

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

ELISIANE MARTINS DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO A BASE DE BIOCHAR E
TRICHODERMA spp. PROVENIENTES E APLICADOS NO
SISTEMA DE PRODUÇÃO DE UVA**

RECIFE

2025

Elisiane Martins de Lima
Engenheira Agrônoma

Desenvolvimento de produto a base de biochar e *Trichoderma* spp. provenientes e aplicados no sistema de produção de uva

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo.

Orientadora: Dra. Érika Valente de Medeiros

Coorientadores: Dr. Argemiro Pereira Martins
Dr. Mairon Moura da Silva

**Recife
2025**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

L732d Lima, Elisiane Martins de.
Desenvolvimento de produto a base de biochar e *Trichoderma* spp. provenientes e aplicados no sistema de produção de uva / Elisiane Martins de Lima. – Recife, 2025.
89 f.; il.

Orientador(a): Érika Valente de Medeiros.
Co-orientador(a): Argemiro Pereira Martins.
Co-orientador(a): Mairon Moura da Silva.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Microorganismos do solo. 2. Enzimas. 3. Qualidade do solo. 4. Uva 5. *Trichoderma*. I. Medeiros, Érika Valente de, orient. II. Martins, Argemiro Pereira, coorient. III. Silva, Mairon Moura da, coorient. IV. Título

CDD 631.4

ELISIANE MARTINS DE LIMA

Desenvolvimento de produto a base de biochar e *Trichoderma* spp. provenientes e aplicados no sistema de produção de uva

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo.

Aprovada em 26 de Março de 2025

Profa. Dra. Érika Valente de Medeiros

Orientadora

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

Dr. Carlos Alberto Fragoso de Souza

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

Dra. Jamilly Alves de Barros

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

Prof. Dr. Claude Hammecker

Soil- Agrosystem-Hydrosytem

À Deus o criador do universo,

Aos meus queridos pais, Eli e Josely, que estiveram ao meu lado desde o início da minha trajetória, oferecendo encorajamento nos momentos mais desafiadores.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e iluminação em cada passo desta jornada, permitindo-me superar desafios e conquistar mais uma vitória.

A minha família, pois sem eles nada disso seria possível, sou eternamente agradecida pelos incentivos, carinho, amor, compreensão, apoio e principalmente por acreditar no meu potencial.

À FACEPE, pela concessão da bolsa e pelo suporte fundamental à realização deste trabalho.

À minha orientadora Érika Valente de Medeiros pela orientação, companheirismo e amizade, que tornou esse processo ainda mais enriquecedor.

Ao meu Coorientador Argemiro Martins Pereira Filho, pela paciência, dedicação e amizade.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pelo suporte nas pesquisas, e à Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), pelo acolhimento e oportunidades oferecidas.

Agradeço à coordenação da pós-graduação, em especial, à Prof. Dra. Giselle Fracetto. Sua prontidão em esclarecer dúvidas e orientar assegurou uma preparação e defesa sem empecilhos.

Aos meus grandes amigos, Thallyta Espíndola, Jamilly Alves, Diogo Paes, Sabrina Esposito, Maciel Tavares, Matheus Filipe, Everlaine Leopoldino, Maria Renái, Marianne Feitoza, Ernando Luís, Rafaela Felix, Ediclecia Andressa, Alberto Passos, Romero, Janailson, Carlos, Elisandra, Edimaíris, Carlos Fragoso e Gessyka Campos, pelo Carinho apoio e incentivo.

A todos os membros do LEMA, pelo trabalho conjunto e pela troca de experiências enriquecedoras.

Aos meus amigos do curso de Doutorado, Ângelo, Isabel, Joel, Jackson, Karina, Avete, Pablo, Pâmella, Rayanna, Suellen e Verônica, muito agradecida pelos grandes momentos de aprendizado.

Ao Sr. Jair, Sr. Léo e Sr. Josa, pelas palavras de encorajamento, as quais me fizeram chegar até aqui.

Aos professores da Universidade Federal Rural de Pernambuco, especialmente aos Professores Jean e Felipe Fracetto pela dedicação em transmitir conhecimentos valiosos e por contribuir para a realização deste sonho.

Agradeço imensamente à secretária Isabella pela paciência, pelas orientações valiosas e pela eficiência na resolução de problemas ao longo do processo.

Expresso minha imensa gratidão ao Prof. José Romualdo de Sousa Lima pelo apoio inestimável e pelas valiosas contribuições ao longo de toda minha trajetória na pós-graduação.

Ao Prof. Gustavo Pereira Duda, pelo compartilhamento do Laboratório de Análises Químicas e Ambientais, essencial para a realização das análises químicas.

Agradeço aos técnicos de laboratório, Martonne, Maria Camilla, Adriana, Felipe e Natana, pelo apoio essencial na realização das análises químicas e físicas conduzidas nos laboratórios.

Agradeço à vinícola Vale das Colinas por abrir suas portas e disponibilizar o espaço necessário para a execução deste projeto.

Por fim, agradeço a todos, indistintamente, que atravessaram a minha vida desde então e contribuíram de alguma forma para a realização deste sonho.

EPÍGRAFE

“Sou feita de retalhos.

Pedacinhos coloridos de cada vida que passa pela minha e que vou costurando na alma.

Nem sempre bonitos, nem sempre felizes, mas me acrescentam e me fazem ser quem eu sou.

Em cada encontro, em cada contato, vou ficando maior...

Em cada retalho, uma vida, uma lição, um carinho, uma saudade...

Que me tornam mais pessoa, mais humana, mais completa.

E penso que é assim mesmo que a vida se faz: de pedaços de outras gentes que vão se tornando parte da gente também.

E a melhor parte é que nunca estaremos prontos, finalizados...

Haverá sempre um retalho novo para adicionar à alma.

Portanto, obrigada a cada um de vocês, que fazem parte da minha vida e que me permitem engrandecer minha história com os retalhos deixados em mim.

Que eu também possa deixar pedacinhos de mim pelos caminhos e que eles possam ser parte das suas histórias.

E que assim, de retalho em retalho, possamos nos tornar, um dia, um imenso bordado de "nós".

Regina Souza

“Posso todas as coisas naquele que me fortalece”.

Filipenses 4:13

Desenvolvimento de Produto a Base de Biochar e *Trichoderma* spp. Provenientes e Aplicados no Sistema de Produção de Uva

RESUMO GERAL

O crescimento populacional tem aumentado a demanda por alimentos gerando grandes volumes de resíduos agrícolas e agroindustriais. O manejo sustentável desses resíduos representa um desafio para a implementação de práticas agrícolas eficientes e sustentáveis. Neste sentido, o reaproveitamento de resíduos, especialmente na forma de biochar, produto rico em carbono, pode beneficiar as propriedades do solo e reduzir impactos ambientais. Embora o biochar se destaque pela versatilidade em sistemas agrícolas e ambientais, a interação com microrganismos do solo, especialmente com o gênero *Trichoderma*, ainda precisa ser melhor compreendida. Espécies de *Trichoderma* são amplamente reconhecidos pela eficiência no controle biológico de fitopatógenos e pelo papel como promotores do crescimento vegetal. No entanto, estudos que abordem a interação do biochar e do *Trichoderma* são escassos, necessitando de maiores investigações para compreender os impactos na microbiota edáfica. Para preencher essa lacuna, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos do biochar produzido a partir do engaço da uva e resíduos da fermentação da uva, aplicado em conjunto com *Trichoderma aureoviride* URM 5158 e *Trichoderma hamatum* URM 6656 em solos cultivados com videiras. Os experimentos foram conduzidos no campo em blocos ao acaso com nove tratamentos e três repetições. Foram avaliados atributos químicos e microbiológicos dos solos e a produtividade das videiras. Os resultados demonstraram que a aplicação de biochar e *Trichoderma* em solo cultivado com uvas Cabernet Sauvignon, promoveram alterações na estrutura e na diversidade das comunidades microbianas. Curiosamente, as variáveis químicas do solo, como pH, Na⁺ e K⁺, atribuídas a entradas de biochar no solo, desempenharam um papel modulador na estrutura das comunidades microbianas, favorecendo determinados grupos em detrimento de outros. A nível de filo, as comunidades fúngicas foram predominantemente compostas por Ascomycota, Basidiomycota, Chytridiomycota e Glomeromycota, filos essenciais na decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes. Por outro lado, ao avaliar os efeitos da aplicação de biochar e *Trichoderma* em videiras da variedade Malbec, sobre os atributos químicos e enzimáticos do solo, nossos resultados revelaram que ambos os tratamentos promoveram alterações significativas nas propriedades do solo. Os maiores incrementos foram observados com a co-aplicação do biochar da fermentação da uva (GFB) e *T. hamatum* (GFB+Th), resultando em aumentos expressivos de 569,23% no carbono da biomassa microbiana (MBC), no carbono orgânico total (TOC) 60,73% e no teor de potássio (K) 86,70%. Além disso, a aplicação isolada do biochar GFB elevou a atividade da fosfatase ácida em 38,76%, enquanto sua co-aplicação com *T. hamatum* aumentou a atividade da β -glicosidase em 56,46%. Esses achados são relevantes para a viticultura, pois indicam que o uso combinado de biochar e *Trichoderma* pode se apresentar como estratégia eficaz para melhorar a saúde do solo, promovendo o equilíbrio microbiológico e a disponibilidade de nutrientes.

Palavras-chave: Microbioma do solo. Enzimas do solo. Qualidade do solo. *Vitis vinifera*.

Product Development Based on Biochar and *Trichoderma* spp. Sourced from and Applied in the Grape Production System

GENERAL ABSTRACT

Population growth has increased the demand for food, leading to the generation of large volumes of agricultural and agro-industrial residues. The sustainable management of these residues poses a challenge to the implementation of efficient and sustainable agricultural practices. In this context, the reuse of residues particularly in the form of biochar, a carbon-rich product can enhance soil properties and reduce environmental impacts. Although biochar stands out for its versatility in agricultural and environmental systems, its interaction with soil microorganisms, especially those belonging to the *Trichoderma* genus, still needs to be better understood. *Trichoderma* species are widely recognized for their efficiency in the biological control of phytopathogens and their role as plant growth promoters. However, studies addressing the interaction between biochar and *Trichoderma* remain scarce, requiring further investigation to understand their impacts on soil microbiota. To fill this gap, the present study aimed to evaluate the effects of biochar produced from grape stalks and fermentation residues, applied in combination with *Trichoderma aureoviride* URM 5158 and *Trichoderma hamatum* URM 6656, in soils cultivated with grapevines. Field experiments were conducted using a randomized block design with nine treatments and three replicates. Chemical and microbiological soil attributes and grapevine productivity were evaluated. The results showed that the application of biochar and *Trichoderma* in soil cultivated with Cabernet Sauvignon grapes led to changes in the structure and diversity of microbial communities. Interestingly, soil chemical variables such as pH, Na⁺, and K⁺ attributed to the biochar input played a modulatory role in the structure of microbial communities, favoring certain groups over others. At the phylum level, fungal communities were predominantly composed of *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Chytridiomycota*, and *Glomeromycota* key phyla in organic matter decomposition and nutrient cycling. On the other hand, when evaluating the effects of biochar and *Trichoderma* application on Malbec grapevines with regard to soil chemical and enzymatic attributes, our results revealed that both treatments significantly altered soil properties. The greatest increases were observed with the co-application of grape fermentation biochar (GFB) and *T. hamatum* (GFB+Th), resulting in expressive increases of 569.23% in microbial biomass carbon (MBC), 60.73% in total organic carbon (TOC), and 86.70% in potassium (K) content. Additionally, the isolated application of GFB biochar increased acid phosphatase activity by 38.76%, while its co-application with *T. hamatum* enhanced β -glucosidase activity by 56.46%. These findings are relevant to viticulture, as they indicate that the combined use of biochar and *Trichoderma* may serve as an effective strategy for improving soil health by promoting microbiological balance and increasing nutrient availability.

