fungos micorrízicos arbusculares.

Isso destaca a adaptabilidade desses fungos a diferentes condições de manejo (Begum et al., 2019b). A ocorrência variada de alguns gêneros, como *Archaeospora* e *Racocetra*, que não foram encontrados em todos os tratamentos, indica que alguns gêneros não possuem afinidade com os sistemas investigados.

A biodiversidade de fungos encontrada reflete a capacidade do solo de suportar uma rede micorrízica complexa, essencial para a saúde das plantas e a resiliência do agroecossistema. Sistemas com maior diversidade de Gêneros podem melhorar a eficiência na absorção de nutrientes e estresses bióticos e abióticos (Balestrini et al., 2016; Bencherif et al., 2021; Balacco et al., 2022). A presença ou ausência de certos gêneros pode ser utilizada como indicadores biológicos para avaliar a qualidade do solo em resposta a diferentes práticas agrícolas. Isso é fundamental para a gestão sustentável e para a tomada de decisões baseadas em evidências no contexto agrícola (Souza et al., 2016; Santos et al., 2021).

A figura 2 apresenta uma Análise de Componentes Principais (PCA) dos gêneros identificados nos diferentes sistemas de manejo de solo. A PCA separa os diferentes sistemas de manejo, refletindo como as práticas específicas afetam a composição da comunidade de fungos micorrízicos. Os gêneros posicionados próximos aos sistemas de manejo do solo dentro do gráfico indicam tratamentos que compartilham uma composição micorrízica semelhante, sugerindo que práticas específicas promovem comunidades de fungos comparáveis.

A Figura 3 ilustra como os sistemas de manejo se correlacionam com a presença e a distribuição de diferentes gêneros de fungos micorrízicos. A análise de correspondência canônica (CCA) destaca que algumas práticas de manejo podem favorecer ou desfavorecer certos gêneros micorrízicos. Gêneros como *Glomus* e *Scutellospora* estão frequentemente associados a uma ampla gama de condições ambientais, o que reflete sua capacidade de adaptação. Na CCA, esses gêneros aparecem próximos aos sistemas de manejo que mantêm uma perturbação mínima, como sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (Silva et al., 2016), sugerindo que práticas de manejo que preservam a integridade do solo favorecem sua proliferação (de Araujo et al., 2022). Os *Acaulospora* e *Ambispora* também mostram flexibilidade, aparecendo em várias configurações de manejo. Eles estão associados tanto aos sistemas mais intensivos quanto aos conservacionistas, indicando que podem suportar um espectro mais amplo de perturbações do solo.

Os gêneros *Racocetra* e *Archaeospora* tendem a aparecer em condições específicas de manejo que podem incluir práticas de manejo orgânico ou reduzido uso de insumos químicos. Estes gêneros podem ser mais sensíveis às condições do solo e aparecem em sistemas onde a qualidade do solo é mantida sem grandes perturbações (Santos et al., 2021; Moura et al., 2022).

A Figura 4 do seu documento apresenta o agrupamento em clusters de gêneros de fungos micorrízicos arbusculares associados a plantas cultivadas em diferentes sistemas de produção conservacionista. Gêneros como *Glomus* e *Acaulospora*, que são amplamente adaptáveis, tendem a formar um cluster que abrange múltiplos sistemas de manejo. Isto sugere que tais gêneros são resilientes a uma variedade de práticas agrícolas. Gêneros mais especializados como *Scutellospora* e *Racocetra* podem aparecer em clusters menores ou mais isolados, indicando uma preferência por condições de solo ou manejo mais específicas, como aquelas encontradas em sistemas de manejo menos intensivos ou mais diversificados.

Os índices de Simpson e Shannon mostrados na Figura 5 fornecem uma medida quantitativa da diversidade dentro das comunidades micorrízicas nos diferentes tratamentos. Altos valores indicam uma comunidade diversificada, o que geralmente é associado a ecossistemas mais saudáveis e resilientes. A variação nos índices entre os diferentes tratamentos de manejo sugere que algumas práticas podem ser mais benéficas para manter ou aumentar a biodiversidade micorrízica.

Conclusões

O estudo realizado sobre os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e suas variações mostram que esses modelos são eficazes para a produção agrícola sustentável. A atividade dos fungos micorrízicos arbusculares se mostrou um indicador sensível e eficaz da qualidade do solo, refletindo a saúde do ecossistema e a eficácia das práticas agrícolas conservacionistas.

A diversidade e a densidade desses fungos variam de acordo com as práticas de manejo do solo, indicando que sistemas que podem apresentar condições mais estressantes, como os tratamentos controle e convencional, promovem uma maior atividade micorrízica. Esta é uma adaptação das plantas a condições adversas, facilitada pela simbiose com micorrizas, que é crucial para a absorção de nutrientes e para a resiliência das plantas. Além disso, foi

observado que as práticas conservacionistas implementadas nos sistemas ILPF suportam uma diversidade significativa de fungos micorrízicos, beneficiando a saúde do solo e a resiliência do agroecossistema.

A composição variada de gêneros micorrízicos em diferentes sistemas de manejo reflete uma rede micorrízica complexa e adaptável, capaz de melhorar a eficiência na absorção de nutrientes e aumentar a resistência a estresses bióticos e abióticos.

Referências

- Abbott, L. K., and Robson, A. D. (1991). Factors influencing the occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 35, 121–150. doi: 10.1016/0167-8809(91)90048-3
- Abdollahi, L., Schjøning, P., Elmholt, S., and Munkholm, L. J. (2014). The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability. *Soil Tillage Res.* 136, 28–37. doi: 10.1016/j.still.2013.09.011
- Adeyemi, N. O., Atayese, M. O., Sakariyawo, O. S., and Azeez, J. O. (2021). Mycorrhizal growth and phosphorus responses of tropical soybean (*Glycine max* L.) cultivars differ with arbuscular mycorrhizal fungi isolates and phosphorus application rates in a derived-savanna zone of Nigeria. *J. Plant Nutr.* 0, 1–17. doi: 10.1080/01904167.2021.1994593
- Agrostat (2020). AGROSTAT - Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro. Available at: <http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm> (Accessed April 9, 2020).
- Aguilera, P., Marín, C., Oehl, F., Godoy, R., Borie, F., and Cornejo, P. (2017). Selection of aluminum tolerant cereal genotypes strongly influences the arbuscular mycorrhizal fungal communities in an acidic Andosol. *Agric. Ecosyst. Environ.* 246, 86–93. doi: 10.1016/j.agee.2017.05.031
- Aker, A. M., Caproni, A. L., Berbara, R. L. L., Rodolfo, J., Granha, D. D. O., Silva, C. F. D., et al. (2022). ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI IN THE CERRADO BIOME: EFFECTS OF LAND USE SYSTEM, SOIL TEXTURE, AND SEASONALITY. *Rev Caatinga* 35, 11.
- Alguacil, M. M. (2015). The Impact of Tillage Practices on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Diversity in Subtropical Crops THE IMPACT OF TILLAGE PRACTICES ON ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGAL DIVERSITY IN SUBTROPICAL CROPS. 18, 527–536.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., and Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 869–890. doi: 10.1007/s13593-015-0285-2