Keywords: Soil Microbiome. Soil Enzymes. Soil Quality. *Vitis vinifera*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa da área experimental, vinícola Vale das colinas em Garanhuns- PE.....	41
Figura 2- Análise de correlações canônicas incluindo variáveis químicas e enzimáticas e a	
atrás de distância UniFrac das comunidades fúngicas de solo submetido a nove tratamentos.	
.....	47
Figura 3- Variação nos números de ASVs (a), diversidade de Shannon (b) e índices de	
riqueza das comunidades fúngicas para cada tratamento (c).	48
Figura 4- Análise de associações entre variáveis bioquímicas e os índices de alfa-	
diversidade. Polígonos com asterisco (*) indicaram correlações de Spearman significativas	
(p-valor < 0.05) de acordo com análise de permutação multivariada (999 permutações).	49
Figura 5- Abundância relativas dos táxons mais abundantes dentro dos seis ranks	
taxonômicos. Os dez principais grupos foram demonstrados nas barras para filo, classe,	
ordem e família, enquanto os quinze mais abundantes foram demonstrados para gênero e	
espécie.....	50
Figura 6- Correlações das variáveis bioquímicas com os principais táxons fúngicos.	
Apenas ranks taxonômicos que apresentaram níveis significativos foram plotados.	
Polígonos com asterisco (*) indicaram correlações de Spearman significativas (p-valor <	
0.05) de acordo com análise de permutação multivariada (999 permutações).	51
Figura 7- Análises de abundância diferencial entre os principais gêneros e espécies.	
Apenas ranks taxonômicos que apresentaram níveis significativos foram plotados. Apenas	
os táxons ao nível de gênero (a) e espécie (b) apresentaram respostas significativas quanto	
a abundância diferencial (p < 0.05).....	52
Figura 8- Árvore de coocorrência de espécies fúngicas com interações significativas na	
rede.....	53
Figura 9- Mapa da área experimental vinícola vale das colinas, Garanhuns, PE.	70
Figura 10- Atributos químicos e biológicos do solo submetido a diferentes fontes de	
biochar e isolados de Trichoderma e cultivado com videiras da cultivar Malbec.	74
Figura 11- Atividades enzimáticas absolutas do solo submetido a diferentes fontes de	
biochar e isolados de Trichoderma, cultivado com plantas de uva da cultivar Malbec.....	75

Figura 12- Atividades enzimáticas específicas por unidade de carbono orgânico do solo (SOC) em solo submetido a diferentes fontes de biochar e isolados de Trichoderma e cultivado com plantas de uva da cultivar Malbec	76
Figura 13- Produtividade de videiras Malbec cultivadas em solo tratado com diferentes fontes de biochar e isolados de Trichoderma.....	77
Figura 14- Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis de planta e solo tratadas com diferentes fontes de biochar e isolados de Trichoderma em videiras de Malbec.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades químicas do solo da área cultivada com videiras Cabernet Sauvignon.	42
Tabela 2- Caracterização química dos biochars de engaçó e fermentação da uva Cabernet.	43
Tabela 3- Propriedades químicas da área cultivada com videiras Malbec.	69
Tabela 4- Caracterização química dos biochars de engaçó e fermentação da uva Malbec.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREMA- Associação Brasileira de resíduos e meio ambiente

Al- Alumínio

C/N- Carbono/nitrogênio

Ca- Cálcio

CBM- Carbono de biomassa microbiana

CO₂- Dióxido de carbono

Control- Controle

COT- Carbono orgânico total

CTC- Capacidade de troca catiônica

DNA- Ácido desoxirribonucleico

Fe- Ferro

GEE- gases de efeito estufa

GFB- Biochar fermentação da uva

GFB+Ta- Biochar fermentação da uva + *Trichoderma aureoviride*

GFB+Th- Biochar fermentação da uva + *Trichoderma hamatum*

GSB- Biochar engaçó da uva

GSB+Ta- Biochar engaçó da uva + *Trichoderma aureoviride*

GSB+Th- Biochar engaçó da uva + *Trichoderma hamatum*

K- Potássio

MAP- molibdovanafosfórico

Mg- Magnésio

mm- milímetros

Mn- Manganês

N₂O- Óxido nitroso

Na- Sódio

P- Fósforo

pH- Potencial de hidrogênio

T.aureoviride- *Trichoderma aureoviride*

T.hamatum- *Trichoderma hamatum*

UTOs-Unidades taxonômicas operacionais

Zn- Zinco

Pers- Christiaan Hendrik Persoo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	19
1.1 Hipóteses	21
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
2. CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Biochar e suas contribuições para mitigar os impactos ambientais.....	22
2.2 Efeitos do biochar nas propriedades químicas e físicas do solo.....	23
2.3 Impacto do biochar na comunidade microbiana do solo	25
Referências	29
3. Capítulo II: Modulação da Comunidade FÚNGICA em Solos de Vinhedo Tratados com Biochar e <i>Trichoderma</i>	37
Resumo	37
Abstract	38
3.1 Introdução	39
3.2 Material e Métodos.....	41
3.2.1 Área de estudo.....	41
3.2.2 Produção e caracterização do biochar	42
3.2.3 Preparo dos Inóculos de <i>Trichoderma</i>	43
3.2.4 Delineamento experimental	43
3.2.5 Amostragem do solo rizosférico	44
3.2.6 Extração e sequenciamento de DNA	44
3.2.7 Processamento de dados brutos das sequências genéticas	45
3.2.8 Análise Estatística	46
3.3 Resultados	46
3.3.1 Análise de interação entre os fatores ambientais e os principais táxons.....	46
3.3.2 Avaliação da diversidade com os índices de Shannon e Simpson.....	48
3.3.3 Abundância relativa dos táxons mais abundantes	49

3.4 Discussão	54
3.4.1 Estrutura da comunidade fúngica	54
3.4.2 Composição da comunidade fúngica.....	55
3.4.3 Impacto da aplicação do biochar e Trichoderma nas redes de comunidades microbianas	57
3.5 Conclusões.....	58
Referências	59
4.CAPÍTULO III: BIOCHAR E <i>TRICHODERMA</i> MODIFICAM PROPRIEDADES QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DE UM SOLO CULTIVADO COM UVA MALBEC	65
Resumo	65
Abstract	66
4.1 Introdução	67
4.2 Material e Métodos	69
4.2.1 Área de estudo e delineamento experimental	69
4.2.2 Produção e caracterização do biochar	70
4.2.3 Preparo e inoculação dos Trichoderma	71
4.2.4 Amostragem de solo e análise química	72
4.2.5 Biomassa microbiana e Atividades Enzimáticas	72
4.2.6 Avaliação da produtividade das uvas	72
4.2.7 Análises estatísticas	73
4.3 Resultados.....	73
4.3.1 Alterações nas propriedades químicas e microbiológicas do solo	73
4.4 Discussão	79
4.5 Conclusões.....	82
Referências	83
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89

1. INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos, o biochar, resultante da pirólise de diferentes tipos de biomassas, tem despertado considerável interesse, devido ao seu potencial na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, contribuindo para o sequestro de carbono e redução de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a aplicação no solo é amplamente reconhecida por melhorar propriedades importantes, como ajuste do pH, aumento da capacidade de retenção de água, melhorias na agregação do solo e aumento da capacidade de troca de cátions. Esses efeitos contribuem para a fertilidade do solo, estimulando a atividade microbiana e criando ambientes favoráveis ao crescimento das plantas. Embora os efeitos positivos do biochar no solo sejam amplamente reconhecidos, o impacto no solo pode variar conforme o tipo de biomassa e suas propriedades físico-químicas. Essas variações influenciam diretamente a microbiota edáfica, resultando em alterações tanto na composição, quanto na atividade funcional microbiana.

Os microrganismos do solo desempenham funções essenciais nos ecossistemas, atuando na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem de nutrientes, processos que dependem diretamente da disponibilidade de carbono. A incorporação de biochar no solo pode contribuir como fonte de carbono para os microrganismos, facilitando seu metabolismo e promovendo o estabelecimento da microbiota no solo. Além disso, sua estrutura altamente porosa cria micro-habitats que oferecem abrigo e proteção. As interações entre biochar e microrganismos benéficos, como *Trichoderma* spp., têm sido exploradas com o objetivo de maximizar seu potencial na melhoria da qualidade do solo. No entanto, a interação específica entre biochar e espécies de *Trichoderma* Pers. ainda é pouco compreendida, exigindo maior investigação.

Espécies de *Trichoderma* são amplamente distribuídas no solo como sapróbio, no entanto, apresentam alta capacidade de colonizar diversos substratos e interagir positivamente com a rizosfera e até mesmo manter associações endofíticas com plantas. Apresentando alta diversidade genética e funcional, esses fungos são reconhecidos por seu papel como agente de biocontrole de fitopatógenos, apresentando mecanismos de ação como antibiose, competição e micoparasitismo. Além desses efeitos, várias espécies estão envolvidas na promoção de crescimento de plantas, através da produção de metabólitos

bioativos, compostos orgânicos voláteis e hormônios que estimulam o crescimento radicular, além de atuar na solubilização de nutrientes, aumentando sua disponibilidade para as plantas. Ademais, esses fungos desempenham papel importante na ativação de mecanismos de resistência induzida nas plantas, aumentando a capacidade de defesa contra fitopatógenos e estresses ambientais. Os efeitos do *Trichoderma* sobre as culturas evidenciam seu potencial como bioinsumo agrícola, tornando-se uma alternativa ao uso de produtos comerciais e destacando-se como aliado essencial para o aumento da produtividade das culturas.

A cultura da uva (*Vitis vinifera*) desempenha um papel importante no cenário econômico e social, destacando-se entre as culturas irrigadas com maior potencial de crescimento e valorização no mercado. Com ampla adaptabilidade, a videira é capaz de se desenvolver em ampla variedade de solos e condições climáticas. No entanto, a produtividade pode ser afetada por diversos fatores abióticos, incluindo variações climáticas, déficit hídrico, baixos teores de matéria orgânica e limitações na fertilidade do solo. Para enfrentar esses desafios e promover a sustentabilidade da viticultura, uma estratégia promissora é a valorização de resíduos agroindustriais como matéria prima para produção de biochar. A incorporação desses insumos podem contribuir para o aumento de carbono disponível no solo, melhorando as propriedades químicas, físicas e biológicas, e reduzindo os impactos ambientais causadas pelo uso excessivo de insumos sintéticos, favorecendo uma produção eficiente e sustentável.

Nesse contexto, a combinação de biochar e *Trichoderma* pode representar uma alternativa eficiente para as demandas por sistemas agrícolas ecológicos, eficientes e economicamente viáveis, especialmente na viticultura, no estado de Pernambuco, considerado um dos principais polos de produção e exportação do Brasil. Além de contribuir para a destinação sustentável de resíduos que, de outra forma, seriam passivos ambientais, agregando valor a esses materiais. Essa abordagem está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), destacando-se por contribuir para a segurança alimentar e na promoção da agricultura sustentável (ODS 2), o acesso à água potável e ao saneamento a todos (ODS 6), oferta de energia acessível e limpa (ODS 7), consumo e produção responsáveis (ODS 12), ação contra as mudanças climáticas (ODS 13) e a proteção da vida terrestre (ODS 15). Assim, a aplicação de produtos à base de biochar e *Trichoderma* tornam-se fundamentais para impulsionar práticas agrícolas mais regenerativas, inovadoras e comprometidas com a sustentabilidade ambiental, econômica e social.

1.1 Hipóteses

1. Associação de biochar com o fungo *Trichoderma* spp. melhoram a diversidade e atividade microbiana de arenosos e a produção de uva;
2. O uso do biochar e *Trichoderma* influenciam a diversidade e composição de comunidades microbianas no solo;
3. Biochar e *Trichoderma* melhoram a disponibilidade de nutrientes para as plantas;
4. Biochars provenientes de resíduos da produção de uva possuem características que melhora a qualidade dos solos cultivados com uva.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos da aplicação do biochar produzido a partir do engaço da uva e resíduos da fermentação da uva, aplicado em conjunto com *Trichoderma aureoviride* URM 5158 e *Trichoderma hamatum* URM 6656 em solo cultivado com videiras.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Selecionar fungos do gênero *Trichoderma* com potencial bioinoculante;
- Produzir dois tipos de biochar e realizar a caracterização química;
- Avaliar a viabilidade de crescimento dos *Trichoderma* nos diferentes tipos de biochars;
- Realizar experimento em campo com solo cultivado com uva tratado com os bioinsumos produzidos à base de biochar e *Trichoderma* spp;
- Avaliar o microbioma do solo cultivado com uva e tratado com diferentes biochars e *Trichoderma*, por meio da amplificação do gene 18S rRNA;
- Verificar os impactos sobre os microrganismos do solo através da determinação de atributos químicos e atividades enzimáticas.

2. CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biochar e suas contribuições para mitigar os impactos ambientais

O aumento das atividades agrícolas, devido à crescente demanda por produção de alimentos, têm resultado em uma geração expressiva de resíduos ao longo dos anos. Em 2022, o Brasil produziu cerca de 34,91 milhões de toneladas de resíduos orgânicos, consolidando essa categoria como uma das principais no panorama de resíduos sólidos do país (ABREMA, 2023). O manejo adequado desses resíduos, originados de restos de colheitas e subprodutos industriais, representa um grande desafio para a implementação de práticas agrícolas eficientes e sustentáveis. Por outro lado, esses resíduos possuem um grande potencial de reaproveitamento, podendo ser convertidos em insumos agrícolas e produtos de alto valor agregado, como o biochar, que oferece benefícios tanto para o solo quanto para a mitigação de impactos ambientais (MEDEIROS et al., 2020; IDBELLA et al., 2024).

O biochar é um produto rico em carbono, resultante do processo da pirólise de resíduos orgânicos, submetidos a baixas concentrações ou ausência de oxigênio (SUN et al., 2021). A composição e estrutura são altamente heterogêneas, pois variam de acordo com a biomassa utilizada e as condições do processo de pirólise, resultando em produtos com diferentes propriedades físico-químicas. No entanto, algumas propriedades são comuns a todos os biochars, incluindo a alta área superficial específica (RUAN et al., 2025), o elevado teor de carbono e o alto grau de estruturas aromáticas, características que explicam a notável recalcitrância, as quais são fundamentais para a estabilidade química dos biochars (TRAZZI et al., 2018). Outras características, comuns dos biochars são, coloração escura e o pH alcalino, diferentes destas, a quantidade e a disponibilidade de nutrientes podem variar conforme a composição da biomassa e as condições específicas da pirólise.

A biomassa é um fator determinante na estruturação morfológica do biochar, influenciando diretamente a porosidade. Durante o processo de pirólise, ocorrem modificações estruturais que resultam na formação de microporos (<2 nm), mesoporos (2-50 nm) e macroporos (>50 nm) (CARDOSO JÚNIOR et al., 2022). Essa complexa rede porosa confere ao biochar elevada área superficial e capacidade de retenção de água e nutrientes. Os macroporos preservados da estrutura original da biomassa, também desempenham papel essencial na condução de soluções e na interação do biochar com o

solo (ARAYEDH et al., 2025), contribuindo para melhorias na aeração e no armazenamento de água no solo. Além disso, o aumento da porosidade e da área de superfície durante o processo de pirólise, aliado à capacidade de adsorver tanto solutos orgânicos quanto inorgânicos, torna o biochar uma alternativa eficaz na remediação de solos e águas contaminados por esses solutos (LU et al., 2020; CHEN et al., 2022).

O biochar tem se destacado como estratégia eficiente na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), atuando como sumidouro de carbono. A aplicação de biochar no solo pode reduzir significativamente a liberação de gases como dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O), contribuindo para a sustentabilidade ambiental (NAZIM et al., 2025). Estima-se que, até o ano de 2030, o biochar possa sequestrar aproximadamente 1 bilhão de toneladas de carbono anualmente (LI et al., 2023). Estudos revelam que, a aplicação de 1 tonelada de biochar pode sequestrar 2,0 a 2,6 toneladas de CO_2 do ambiente (YANG et al., 2020; GINEBRA et al., 2022), uma vez que, a incorporação de biochar no solo reduz a emissão de CO_2 atmosférico armazenado no solo, compensando as emissões de combustíveis fósseis (COWIE et al., 2024).

Pesquisas recentes revelaram que a assimilação de biochar nos solos diminuiu as emissões de GEE no milho (YANG et al., 2020), arroz, trigo (HE et al., 2024), sorgo (GINEBRA et al., 2022) e cevada (DUAN et al., 2020), no entanto, a redução das taxas de emissão desses gases dependem da biomassa utilizada na produção do biochar, das doses de aplicação e temperatura de pirólise.

2.2 Efeitos do biochar nas propriedades químicas e físicas do solo

O biochar tem emergido como alternativa sustentável, de baixo custo e bastante eficaz na melhoria das propriedades químicas do solo. Além de atuar como fonte de carbono e nutrientes, sua aplicação contribui para o aumento do pH do solo (SILVA et al., 2022; BISWASH et al., 2024). Essa alteração do pH do solo é decorrente da natureza alcalina da maioria dos biochars, cuja superfície reativa sofre protonação, resultando no acúmulo de cargas positivas. Esse processo intensifica a capacidade de troca aniônica, aumentando a retenção e a disponibilização de nutrientes essenciais para as plantas, favorecendo, assim, a melhoria da fertilidade do solo (DOMINGUES et al., 2020; YUAN et al., 2023; ADHIKARI et al., 2024).

A incorporação do biochar no solo exerce um impacto significativo na capacidade de troca de cátions (CTC), uma propriedade essencial dos constituintes minerais e orgânicos do solo. Grande parte dos biochars possui uma capacidade de troca de cátions

(CTC) relativamente elevada, resultado de sua carga superficial negativa e afinidade com os cátions do solo (GONDEK et al., 2019; TAN et al., 2020). Esse efeito é particularmente acentuado em biochars produzidos em baixas temperaturas, que apresentam diversos grupos funcionais, como lactonas e carboxilas, capazes de interagir de forma eficiente com os cátions do solo (PEIRIS et al., 2021). Além disso, o biochar funciona como uma fonte de macro e micronutrientes, graças ao seu alto valor nutricional. No entanto, os níveis desses nutrientes dependem das condições do processo de pirólise, uma vez que parte dos elementos presentes na biomassa pode ser perdida durante a queima (LI et al. 2023; ZOU et al., 2023). A temperatura da pirólise desempenha um papel importante na formação e distribuição dos poros no biochar, influenciando diretamente sua capacidade de retenção de água no solo, especialmente em solos arenosos (SÁNCHEZ-REINOSO et al., 2020). Além disso, a temperatura é um dos fatores mais importantes na produção do biochar, pois determina a maioria de suas propriedades físico-químicas, que, por sua vez, impactam diretamente os atributos do solo.

O biochar exerce uma função importante na melhoria dos atributos físicos do solo, promovendo alterações que impactam positivamente sua dinâmica e funcionalidade. A retenção de água, uma propriedade essencial do solo, está diretamente relacionada à conectividade e distribuição dos poros, os quais são modulados pela textura, estrutura e teor de matéria orgânica. A incorporação do biochar ao solo contribui para o aumento da porosidade (LI et al., 2020), melhora a aeração (FOULADIDORHANI et al., 2023), reduz a densidade e aumenta a estabilidade dos agregados (PANG et al., 2023), contribuindo para o fortalecimento da coesão interna dos agregados. Além de aumentar a condutividade hidráulica e as taxas de infiltração de água, melhorando a eficiência do manejo hídrico do solo (IRFAN et al., 2017).

As melhorias na estrutura e na dinâmica do solo promovidas pela aplicação do biochar tem um impacto direto no desenvolvimento das plantas, especialmente no crescimento radicular. O biochar contribui para o aumento da disponibilidade de água e oxigênio no solo favorecendo a expansão do sistema radicular, permitindo uma exploração mais eficiente do solo e maior absorção de nutrientes, resultando em plantas com crescimento mais vigoroso e uma maior resiliência a condições adversas (CARDOSO JÚNIOR et al., 2022). Dessa forma, torna-se evidente que as interações do biochar com o solo influenciam diretamente os processos hidrológicos, os quais são essenciais para a manutenção da funcionalidade do ecossistema edáfico. No entanto, é necessário aprofundar

a compreensão dos mecanismos e da magnitude dessas influências, visando otimizar sua aplicação e potencializar os benefícios para o solo.

2.3 Impacto do biochar na comunidade microbiana do solo

As comunidades microbianas do solo apresentam uma grande diversidade, abrigando dezenas de milhares de espécies bacterianas e milhares de espécies fúngicas em apenas um grama de solo. Essa diversidade microbiológica desempenha um papel fundamental nos processos ecológicos, e na promoção dos serviços ecossistêmicos (MOULIN-ROUYARD et al., 2024), os quais tem impacto direto na qualidade dos solos. No entanto, as atividades dos microrganismos são altamente sensíveis às mudanças ambientais (YANG et al., 2023), que podem ser alteradas pela aplicação de biochar no solo, entretanto, o impacto do biochar no microbioma do solo varia conforme o tipo de solo (YU et al., 2018), a taxa de aplicação (ZHAO et al., 2024) e o tamanho das partículas (CHEN et al., 2017).

Por apresentar estruturas porosas, o biochar fornece excelentes abrigos com condições ideais que permitem maiores taxas de sobrevivência para os microrganismos (ZHANG et al., 2022), contra seus predadores. Além disso, a alta porosidade do biochar melhora a aeração do solo, criando condições favoráveis para o crescimento de microrganismos aeróbicos favorecendo a decomposição da matéria orgânica no solo. A aplicação do biochar também melhora a integração e proliferação microbiana no solo e na rizosfera das plantas (AZEEM et al., 2021). Estudos recentes, revelam que a aplicação de biochar ao solo aumenta tanto a diversidade quanto a atividade microbiana (HARDY; KNIGHT, 2021; ZHAO et al., 2022; ZHAO et al., 2024; BAI et al., 2025), e influenciam na composição das comunidades (LAN et al., 2024). No entanto, as respostas das comunidades microbianas às aplicações de biochar no solo são bastante variáveis a curto prazo (XU et al., 2021; BRTNICKY et al., 2021).

O biochar tem sido estudado como um potencial aliado no controle de fitopatógenos de solo, devido as suas propriedades físicas-químicas e seus efeitos indiretos na microbiota do solo. Seu impacto na redução de doenças de plantas ocorre por diversos mecanismos, que incluem desde interações microbianas complexas como indução de resistência sistêmica, sorção de compostos alelopáticos e fitotóxicos que inibem o crescimento de diversos patógenos, até alterações na disponibilidade de nutrientes (MEDEIROS et al., 2021). Diversos estudos têm evidenciado o potencial do biochar na supressão de doenças em plantas, incluindo a redução da incidência de *Fusarium oxysporum* em pimenteiras

(ZHU et al., 2021) e de *Fusarium solani* em cultivos de mandioca (SILVA et al., 2022). No entanto, essas respostas ao controle desses fitopatógenos podem variar de acordo com as doses de aplicação e tipo de biomassa utilizada para produção do biochar.

Algumas pesquisas indicam que, dependendo do tipo de biomassa utilizada na produção do biochar, esses efeitos podem ter impactos negativos sobre a comunidade microbiana do solo. Gongo et al. (2023), ao avaliar os efeitos do biochar derivado da palha de trigo no metabolismo microbiano na rizosfera de plantas de trigo, observaram uma redução na expressão de genes relacionados aos ciclos de carbono, nitrogênio, fósforo e potássio. Por outro lado, Andrés et al. (2019), ao analisar as alterações na microbiota resultantes da adição de biochar de milho em solos de vinhedos, constataram um efeito negativo, com redução do carbono da biomassa microbiana do solo. Esses efeitos podem ser influenciados por fatores como a duração e a dose de aplicação, tipo de biomassa utilizada na produção do biochar e o tempo de pirólise.

Os efeitos adversos do biochar na comunidade microbiana do solo também podem ser influenciados por fatores como, tipo de solo, e mudanças nas propriedades físico-químicas do solo (PALANSOORIYA et al., 2019). Apesar de sua estabilidade a longo prazo, o biochar sofre alterações químicas e físicas ao longo do tempo (HEIKKINEN et al., 2019), o que dificulta a previsão precisa de seus efeitos, tanto qualitativos quanto quantitativos. Dessa forma, são necessários mais estudos que avaliem os diversos efeitos do biochar no solo a longo prazo.