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes, J. L. G., and Sparovek, G. (2014). *Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift* 22 (6) 711–728.
- Balacco, J. R., Vaidya, B. P., Hagmann, D. F., Goodey, N. M., and Krumins, J. A. (2022). Mycorrhizal Infection Can Ameliorate Abiotic Factors in Urban Soils. *Microb. Ecol.* doi: 10.1007/s00248-021-01945-y
- Balesdent, J., Chenu, C., and tillage Research, M. B.-S., and 2000, U. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Elsevier*, 215–230.
- Balestrini, R., Salvioli, A., Dal Molin, A., Novero, M., Gabelli, G., Paparelli, E., et al. (2016). Impact of an arbuscular mycorrhizal fungus versus a mixed microbial inoculum on the transcriptome reprogramming of grapevine roots. *Mycorrhiza*, 1–14. doi: 10.1007/s00572-016-0754-8
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., et al. (2019a). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Front. Plant Sci.* 10, 1068. doi: 10.3389/fpls.2019.01068
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., et al. (2019b). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Front. Plant Sci.* 10. doi: 10.3389/fpls.2019.01068
- Bencherif, K., Laruelle, F., Dalpé, Y., and Lounès-Hadj Sahraoui, A. (2021). Inoculum Sources Modulate Mycorrhizal Inoculation Effect on *Tamarix* & *articulata* Development and Its Associated Rhizosphere Microbiota. *Plants* 10, 2716. doi: 10.3390/plants10122716
- Borges, W. L. B., Calonego, J. C., and Rosolem, C. A. (2019). Impact of crop-livestock-forest integration on soil quality. *Agrofor. Syst.* 93, 2111–2119. doi: 10.1007/s10457-018-0329-0
- da Silva, F. C., and DA SILVA, F. C. (2009). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos Available at: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496> (Accessed April 18, 2024).
- de Andrade Bonetti, J., Anghinoni, I., de Moraes, M. T., and Fink, J. R. (2017). Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. *Soil Tillage Res.* 174, 104–112. doi: 10.1016/j.still.2017.06.008
- de Araujo, W. A., OLIVEIRA, J. de M., MATOS, P., SIQUEIRA, M. de B., CARVALHO, M. de M., MACHADO, P. de A., et al. (2022). Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) aumenta o estoque de carbono orgânico do solo. Available at: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1151394/1/sjt-p53.pdf> (Accessed April 29, 2024).

- dos Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., dos Anjos, L. H. C., de Oliveira, V. Á., Lumbleras, J. F., Coelho, M. R., et al. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos.*, 3rd Edn. Brasília: Embrapa. Available at: <http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00053080.pdf>
- Giovannetti, M., and Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytol.* 84, 489–500. doi: 10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x
- Hammer, Ø. (2021). Past 4.x - PAleontological STatistics.
- INVAM (2022). International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi | West Virginia University. *Int. Cult. Collect. Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi*. Available at: <https://invam.ku.edu/>
- Jansa, J., Mozafar, A., Kuhn, G., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I. R., et al. (2003). SOIL TILLAGE AFFECTS THE COMMUNITY STRUCTURE OF MYCORRHIZAL FUNGI IN MAIZE ROOTS. *Ecol. Appl.* 13, 1164–1176. doi: 10.1890/1051-0761(2003)13[1164:STATCS]2.0.CO;2
- Leite, F. F. G. D., Nobrega, G. N., Baumgärtner, L. C., Alecrim, F. B., da Silveira, J. G., Cordeiro, R. C., et al. (2023). Greenhouse gas emissions and carbon sequestration associated with Integrated Crop–Livestock–Forestry (ICLF) systems. *Environ. Rev.* 31, 589–604.
- Moura, J. B. de, Ramos, M. L. G., Konrad, M. L. de F., Saggin Júnior, O. J., Ribeiro Junior, W. Q., Carvalho, A. M. de, et al. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi in the soil using cover crops with and without nitrogen addition. *Front. Plant Sci.* 13. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.1054484> (Accessed August 9, 2023).
- Moura, J. B., and Cabral, J. S. R. (2019). “Mycorrhizas in Central Savannahs: Cerrado and Caatinga,” in *Mycorrhizal Fungi in South America*, eds. M. C. Pagano and M. A. Lugo (Cham: Springer International Publishing), 193–202. doi: 10.1007/978-3-030-15228-4_10
- Moura, J. B. D., RIBEIRO, D. A., LOPES FILHO, L. C., SOUZA, R. F. D., and FURQUIM, L. C. (2017). Arbuscular mycorrhizas in sugarcane under planting systems and sources of nitrogen. *Sci. Agrar.* 18, 20–29. doi: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v18i3.50722>
- Moura, J. B., Ventura, M. V. A., Vieira Junior, W. G., Souza, R. F., Lopes Filho, L. C., Braga, A. P. M., et al. (2018). Microbial diversity as a soil quality indicator in agroecosystems in Brazilian Savannas. *Afr. J. Agric. Res.* 13, 1306–1310. doi: 10.5897/ajar2018.13205
- Pacheco, A. R., Chaves, R. de Q., and Nicoli, C. M. L. (2013). Integration of crops, livestock, and forestry: a system of production for the Brazilian Cerrados. Available at:

- <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/959993> (Accessed April 18, 2024).
- Pezzopane, J. R. M., Bonani, W. L., Bosi, C., da Rocha, E. L. F., de Campos Bernardi, A. C., Oliveira, P. P. A., et al. (2020). Reducing competition in a crop–livestock–forest integrated system by thinning eucalyptus trees. *Exp. Agric.* 56, 574–586.
- Phillips, J. M., and Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55, 158–161. doi: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3
- Rodrigues, R. de A. R., Ferreira, I. G. M., da Silveira, J. G., da Silva, J. J. N., Santos, F. M., and da Conceição, M. C. G. (2023). “Crop-Livestock-Forest Integration Systems as a Sustainable Production Strategy in Brazil,” in *Sustainability Challenges of Brazilian Agriculture: Governance, Inclusion, and Innovation*, (Springer), 165–182. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-29853-0_9 (Accessed April 18, 2024).
- Roldán, A., Salinas-García, J. R., Alguacil, M. M., and Caravaca, F. (2007). Soil sustainability indicators following conservation tillage practices under subtropical maize and bean crops. *Soil Tillage Res.* 93, 273–282. doi: 10.1016/j.still.2006.05.001
- Santos, J. M. dos, Silva, S. D. e, Braga, A. P. M., Souza, R. F. de, Lima, I. R., Lopes, H. P., et al. (2021). Mycorrhizal activity as a quality indicator in the use of mining slag as soil conditioner. *Afr. J. Microbiol. Res.* 15, 89–94. doi: 10.5897/AJMR2020.9465
- Sarto, M. V., Borges, W. L., Sarto, J. R., Rice, C. W., and Rosolem, C. A. (2020). Root and shoot interactions in a tropical integrated crop–livestock–forest system. *Agric. Syst.* 181, 102796.
- Silva, A. M. M., Ramos, M. L. G., Nascimento, R. S. de M. P. do, Silva, A. do N., Silva, S. B., Cardoso, E. J. B. N., et al. (2019). Soil quality indicators under management systems in a Quilombola community in the Brazilian Cerrado. *Sci. Agric.* 76, 518–526. doi: 10.1590/1678-992x-2018-0008
- Silva, A. R., Sales, A., and Veloso, C. A. C. (2016). Atributos físicos e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), Homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará, Brasil. *Embrapa Amaz. Orient.-Artigo Em Períód. Indexado ALICE*.
- SOUSA, D. M. G. de, and LOBATO, E. (2004). *Cerrado: correção do solo e adubação*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. Available at: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/555355> (Accessed April 18, 2024).
- Souza, B. R., Moura, J. B., Oliveira, T. C., Ramos, M. L. G., and Lopes Filho, L. C. (2016). Arbuscular Mycorrhizal fungi as indicative of soil quality in conservation systems in the region of vale do São Patrício, Goiás. *Int. J. Curr. Res.* 8, 43307–43311.

- Stieven, A. C., Oliveira, D. A., Santos, J. O., Wruck, F. J., and Campos, D. T. da S. (2014). Impacts of integrated crop-livestock-forest on microbiological indicators of soil. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár.* 9, 53–58.
- Valani, G. P., Martíni, A. F., da Silva, L. F. S., Bovi, R. C., and Cooper, M. (2021). Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. *Soil Use Manag.* 37, 22–36. doi: 10.1111/sum.12667
- Wołejko, E., Jabłońska-Trypuć, A., Wydro, U., Butarewicz, A., and Łozowicka, B. (2020). Soil biological activity as an indicator of soil pollution with pesticides – A review. *Appl. Soil Ecol.* 147, 103356. doi: 10.1016/j.apsoil.2019.09.006