2.4 *Trichoderma*

Trichoderma é um gênero de fungos filamentosos, saprófitos, onipresentes e amplamente distribuídos no solo. São frequentemente encontrados em compostos, madeira em decomposição, matéria orgânica degradada, resíduos agrícolas e no microbioma rizosférico das plantas (RAI et al., 2020; NANDINI et al., 2021). Além disso, apresentam alta adaptabilidade a solos temperados e tropicais, abrangendo todas as zonas climáticas (RAI; PRASAD, 2023). A sobrevivência de *Trichoderma* spp. em diferentes habitats geográficos reflete sua capacidade reprodutiva, diversidade metabólica e natureza competitiva no microbioma (ANAL et al., 2020). O sucesso de *Trichoderma* spp. no microbioma do solo como decompositores naturais, deve-se à sua alta capacidade de biodegradar resíduos agrícolas, favorecendo a absorção de nutrientes pelas plantas (SOOD et al., 2020).

Espécies de *Trichoderma* spp. são amplamente reconhecidos como fortes competidores contra patógenos fúngicos, (OTOYA-MARTINEZ et al., 2023; NUJTHET, et al., 2023) com uma alta taxa de crescimento, capacidade de esporular e, em alguns casos, de colonizar rapidamente os micélios dos patógenos (GHORBANPOUR et al., 2018; JAROSZUK-ŚCISEŁ et al., 2019; TYŚKIEWICZ et al., 2022). Os mecanismos de biocontrole exercidos pelo *Trichoderma* spp., que promovem uma proteção eficiente às plantas, podem ser classificados em diretos e indiretos.

Os mecanismos diretos envolvem a interação do fungo com o patógeno por meio de micoparasitismo, competição por recursos ou pela produção de uma ampla diversidade de metabólitos secundários que suprimem o crescimento de patógenos vegetais e estimulam o crescimento das plantas (SALDAÑA-MENDOZA et al., 2023). A produção de metabólitos secundários com atividade antimicrobiana, desempenha um papel crucial no controle de fitopatógenos, atuando por meio da síntese de enzimas hidrolíticas, como quitinases, glucanases e proteases (KREDICS et al., 2024), que degradam a parede celular de fungos fitopatogênicos.

Ralf et al. (2024), estudando os efeitos de diferentes concentrações de metabólitos secundários de *Trichoderma* no controle da murcha do *Fusarium oxysporum* em plantas de ervilhas, observou que as concentrações de metabólitos de *T. harzianum* (40, 50 e 60%) promoveu alta redução da biomassa fúngica do patógeno, sugerindo que a modulação das concentrações dos metabólitos pode ser uma estratégia promissora para o controle de fitopatógenos. Outros estudos comprovaram a eficácia dos metabólitos secundários com atividade antimicrobiana, demonstrando sua ação no controle de *Fusarium solani* em plantas de tomate (VERMA et al., 2024), *Sclerotinia sclerotiorum* em plantas de pepino (HUANG et al., 2024) e *Lasiodiplodia theobromae* em palma forrageira (BRITO et al., 2022). Por outro lado, os mecanismos indiretos vão desde interações complexas, estimulando as defesas naturais das plantas e fortalecendo sua capacidade de se proteger contra patógenos (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023), até a produção de hormônios promotores de crescimento, que estimulam o desenvolvimento radicular, melhorando a absorção de água e nutrientes.

Considerado um simbiote vegetal não patogênico e oportunista, o *Trichoderma* pode colonizar raízes de plantas, estabelecendo uma interação benéfica com seus hospedeiros mediada por proteínas efetoras e interação hormonal (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2019), que ativam cascatas de sinalização nas plantas, promovendo a indução de resistência sistêmica a estresses bióticos e abióticos e estimulando o crescimento vegetal

(VALDESPINO et al., 2019). Além disso, a presença de *Trichoderma* não apenas modula os níveis dos hormônios produzidos pela planta, mas pode contribuir com seus próprios hormônios ou fornecer intermediários para a síntese de alguns fitohormônios, como parte dos benefícios relatados na interação *Trichoderma* -planta (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2019).

Espécies de *Trichoderma* podem desencadear resistência sistêmica induzida por meio do ácido jasmônico e etileno ou induzir resistência sistêmica adquirida pela via do ácido salicílico (AB RAHMAN et al. 2018). A interação bem-sucedida entre plantas e *Trichoderma* spp. modula a colonização e a arquitetura das raízes, promovendo a proliferação do comprimento das raízes primária e lateral, o que facilita a eficiente absorção de nutrientes pelas plantas (RAI et al., 2020). Essa modulação do sistema radicular não apenas melhora a absorção de água e nutrientes, mas também fortalece a tolerância das plantas a estresses bióticos e abióticos.

Diversas espécies de *Trichoderma* têm sido amplamente estudadas quanto ao seu potencial na promoção do crescimento vegetal. Efeitos positivos foram observados em culturas de tomate (WANG et al., 2021; SEHIM et al., 2023), alface (SILVA et al., 2021), pimenta (WANG et al., 2022), soja (LARRAN et al., 2023), pepino (LIU et al., 2021) e algodão (SILVA et al., 2022). A aplicação de *Trichoderma* resultou em um aumento no desenvolvimento do caule, das folhas e raízes, levando a uma maior biomassa vegetal. Além disso, foi constatado um incremento na produção de pigmentos fotossintéticos, o que pode contribuir para a eficiência da fotossíntese e o desempenho fisiológico das plantas. Desse modo, compreender o comportamento desses microrganismos é essencial não apenas para potencializar o crescimento vegetal, mas também para mitigar os impactos de condições adversas, como estresses bióticos e abióticos.

Referências

- AB RAHMAN, S. F. S.; SINGH, E.; PIETERSE, C. M. J.; SCHENK, P. M. Emerging microbial biocontrol strategies for plant pathogens. **Plant Science**, v. 267, p. 102–111, 2018. DOI: 10.1016/j.plantsci.2017.11.012.
- ABARENKOV, K.; ZIRK, A.; PIIRMANN, T.; PÖHÖNEN, R.; IVANOV, F.; NILSSON, R. H.; KÖLJALG, U. UNITE general FASTA release for Fungi. **Version** 04.04.2024. UNITE Community, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15156/BIO/2959332>
- ADHIKARI, S.; MOON, E.; TIMMS, W. Identifying biochar production variables to maximise exchangeable cations and increase nutrient availability in soils. **Journal of Cleaner Production**, v. 446, p. 141454, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.141454.
- ANAL, A. K. D.; RAI, S.; SINGH, M.; SOLANKI, M. K. Plant mycobiome: Current research and applications. In: SOLANKI, M. K. (Ed.). *Phytobiomes: Current Insights and Future Vistas*. Singapore: **Springer**, 2020. p. 81–104. DOI: 10.1007/978-981-15-3151-4_4.
- ARAYEDH, W.; VAN DE STEENE, L.; SALEH, K.; DAOUK, E. Catalyst deactivation of biomass-derived biochars during tar cracking: Role of porosity. **Biomass and Bioenergy**, v. 193, p. 107604, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107604>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS E EFLUENTES (ABREMA). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2023**. São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 2 dez. 2024.
- AZEEM, M.; HASSAN, T. U.; TAHIR, M. I.; ALI, A.; JEYASUNDAR, P. G. S. A.; HUSSAIN, Q.; BASHIR, S.; MEHMOOD, S.; ZHANG, Z. Tea leaf biochar as a *Bacillus cereus* carrier improves soil function and crop productivity. **Applied Soil Ecology**, v. 157, p. 103732, 2021. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103732.
- BAI, J.; DE ALMEIDA MOREIRA, B. R.; BAI, Y.; NADAR, C. G.; FENG, Y.; YADAV, S. Assessing biochar's impact on greenhouse gas emissions, microbial biomass, and enzyme activities in agricultural soils through meta-analysis and machine learning. **Science of the Total Environment**, v. 963, p. 178541, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178541.
- BISWASH, M. R.; LI, K.-W.; XU, R.-K.; UWIRINGIYIMANA, E.; GUAN, P.; LU, H.-L.; LI, J.-Y.; JIANG, J.; HONG, Z.-N.; SHI, R.-Y. Alteration of soil pH induced by submerging/drainage and application of peanut straw biochar and its impact on Cd(II) availability in an acidic soil to indica-japonica rice varieties. **Environmental Pollution**, v. 356, p. 124361, 2024. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.124361.
- BRITO, F. da S.; COSTA, D. P. da; SOUZA, C. A. F. de; ALMEIDA, D. T. da R. G. F. de; LEITE, I. C. H. de L.; GONÇALVES, E. P.; MEDEIROS, E. V. de. Selection and control efficacy of *Trichoderma* spp. against *Fusarium solani* and *Lasiodiplodia theobromae* causing root rot in forage cactus. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, [S. l.], v. 122, p. 101900, 2022. DOI: 10.1016/j.pmpp.2022.101900.

- BRTNICKY, M.; DATTA, R.; HOLATKO, J.; BIELSKÁ, L.; GUSIATIN, Z. M.; KUČERÍK, J.; HAMMERSCHMIEDT, T.; DANISH, S.; RADZIEMSKA, M.; MRAVCOVÁ, L.; SHAH, F.; KINTL, A.; SUDOMA, M.; AHMED, N.; PEČINA, V. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. **Science of the Total Environment**, v. 796, p. 148756, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148756.
- CARDOSO JÚNIOR, C. D. PIMENTA. A.S.; SOUZA, E. C.; PEREIRA, A.K.S.; DIAS JUNIOR, A.F. Agricultural and forestry use of biochar: state of the art and future research. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e55711225999-e55711225999, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25999>
- CHEN, J.; LIANG, C.; LI, S.; XU, Q.; LI, Y.; FUHRMANN, J. J. Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: Effect of particle size and addition rate. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 24–33, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.190.
- CHEN, X.; WU, W.; HAN, L.; GU, M.; LI, J.; CHEN, M. Carbon stability and mobility of ball-milled lignin- and cellulose-rich biochar colloids. **Science of the Total Environment**, v. 802, p. 149759, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149759.
- DOMINGUES, R. R.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; SPOKAS, K. A.; MELO, L. C. A.; TRUGILHO, P. F.; VALENCIANO, M. N.; SILVA, C. A. Improving the cation exchange capacity of weathered soils using biochar: feedstock, pyrolysis conditions, and application rate. **Agronomy**, v. 10, n. 6, p. 824, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10060824.
- DUAN, M.; WU, F.; JIA, Z.; WANG, S.; CAI, Y.; CHANG, S. X. Wheat straw and its biochar affect soil properties and greenhouse gas emissions differently in field in a Chernozemic soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 7, p. 1023-1036, 2020. DOI: 10.1007/s00374-020-01479-4.
- FOULADIDORHANI, M.; SHAYANNEJAD, M.; MOSADDEGHI, M. R.; SHARIATMADARI, H.; ARTHUR, E. Biochar, manure and superabsorbent improve the physical quality of saline-sodic soil under greenhouse conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 87, n. 5, p. 1003–1017, 2023. DOI: 10.1002/saj2.20538.
- GHORBANPOUR, M.; OMIDVARI, M.; ABBASZADEH-DAHAJI, P.; OMIDVAR, R.; KARIMAN, K. Underlying mechanisms of beneficial fungi-mediated plant disease resistance. **Biological Control**, v. 117, p. 147–157, 2018. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2017.11.006.
- GINEBRA, M.; MUÑOZ, C.; CALVELO-PEREIRA, R.; MORA, M. L.; RODRÍGUEZ, J.; BUSTAMANTE, M. A.; BARRIOS, P.; BARRIENTOS, S.; RIVERA, J.; CARRASCO, I. Impact of biochar on soil chemical properties, greenhouse gas emissions and forage productivity: A field experiment. **Science of the Total Environment**, v. 806, p. 150465, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150465.
- GONDEK, K.; MĘDRZYCKA, K.; KOMISAREK, J.; GLIŃSKI, J.; CHMIEL, M. Influence of Biochar Application on the Reduction of Sandy Soil Acidification, Increase in Cation Exchange Capacity, and Available Forms of K, Mg, and P. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 28, n. 1, p. 1-9, 2019. DOI: 10.15244/pjoes/81688.

- GONG, X.; LI, S.; WU, Z.; ALHAJ HAMOUD, Y.; SHAGHALEH, H.; KALKHAJEH, Y. K.; SI, C.; ZHU, L.; MA, C. Biochar enhances soil resource availability and suppresses microbial metabolism genes in the rhizosphere of wheat. **Life**, v. 13, n. 9, p. 1843, 2023. DOI: 10.3390/life13091843.
- GUZMÁN-GUZMÁN, P.; KUMAR, A.; DE LOS SANTOS-VILLALOBOS, S.; PARRA-COTA, F. I.; OROZCO-MOSQUEDA, M. D. C.; FADIJI, A. E.; ADEYEMI, N. O.; CARRIÓN, V. J.; WHITE, J. F.; SANTOYO, G. Trichoderma species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—A review. **Plants**, v. 12, n. 3, p. 432, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12030432>
- GUZMÁN-GUZMÁN, P.; PORRAS-TRONCOSO, M. D.; OLMEDO-MONFIL, V.; HERRERA-ESTRELLA, A. Trichoderma species: versatile plant symbionts. **Phytopathology**, v. 109, n. 1, p. 6–16, 2019. DOI: 10.1094/PHYTO-07-18-0218-
- HARDY, R.V.W. K.; KNIGHT, J. D. Evaluation of biochars as carriers for *Rhizobium leguminosarum*. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 67, n. 1, p. 53-63, 2021. DOI: 10.1139/cjm-2020-0416.
- HE, D.; DONG, Z.; ZHU, B. An optimal global biochar application strategy based on matching biochar and soil properties to reduce global cropland greenhouse gas emissions: findings from a global meta-analysis and density functional theory calculation. **Biochar**, v. 6, n. 1, p. 92, 2024. DOI: 10.1007/s42773-024-00383-6.
- HEIKKINEN, J.; KESKINEN, R.; SOINNE, H.; HYVÄLUOMA, J.; NIKAMA, J.; WIKBERG, H.; HARTIKAINEN, H. Potential to improve soil aggregate stability using biochars derived from various biomass through slow pyrolysis, hydrothermal carbonization or torrefaction. **Geoderma**, v. 344, p. 40–49, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.02.028.
- HUANG, L.; LIU, M.-D.; HU, Y.-W.; CHEN, L.-J.; DENG, Y.; GU, Y.-C.; BIAN, Q.; GUO, D.-L.; WANG, G.-Z. Secondary metabolites isolated from *Trichoderma hamatum* B-3 and their fungicidal activity. **Fitoterapia**, [S. l.], v. 174, p. 105880, 2024. DOI: 10.1016/j.fitote.2024.105880.
- IDBELLA, M.; BARONTI, S.; GIAGNONI, L.; RENELLA, G.; BECAGLI, M.; CARDELLI, R.; BONANOMI, G. Long-term effects of biochar on soil chemistry, biochemistry, and microbiota: results from a 10-year field experiment in vineyards. **Applied Soil Ecology**, v. 195, p. 105217, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105217>
- IRFAN, M.; RAFIULLAH, R.; KALERI, F. N.; RIZWAN, M.; MEHMOOD, I. Potential value of biochar as a soil additive: a review. **Biologia Pura e Aplicada (PAB)**, v. 6, n. 4, p. 1494–1502, 2017. DOI: 10.19045/bspab.2017.600161.
- JAROSZUK-ŚCISEŁ, J.; TYŚKIEWICZ, R.; NOWAK, A.; OZIMEK, E.; MAJEWSKA, M.; HANAKA, A.; TYŚKIEWICZ, K.; PAWLIK, A.; JANUSZ, G. Phytohormones (auxin, gibberellin) and ACC deaminase in vitro synthesized by the mycoparasitic *Trichoderma* DEMTkZ3A0 strain and changes in the level of auxin and plant resistance markers in wheat seedlings inoculated with this strain conidia. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 19, p. 4923, 2019. DOI: 10.3390/ijms20194923.

KREDICS, L.; BÜCHNER, R.; BALÁZS, D.; ALLAGA, H.; KEDVES, O.; RACIĆ, G.; VARGA, A.; NAGY, V. D.; VÁGVÖLGYI, C.; SIPOS, G. Recent advances in the use of Trichoderma-containing multicomponent microbial inoculants for pathogen control and plant growth promotion. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 40, n. 5, p. 162, 2024. DOI: 10.1007/s11274-024-03965-5.

LAN, Z.; DENG, R.; SHANG, X.; CHANG, S. X.; FANG, S. Biochar additions shape soil microbial community and bioactive substance accumulation in *Cyclocarya paliurus* grown in acidic soil. **Applied Soil Ecology**, v. 203, p. 105652, 2024. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105652.

LARRÁN, S.; SIMÓN, M. R.; SANTAMARINA, M. P.; ROSELLÓ CASELLES, J.; CONSOLO, V. F.; PERELLÓ, A. E. Endophytic *Trichoderma* strains increase soybean growth and promote charcoal rot control. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 22, n. 7, p. 395–406, 2023. DOI: 10.1016/j.jssas.2023.03.005.

LI, J.; LI, Y.; LIU, F.; ZHANG, X.; SONG, M.; LI, R. Pyrolysis of sewage sludge to biochar: Transformation mechanism of phosphorus. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 173, p. 106065, 2023. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106065.

LIU, Q.; TANG, S.; MENG, X.; ZHU, H.; ZHU, Y.; LIU, D.; SHEN, Q. A análise proteômica demonstra um diálogo molecular entre *Trichoderma guizhouense* NJAU 4742 e raízes de pepino (*Cucumis sativus* L.): papel na promoção do crescimento vegetal. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 34, n. 6, p. 631–644, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0240-R>.

LU, L.; YU, W.; WANG, Y.; ZHANG, K.; ZHU, X.; ZHANG, Y.; WU, Y.; ULLAH, H.; XIAO, X.; CHEN, B. Application of biochar-based materials in environmental remediation: from multi-level structures to specific devices. **Biochar**, v. 2, p. 1–31, 2020. DOI: 10.1007/s42773-020-00041-7.

MEDEIROS, E. V.; COSTA, D. S.; DUDA, G. P.; BRAGA, J. S.; SOUSA, J. R. J.; HAMMECKER, C. Effect of biochar and inoculation with *Trichoderma aureoviride* on melon growth and sandy Entisol quality. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 6, p. 971–977, 2020. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.06.p2302>

MEDEIROS, E. V.; SILVA, R. F.; PEREIRA, G. D.; ARAÚJO, A. S. F.; HAMMECKER, C.; MENDES, L. W. Biochar as a strategy to manage plant diseases caused by pathogens inhabiting the soil: a critical review. **Phytoparasitica**, v. 49, n. 4, p. 713–726, 2021. DOI: 10.1007/s12600-021-00887-y.

MOULIN-ROUYARD, C.; VAILLANT, V.; ANGEON, V.; DIMAN, J.-L.; VAILLANT, J.; LORANGER-MERCIRIS, G. Soil fauna and ecosystem services in agroecological cropping systems: Focus on open-field experimental gardens. **Soil Systems**, v. 8, n. 1, p. 26, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010026>.

NANDINI, B.; RAKSHITH, D.; SRIVASTAVA, A. K.; SHANMUGAM, V.; REVANASIDDAPPA, P. D.; GURU PRASAD, K.; CHAKRABARTY, S. K. Trichovariability in rhizosphere soil samples and their biocontrol potential against downy mildew pathogen in pearl millet. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 9517, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89061-2>.

NAZIM, M.; GHAFOOR, A.; HUSSAIN, A.; TABASSUM, M.; NAWAZ, A.; AHMAD, M. Biochar as a Climate-Smart Agricultural Practice: Reducing Greenhouse Gas Emissions and Promoting Sustainable Farming. **Phyton - International Journal of Experimental Botany**, v. 94, n. 1, p. 65–99, 2025. DOI: 10.32604/phyton.2025.058970.

- NUJTHET, Y.; JANTASORN, A.; DETHOUP, T. Biological efficacy of marine-derived *Trichoderma* in controlling pepper anthracnose and black spot disease in Chinese kale. **European Journal of Plant Pathology**, v. 166, n. 4, p. 369–383, 2023. DOI: 10.1007/s10658-023-02668-1.
- OTOYA-MARTINEZ, N.; LEITE, L. G.; HARAKAVA, R.; TOURAY, M.; HAZIR, S.; CHACÓN-OROZCO, J.; BUENO, C. J. Doença causada por *Neofusicoccum parvum* em feridas de poda de brotos de videira e seu controle por *Trichoderma spp.* e *Xenorhabdus szentirmaii*. **Fungal Biology**, v. 127, n. 1-2, p. 865–871, 2023. DOI: 10.1016/j.funbio.2022.12.002.
- PALANSOORIYA, K. N.; WONG, J. T. F.; HASHIMOTO, Y.; HUANG, L.; RINKLEBE, J.; CHANG, S. X.; BOLAN, N.; WANG, H.; OK, Y. S. Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. **Biochar**, v. 1, p. 3–22, 2019. DOI: 10.1007/s42773-019-00009-2.
- PANG, J.; WANG, Y.; WANG, B.; WANG, J.; LIU, E.; GAO, F.; SUN, S.; REN, X.; JIA, Z.; WEI, T.; ZHANG, P. Biochar application increases maize yield under film mulching due to higher soil organic content and soil aggregate stability in a semi-arid area. **Journal of Soils and Sediments**, v. 23, n. 4, p. 1718–1732, 2023. DOI: 10.1007/s11368-023-03444-8.
- PEIRIS, B.; GUNARATHNE, D. G. G. L.; POKHAREL, P.; ALMEIDA, J.; WIJAYAKULATHILAKA, D. M. S. B.; DHARMARATHNA, W. R. S. S.; PRASHAR, P.; BALDOCK, J.; OK, Y. S.; SINGH, B. P. Biochar alters hydraulic conductivity and impacts nutrient leaching in two agricultural soils. **Soil**, v. 7, p. 811–833, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-7-811-2021>.
- RAI, S.; PRASAD, R. Biology, biodiversity, and biotechnology of *Trichoderma*. In: **New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering**, p. 1–28, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99890-1.00008-X>.
- RAI, S.; SINGH, P.; SINGH, M.; YADAV, A. N.; GUPTA, A.; VERMA, P.; KUMAR, M. Emerging frontiers of microbes as agro-waste recycler. In: ANAL, A. K. D. (Ed.). **Waste to energy: prospects and applications**. Cham: Springer, 2020. p. 3–27. DOI: 10.1007/978-981-33-4347-4_1.
- RAMÍREZ-VALDESPINO, C. A.; CASAS-FLORES, J. S.; OLMEDO-MONFIL, V. G. *Trichoderma* as a model to study effector-like molecules. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1030, 2019. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01030.
- RAUF, A.; SATTAR, A.; IHSAN, M.; ASHRAF, A.; SHAFIQ, M.; MUKHTAR, T.; HUSSAIN, M. Cultivating a greener future: exploiting *Trichoderma*-derived secondary metabolites for *Fusarium* wilt management in peas. **Heliyon**, v. 10, n. 7, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29031.
- RAUF, A.; SUBHANI, M. N.; SIDDIQUE, M.; SHAHID, H.; CHATTHA, M. B.; ALREFAEI, A. F.; NAQVI, S. A. H.; ALI, H.; LUCAS, R. S. Cultivating a greener future: Exploiting *Trichoderma*-derived secondary metabolites for *Fusarium* wilt management in peas. **Heliyon**, v. 10, n. 7, p.29031, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29031.
- RUAN, G.; YANG, Y.; PENG, X.; WANG, J.; GUO, Y.; HU, W.; LIN, D. A review of the current status of nitrogen self-doped biochar applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, p. 115291, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115291>.

SALDAÑA-MENDOZA, S. A.; GARCÍA-LUNA, L.; LOYO-GÓMEZ, S.; ROSALES-SOTO, M. U.; CASTAÑEDA-RAMÍREZ, G. S.; CASTRO-MARTÍNEZ, C.; TOVAR-PÉREZ, E. G. *Trichoderma* as a biological control agent: mechanisms of action, benefits for crops and development of formulations. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 39, n. 10, p. 269, 2023. DOI: 10.1007/s11274-023-03695-0.

SANCHEZ-REINOSO, A.D.; ÁVILA-PEDRAZA, E. A.; RESTREPO-DÍAZ, H. Use Of Biochar In Agriculture. **Acta Biológica Colombiana**, v. 25, n. 2, p. 327-338, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v25n2.79466>

SEHIM, A. E.; HAMZA, M. A.; ABDALLA, M. A.; SAAD, M. M.; ELSHAFEI, A. M. *Trichoderma asperellum* empowers tomato plants and suppresses *Fusarium oxysporum* through priming responses. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1140378, 2023. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1140378.

SILVA, J. S.; MEDEIROS, E. V.; SOUZA, L. C.; SOUZA, A. G. C.; SANTOS, G. R. S.; SOUZA, E. S.; SANTOS, J. C.; SILVA, M. V. A.; SOUZA, E. D. Biochar and *Trichoderma aureoviride* URM 5158 as alternatives for the management of cassava root rot. **Applied Soil Ecology**, v. 172, p. 104353, 2022. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.104353.

SILVA, L. G.; AZEVEDO, R. S.; SILVA, M. V. A.; SANTOS, G. R. S.; SILVA, J. S.; MEDEIROS, E. V.; SANTOS, J. C.; SANTOS, V. R. Dual functionality of *Trichoderma*: Biocontrol of *Sclerotinia sclerotiorum* and biostimulant of cotton plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 983127, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.983127.

SILVA, L. R.; VALADARES-INGLIS, M. C.; PEIXOTO, G. H. S.; DE LUCCAS, B. E. G.; COSTA MUNIZ, P. H. P.; MAGALHÃES, D. M.; MELO, I. S.; MORAES, M. C. B. Volatile organic compounds emitted by *Trichoderma azevedoi* promote lettuce plant growth and delay white mold symptoms. **Biological Control**, v. 152, p. 104447, 2021. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2020.104447.

SOOD, M.; KAPOOR, D.; SAINI, R.; SHARMA, A.; KUMAR, V.; KAPOOR, N. *Trichoderma*: The “secrets” of a multitasking biocontrol agent. **Plants**, v. 9, n. 6, p. 762, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9060762>.

SUN, H.; ZHANG, Y.; YANG, Y.; CHEN, Y.; JEYAKUMAR, P.; SHAO, Q.; ZHOU, Y.; MA, M.; ZHU, R.; QIAN, Q.; FAN, Y.; XIANG, S.; ZHAI, N.; LI, Y.; ZHAO, Q.; WANG, H. Effect of biofertilizer and wheat straw biochar application on nitrous oxide emission and ammonia volatilization from paddy soil. **Environmental Pollution**, v. 275, p. 116640, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116640>

TAN, Z.; LI, Y.; ZHANG, Y.; LUO, W.; SHI, Z.; WU, L. Mechanism of negative surface charge formation on biochar and its effect on the fixation of soil Cd. **Journal of Hazardous Materials**, v. 384, p. 121370, 2020. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121370.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. R. Biochar: reality and potential use in the forestry sector. **Ciência Florestal** (Online), v. 28, p. 875, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509832128>

TYŚKIEWICZ, R.; NOWAK, A.; OZIMEK, E.; JAROSZUK-ŚCISEŁ, J. *Trichoderma*: the current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and plant growth stimulation. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 4, p. 2329, 2022. DOI: 10.3390/ijms23042329.

VERMA, ISHA; SONI, SUMIT K.; SINGH, POONAM C. Trichoderma produces methyl jasmonate-rich metabolites in the presence of Fusarium, showing biostimulant activity and wilt resistance in tomatoes. **Plant Physiology and Biochemistry** 2024, v. 215, p. 108953. DOI: doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108953

WANG, C.; ZHANG, X.; LI, W.; LI, Y.; LIU, X.; ZHAO, Y.; YANG, X. Biochar alters soil microbial communities and potential functions 3–4 years after amendment in a double rice cropping system. **Agric Ecosyst Environ.** 2021; 311:107291. DOI: doi.org/10.1016/j.agee.2020.107291

WANG, R.; CHEN, D.; KHAN, R. A. A.; CUI, J.; HOU, J.; LIU, T. A. A nova cepa DQ-1 de *Trichoderma asperellum* promove o crescimento do tomateiro e induz resistência ao mofo cinzento causado por *Botrytis cinerea*. **FEMS Microbiology Letters**, v. 368, p.140, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsle/fnab140>.

XU, W.; XU, H.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; GUNDALE, M. J.; ZOU, X.; RUAN, H. Global meta-analysis reveals positive effects of biochar on soil microbial diversity. **Geoderma**, v. 436, art. 116528, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116528>.

YANG, J.; ZHANG, M.; LI, Z.; XU, X.; JIA, J.; SUN, J.; XIAO, Y.; LIU, X.; ZHAO, J. Integrating metagenomics and metabolomics to study the response of microbiota in black soil degradation. **Science of the Total Environment**, v. 899, p. 165486, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165486

YANG, W.; MENG, Y.; SHAO, Y.; YANG, H.; ZHANG, J.; DONG, Z.; TIAN, Y. Impact of biochar on greenhouse gas emissions and soil carbon sequestration in corn grown under drip irrigation with mulching. **Science of the Total Environment**, v. 729, p. 138752, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138752

YU, J.; DING, W.; LI, Z.; LIU, H.; SHI, Z.; ZHOU, S.; ZHANG, R. Biochar application influences the complexity and composition of microbial assembly due to soil and bioenergy crop type interactions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 117, p. 97-107, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.017>

YUAN, Y.; LI, Y.; WANG, X.; ZHANG, J.; LIU, Y.; WANG, G. Biochar as a sustainable tool to improve the health of salt-affected soil. **Soil & Environmental Health**, p. 100033, 2023. DOI: 10.1016/j.soilenv.2023.100033

ZHANG, X.; WANG, S.; LI, T.; ZHAO, Y.; WANG, J.; LIU, Y.; WANG, Q.; GAO, B. Combined effects of bacteria and biochar on the remediation of antibiotic- and heavy metal-contaminated soil and responses of resistance genes and microbial community. **Chemosphere**, v. 299, p. 134333, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134333

ZHAO, J.; QIU, Y.; YI, F.; LI, J.; WANG, Y.; WANG, X.; FU, Q.; FU, X.; YAO, Z.; GAO, Y.; DAI, Z.; QIU, Y.; CHEN, H. Biochar dose-dependent impacts on soil bacterial and fungal diversity across the globe. **Science of the Total Environment**, v. 930, p. 172509, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172509.

ZHAO, Y.; LI, W.; JIANG, Z.; WANG, J.; ZHANG, L.; CHEN, X. Advances in the effects of biochar on microbial ecological function in soil and crop quality. **Sustainability**, v. 14, n. 16, p. 10411, 2022. DOI: 10.3390/su141610411
ZOU, C. et al. Effects of pyrolysis temperature and atmosphere on grinding properties of semicoke prepared from Shenmu low-rank coal. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 173, p. 106059, 2023. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106059.

ZHU, Q.; CHEN, L.; CHEN, T.; XU, Q.; HE, T.; WANG, Y.; DENG, X.; ZHANG, S.; PAN, Y.; JIN, A. Integrated transcriptome and metabolome analyses of biochar-induced pathways in response to *Fusarium* wilt infestation in pepper. **Genomics**, v. 113, p. 2085–2095, 2021. DOI: 10.1111/ *nph*.14253.

ZOU, C.; WANG, S.; LI, Q.; WANG, H.; ZHANG, X. Effects of pyrolysis temperature and atmosphere on grinding properties of semicoke prepared from Shenmu low-rank coal. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 173, p. 106059, 2023. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106059

3.CAPÍTULO II: MODULAÇÃO DA COMUNIDADE FÚNGICA EM SOLOS DE VINHEDO TRATADOS COM BIOCHAR E *TRICHODERMA*

Resumo

O solo abriga imensa diversidade de microrganismos que desempenham papel essencial na dinâmica do solo, contribuindo para a decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e a promoção da saúde das plantas. nesse contexto, a aplicação de biochar no solo tem sido recomendada como uma abordagem para assegurar o sequestro de carbono e melhorar as propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo. No entanto, associações de biochar com microrganismos especialmente *Trichoderma* tem sido pouco explorada e os efeitos na estrutura da microbiota do solo precisam ser elucidados. Para preencher esta lacuna, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de dois tipos de biochars provenientes de resíduos da produção do vinho co-aplicados com dois isolados de *Trichoderma* (*T. hamatum* URM 6656 e *T. aureoviride* URM 5158) sobre estrutura e diversidade das comunidades microbianas de um solo cultivado com uva. O experimento foi conduzido em campo com delineamento em blocos ao acaso, com nove tratamentos e três repetições. Nossos resultados indicam que a aplicação de biochar, tanto isoladamente quanto em combinação com *Trichoderma*, causou alterações significativas na estrutura das comunidades microbianas, impactando a diversidade a nível de filo e gênero. Alterações nas variáveis químicas do solo, como pH, Na⁺ e K⁺, desempenharam um papel modulador na estrutura das comunidades microbianas, favorecendo alguns grupos em detrimento de outros. A nível de filo, as comunidades fúngicas foram predominantemente compostas por Ascomycota, Basidiomycota, Chytridiomycota e Glomeromycota, que juntos, representaram 98,52% da abundância relativa no solo. Os tratamentos que contribuíram para o enriquecimento desses filos foram biochar da fermentação da uva (GFB) e a combinação do GFB+*T.hamatum*. Os gêneros *Fusarium*, *Nigrospora* e *Cladosporium* foram abundantes em todos os tratamentos, com abundâncias relativas variando de 13,92% a 7,45%. O aumento desses gêneros foi expressivo nos tratamentos com GFB + *T. hamatum* e *T. aureoviride*. De forma geral, nossos achados fornecem insights valiosos sobre os efeitos de diferentes tipos de biochar, aplicados isoladamente ou em combinação com isolados de *Trichoderma*, nas comunidades microbianas. Contudo, são necessárias pesquisas adicionais para compreender melhor a os efeitos sinérgicos entre biochar e *Trichoderma* e os impactos na microbiota do solo a longo prazo.

Palavras-chave: Microbioma do solo. Saúde do solo. Enzimas do solo. Biocarvão. Sustentabilidade.

3. CHAPTER II: MODULATION OF THE FUNGAL COMMUNITY IN VINEYARD SOILS TREATED WITH BIOCHAR AND *TRICHODERMA*

Abstract

Soil harbors an immense diversity of microorganisms that play an essential role in soil dynamics, contributing to the decomposition of organic matter, nutrient cycling, and the promotion of plant health. The application of biochar to soil has been recommended as an approach to ensure carbon sequestration and improve the soil's physical, chemical, and microbiological properties. However, associations between biochar and microorganisms, especially *Trichoderma*, have been little explored, and the effects on soil microbiota structure still need to be elucidated. To address this gap, this study aimed to evaluate the effect of two types of biochars derived from wine production residues co-applied with two *Trichoderma* isolates (*T. hamatum* URM 6656 and *T. aureoviride* URM 5158) on the structure and diversity of microbial communities in a vineyard soil. The experiment was conducted under field conditions using a randomized block design, with nine treatments and three replicates. Our results indicate that the application of biochar, both alone and in combination with *Trichoderma*, caused significant changes in the structure of microbial communities, impacting diversity at the phylum and genus levels. Changes in soil chemical variables, such as pH, Na⁺, and K⁺, played a modulatory role in shaping the microbial community structure, favoring certain groups over others. At the phylum level, fungal communities were predominantly composed of *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Chytridiomycota*, and *Glomeromycota*, which together accounted for 98.52% of the relative abundance in the soil. Treatments that contributed to the enrichment of these phyla were the grape fermentation biochar (GFB) and the combination of GFB + *T. hamatum*. The genera *Fusarium*, *Nigrospora*, and *Cladosporium* were abundant across all treatments, with relative abundances ranging from 13.92% to 7.45%. The increase in these genera was particularly pronounced in treatments with GFB + *T. hamatum* and *T. aureoviride*. Overall, our findings provide valuable insights into the effects of different types of biochar, applied either alone or in combination with *Trichoderma* isolates, on microbial communities. However, further research is necessary to better understand the synergistic effects between biochar and *Trichoderma* and their long-term impacts on soil microbiota.

Keywords: Soil microbiome. Soil health. Soil enzymes. Biochar. Sustainability.

3.1 Introdução

Os microrganismos desempenham papel fundamental na saúde e qualidade do solo, atuando em processos essenciais como a decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e a supressão de doenças (HARTMANN;SIX, 2023; ARAÚJO et al., 2024). A abundância e diversidade de microrganismos no solo têm impacto direto na eficiência da ciclagem de nutrientes, processo indispensável para o crescimento das plantas e na manutenção do equilíbrio dos ecossistemas (LEHMANN et al., 2020). A compreensão sobre os fatores que alteram a diversidade e a distribuição de microrganismos em ambientes naturais é crucial para identificar quais grupos predominam em cada ecossistema e prever as principais funções ecológicas que esses organismos desempenham em cada habitat.

A ampla variedade de habitats disponíveis para as comunidades microbianas contribui para manter elevada diversidade microbiana, uma vez que, diferentes grupos de microrganismos são adaptados a distintos microambientes (YU , 2024). Embora o sistema radicular da planta exerça grande influência sobre a estrutura do microbioma do solo, a composição das comunidades microbianas pode ser moldada por diversos fatores físico-químicos, como o pH do solo, salinidade, teor de nutrientes minerais, matéria orgânica, umidade, temperatura e condições de oxigenação (GRYTA et al., 2024; PUROHIT et al., 2024). Esses fatores, em conjunto, exercem influência direta na diversidade funcional do microbioma, um indicador essencial da saúde do ecossistema edáfico. Nesse contexto, o uso de biochar destaca-se como estratégia promissora capaz de melhorar as propriedades do solo, fortalecer sua resiliência, equilibrar a disponibilidade de nutrientes e estimular a diversidade microbiana dos solos agrícolas (SINGH et al., 2022; ADHIKARI et al., 2024).

O biochar é um material altamente poroso, rico em carbono, produzido por meio da pirólise de materiais orgânicos em condições reduzidas de oxigênio (SUN et al., 2021; DASHTI et al., 2023). O biochar é considerado um condicionador do solo, contribuindo para o sequestro de carbono, elevação do pH, aumento da saturação por bases (fertilidade), melhoria da estrutura do solo e aumento da capacidade de retenção de água do solo (LIMA et al., 2018; MEDEIROS et al., 2020). Além disso, o biochar possui o potencial de melhorar as comunidades microbianas do solo ao aumentar a biomassa, diversidade e atividade enzimática influenciando significativamente as funções do solo (POKHAREL et al., 2020; SINGH et al., 2022). A estrutura porosa, extensa área de superfície específica e características favoráveis de permeabilidade e aeração, inerentes ao biochar fornece um habitat ideal para o crescimento dos microrganismos (ABHISHEK et al., 2022). Essa

capacidade permite a modificação das estruturas da comunidade microbiana edáfica. Embora os efeitos positivos do biochar tenham sido amplamente demonstrados, pesquisas que exploram a interação com microrganismos, especialmente do gênero *Trichoderma* Pers., estão em fases iniciais e precisam ser exploradas.

Trichoderma é um gênero diversificado de fungos filamentosos da família Hypocreaceae De Not., amplamente distribuído na natureza. Embora habitem principalmente o solo, as espécies podem colonizar raízes, caules e folhas de plantas, onde aproximadamente 400 espécies foram identificadas (WOO et al., 2023). Esses microrganismos empregam mecanismos diretos, como micoparasitismo, competição por nutrientes, produção de compostos antimicrobianos (MUKHERJEE et al., 2022; GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023) e mecanismos indiretos, como a indução de resistência sistêmica (LI et al., 2025) e a promoção do crescimento vegetal (SOOD et al., 2020; LIU et al., 2020; ASGHAR et al., 2024).

Considerado um microrganismo simbiote oportunista de plantas, o *Trichoderma* ao colonizar as raízes das plantas, estabelece interação benéfica mediada por proteínas efetoras e por interações hormonais em troca de açúcares derivados do metabolismo vegetal (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2019). Essa relação simbiótica fortalece o sistema radicular das plantas e aumenta a resistência aos estresses bióticos e abióticos, promovendo vigor e produtividade as plantas. Embora vários estudos demonstrem os efeitos positivos do *Trichoderma* spp. na promoção da qualidade do solo, estudos relacionados ao seu papel no crescimento de plantas, especialmente em videiras, são limitadas e pouco exploradas.

A uva (*Vitis vinifera* L.) é uma cultura de grande importância econômica e social destacando-se entre as culturas irrigadas pelo elevado potencial de crescimento e alto valor agregado (LIU et al., 2025). Cultivada por milênios, em ampla diversidade de solos e condições climáticas, a videira enfrenta desafios como, baixa fertilidade e redução de matéria orgânica, fatores que podem comprometer a produtividade (CASALÍ et al., 2009). Associações de *Trichoderma* ssp. com biochar tem sido estudada mostrando o potencial no aumento de pH do solo, carbono orgânico e nos teores de fósforo e potássio no solo (SILVA et al., 2022; MEDEIROS et al., 2023). Embora os efeitos positivos de microrganismos no cultivo de videiras sejam reconhecidos, os impactos específicos da co-aplicação de biochar e *Trichoderma* são pouco explorados e necessitam de estudos, principalmente em relação ao seu potencial na melhoria da qualidade do solo e da produtividade das videiras.

Neste sentido, levantamos as seguintes hipóteses: (1) diferentes fontes de biochar e isolados de *Trichoderma* promovem respostas distintas na estrutura das comunidades

associadas a rizosfera da videira; (2) alterações nas propriedades químicas e microbiológicas promovidas pela co-aplicação de biochar e *Trichoderma* favorecem o crescimento e produtividade das videiras.

Sendo assim, este estudo teve como objetivo testar dois biochars derivados de resíduos da produção do vinho, inoculado com dois isolados de *Trichoderma* para promoção de melhorias das propriedades químicas e microbiológicas do solo cultivado com videiras.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido na Vinícola Vale das Colinas, situada em Garanhuns, Pernambuco, Brasil ($8^{\circ}56'19''$ S, $36^{\circ}31'21''$ O), com altitude de 800 metros acima do nível do mar (Figura 1). A região apresenta temperatura média anual de 20°C e precipitação média de 1.300 mm. O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico com textura franco-arenosa, de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA, 2018). Os atributos químicos do solo experimental estão na Tabela 1.

Figura 1- Mapa da área experimental, vinícola Vale das colinas em Garanhuns- PE.

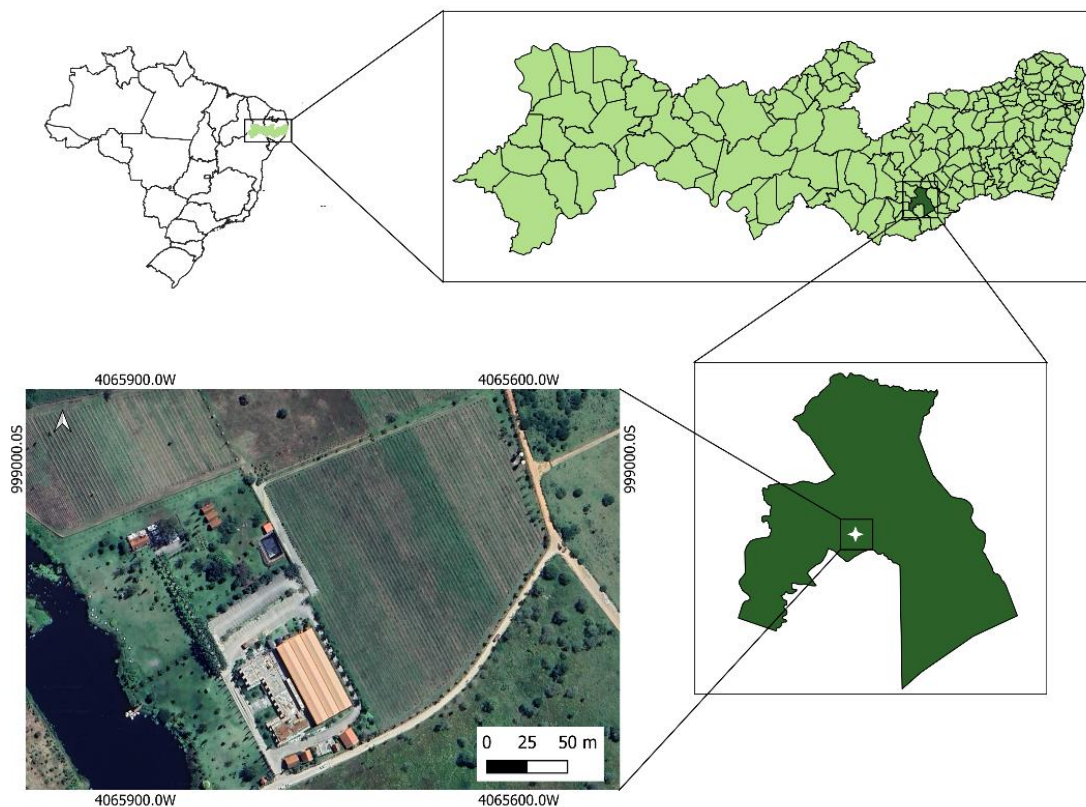


Tabela 1- Propriedades químicas do solo da área cultivada com videiras Cabernet Sauvignon.

pH	C.E	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	P	S.B	H+Al	CTC	Al ³⁺	V%	C	M.O
H ₂ O	dS/m						Cmol _c /dm ³						
7,1	0,33	2,8	1,5	0,26	0,20	84,25	4,67	-	4,67	-	100	7,0	12,1

SB-Saturação por bases; CTC-capacidade de troca de cátions; M.O- matéria orgânica.

3.2.2 Produção e caracterização do biochar

Os resíduos de engaços e da fermentação da uva, gerados após a produção de vinho, foram submetidos ao processo de pirólise lenta em forno artesanal, mantido a temperatura de, aproximadamente, 400°C por 12 horas. Após a pirólise, o material foi triturado e passado em peneira de 2,00 mm de diâmetro. Em seguida, foi realizada a caracterização química dos biochars para determinação dos teores de nutrientes (Ca, Mg, Al, Fe, Mn e Zn) através de espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Os teores de K e Na foram determinados por fotometria de chama, após digestão ácida das amostras, seguindo o método de cinzas secas descrito por Enders; Lehmann (2012), com adaptações. O teor de P foi quantificado pelo método colorimétrico de ácido molibdovanadofosfórico (MAPA) após a digestão ácida. A caracterização química de ambos os biochars está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2- Caracterização química dos biochars de engaço e fermentação da uva Cabernet.

Atributos químico	Unidade	Biochar engaço da uva	Biochar fermentação da uva
pH	-	10.44	10.28
CEC	mmol/dm ³	9.0	107.9
C	g kg ⁻¹	332.2	142.8
N	g kg ⁻¹	7.4	21.7
C/N	-	44.8	6.6
P	g kg ⁻¹	11.8	7.6
K	g kg ⁻¹	82.0	51.9
Ca	g kg ⁻¹	13.2	6.8
Mg	g kg ⁻¹	3.6	2.0
Na	g kg ⁻¹	4.6	4.5
Si	g kg ⁻¹	1.2	0.1
Fe	mg kg ⁻¹	5055.9	796.0
Cu	mg kg ⁻¹	26.8	29.9
Mn	mg kg ⁻¹	118.8	57.0
Zn	mg kg ⁻¹	182.8	263.2
B	mg kg ⁻¹	29.0	20.1

O pH foi determinado em água na proporção de 1:2,5; CTC (Capacidade de Troca Catiônica) foi medida a pH 7,0; P disponível foi determinado como fósforo disponível; Ca - cálcio trocável; Mg - magnésio trocável; Na - sódio trocável; K - potássio trocável.

3.2.3 Preparo dos Inóculos de *Trichoderma*

Foram utilizados dois isolados: *Trichoderma aureoviride* URM 5158 e *Trichoderma hamatum* URM 6656, ambos provenientes da Coleção de Culturas URM (<https://www.ufpe.br/micoteca/>). Os espécimes foram cultivados em frascos Erlenmeyer de 125 ml contendo 25 ml de ágar batata-dextrose (BDA) e incubados em estufa Demanda Biológica de Oxigênio (B.O.D) a 28 °C por 7 dias. A preparação dos inóculos foi realizada conforme o protocolo descrito por Silva et al. (2022), sendo ajustada para uma concentração de 10⁶ esporos mL⁻¹. Cada tipo de biochar foi individualmente inoculado com a concentração de esporos descrita acima, acrescido de 100 mL de água destilada, e posteriormente aplicado em dose única e incorporado ao solo à uma distância de 30 cm do caule das videiras. A concentração de biochar utilizada foi utilizada abaixo da dose de 2%, considerada como limite para uso do biochar em solos agrícolas (NOVOTNY et al., 2015).

3.2.4 Delineamento experimental

O experimento foi realizado em áreas de cultivo da variedade Cabernet Sauvignon, com avaliações iniciadas em julho de 2023 e concluídas em setembro de 2024. O

delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados com nove tratamentos e três blocos. Os tratamentos foram: (1) Controle; (2) Biochar produzido a partir do engaço da uva (GSB); (3) Biochar originado do subproduto da fermentação da uva. (GFB); (4) *Trichoderma aureoviride* (*T. aureoviride*); (5) *Trichoderma hamatum* (*T.hamatum*); (6) Biochar engaço da uva + *Trichoderma aureoviride* (GSB+Ta); (7) Biochar engaço da uva + *Trichoderma hamatum* (GSB+Th); (8) Biochar fermentação da uva + *Trichoderma aureoviride* (GFB+Ta); (9) Biochar fermentação da uva+ *Trichoderma hamatum* (GFB+Th).

3.2.5 Amostragem do solo rizosférico

Após 160 dias de avaliação, as amostras de solo foram coletadas em cada planta, que corresponde à unidade experimental, totalizando 27 amostras. O solo coletado foi peneirado em malha de 2 mm, acondicionado em sacos plásticos e armazenado sob refrigeração a -80°C para as análises moleculares.

3.2.6 Extração e sequenciamento de DNA

O DNA genômico foi extraído a partir de 0,4 g de solo de cada amostra, utilizando o kit comercial DNeasy® PowerSoil® (QIAGEN Inc., Valencia, CA, EUA), de acordo com as instruções do fabricante. Em seguida, as amostras foram encaminhadas para empresa especializada em serviços de biologia molecular no exterior, a Novogene, Sacramento (EUA), na qual foram feitas as etapas de análise de qualidade, preparo das bibliotecas de *amplicons* e o sequenciamento genético, usando a técnica do Espaçador Transcrito Interno (ITS) para analisar sequências de ácidos nucleicos localizado entre 18S e 5.8S da sequência de rDNA ribossômico eucariótico. Inicialmente, a integridade do material genético foi avaliada por meio do processo de eletroforese em gel de agarose a 1%. As bibliotecas fúngicas foram preparadas com base na região ITS1–5F, utilizando os primers ITS5–1737F (5'-GGA AGTA AAA GTC GTA ACA AGG-3') TS2-2043R (5'-GCT GCG TTC TTC ATC GAT GC-3'), com alcance médio entre 200 e 400 pb (Zhang et al., 2019). Em conjunto com os primers, a biblioteca de sequenciamento de *amplicons* do gene 18S rRNA foi gerada utilizando a DNA polimerase Herculase II Fusion (© Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, CA, EUA) e o Nextera XT v2 Index Kit (© Illumina, Inc., San Diego, CA, EUA), seguindo as diretrizes do fabricante na Novogene em Sacramento, EUA. O sequenciamento foi realizado em um Illumina® MiSeq® PE usando uma célula de fluxo v3. Uma concentração de biblioteca de 3 pM foi carregada, com um aumento de

30% do DNA de controle da biblioteca Illumina® PhiX, seguindo as diretrizes do fabricante. Os arquivos de chamada de base binária (BCL), que são os arquivos de dados brutos gerados pelos sequenciadores Illumina, foram convertidos em dados de sequência no formato FASTQ usando o software bcl2fastq v2.20 (© Illumina), a partir do qual foram desmultiplexadas e tiveram seus *primers* e *barcodes* removidos para próxima etapa de controle de qualidade e processamento dos dados brutos.

3.2.7 Processamento de dados brutos das sequências genéticas

O processo de controle de qualidade foi dividido em duas etapas. Inicialmente, utilizando software FLASH (Fast Length Adjustment of SHort reads, v.1.2.11), leituras complementares PE (*paired-end*) brutas foram combinadas em uma *tag* de extremidade única de comprimento de região amplificada. Em seguida, as *tags* foram submetidas ao controle de qualidade através do software fastp (v.0.23.4), removendo sequências com baixa qualidade, excesso de bases e alta taxa de erro (N). A taxa de erro N de sequenciação de uma única posição de base foi inferior a 1%, e o máximo não excedeu 6%. Após esses procedimentos, as bibliotecas de dados pré-tratados, com leituras *forward* e *reverse* mescladas, totalizaram 4,497,115 sequências.

A seguir, as sequências foram processadas no ambiente R (v.4.3.2; R CORE TEAM, 2025) utilizando a interface RStudio 2023.06.1 (Build 524). Ao todo, 20 bibliotecas de *amplicons* de 18S rRNA foram construídas (uma amostra foi perdida na etapa de sequenciamento). As análises metagenômicas foram continuadas no pacote de análises “DADA2” (v.1.28.0) no ambiente R (CALLAHAN *et al.*, 2016). As sequências foram novamente filtradas utilizando o algoritmo ‘filterAndTrim’, fornecendo os seguintes parâmetros: minLen = 100; maxLen = 430; maxN = 0; maxEE = 2; e truncQ = 2. As taxas de erro para cada posição base nas leituras de sequenciamento foram estimadas pelo algoritmo ‘learnErrors’ nas configurações padrão. Em seguida, as variantes de sequências de *amplicons* (ASVs) foram inferidas através do algoritmo “dada2”, agrupando as amostras pelo método “*pooling*”, aumentando a resolução de variantes raras, pouco observadas em amostras isoladas, mas frequentes entre amostras. Por fim, as sequências chimeras foram mais uma vez filtradas, utilizando para tanto o algoritmo ‘removeBimeraDenovo’ utilizando o método “*pooling*”, resultando em 4,182,734 sequências de alta qualidade.

As sequências foram alinhadas ao banco de dados gerais de eucariotos UNITE (<https://unite.ut.ee/repository.php>), classificadas até o nível de espécies sob correspondência mínima de 97% (ABARENKOV *et al.*, 2024). Os pacotes R ‘DECIPHER’

(WRIGHT, 2016) e ‘phangorn’ (SCHLIEP, 2011) foram utilizados para criar um alinhamento e uma árvore filogenética das ASVs. Após as associações taxonômicas, 3,645,269 sequências associadas ao menos ao nível de filo fúngico foram recuperadas, adequadas para os procedimentos de rarefação amostral e demais análises a jusante.

3.2.8 Análise Estatística

Todas as análises foram feitas no ambiente R v.4.3.2 (R CORE TEAM, 2025) através da interface RStudio (RSTUDIO TEAM, 2023). Os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias foram analisados pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente e as medidas de tendência central das variáveis edáficas e enzimáticas foram analisadas pelo modelo de delineamento inteiramente casualizado. E estatísticas adotadas para os dados paramétricos foram a análise de variância (ANOVA) seguida pelo teste post-hoc de Games-Howell ($\alpha = 0.05$), enquanto os dados não paramétricos foram analisados pelo teste de Kruskal-Wallis seguido pelo teste post-hoc de Dunn ($p = 0.05$). A análise de correlações canônicas (CCA) foi feita para estudar a variância explicada com cada sistema ecológico com base nas variáveis e químicas e enzimáticas do solo, sendo modelada através de ferramentas do pacote R ‘factoextra’. As análises de correlações foram feitas utilizando a função ‘cor.test’ da biblioteca R “stats”. As análises de redes de co-ocorrência foram feitas utilizando recursos do pacote R ‘NetCoMi’ (PESCHEL, 2024) e os gráficos foram construídos no software Gephi v.0.10 (<https://gephi.org/>). Análises adicionais foram realizadas em R, utilizando os pacotes ‘phyloseq’ (MCMURDIE; HOLMES, 2013) e ‘vegan’ (DIXON, 2003; OKSANEN et al., 2010). Os demais gráficos foram gerados com a biblioteca R “ggplot2”.

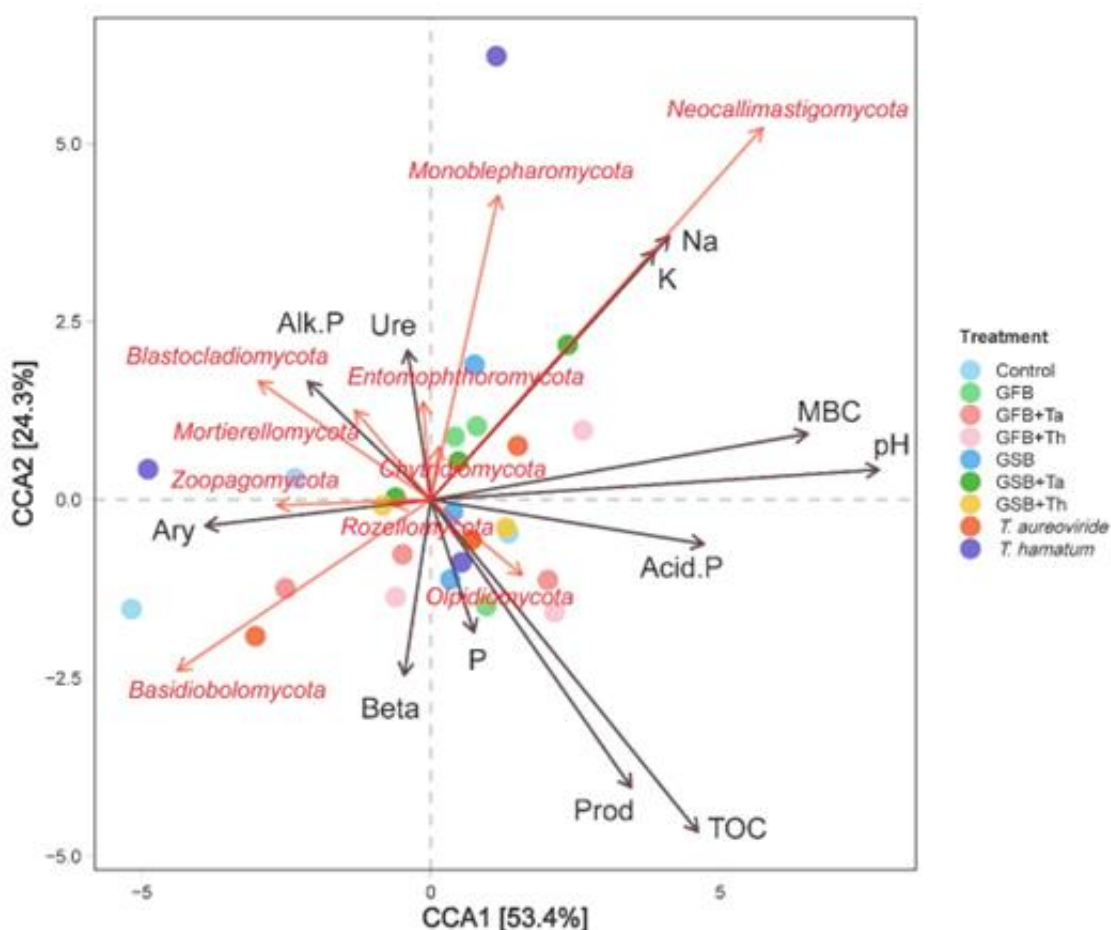
3.3 Resultados

3.3.1 Análise de interação entre os fatores ambientais e os principais táxons

A análise de correlações canônicas utilizando a distância UniFrac explicou 77,7% das mudanças na estrutura da comunidade microbiana a nível de filo (Figura 2). As variáveis que apresentaram maior influência na estrutura das comunidades foram, Na^+ , K^+ e as atividades enzimáticas da urease, fosfatase alcalina, arilsulfatase e β -glicosidase. As variáveis químicas Na^+ e K^+ apresentaram forte correlação com o filo Neocallimastigomycota, indicando uma possível preferência desse filo por solos com

maiores concentrações desses nutrientes. O carbono da biomassa microbiana, o pH do solo e a fosfatase ácida mostraram relação próxima, enquanto a produtividade das videiras esteve fortemente correlacionada com o teor de carbono orgânico total do solo o que já era esperado. Além disso, o filo Olpidiomyxota apresentou correlação com o teor de fósforo e com a atividade da enzima β -glicosidase, indicando que sua presença pode estar associada a processos de mineralização da matéria orgânica e disponibilidade de fósforo no solo. De modo geral, os tratamentos GFB, GSB + *T. aureoviride* e GFB + *T. hamatum* foram positivamente correlacionados com os filos Neocallimastigomycota, Monoblepharomycota, Blastocladiomycota e Basidiobolomycota.

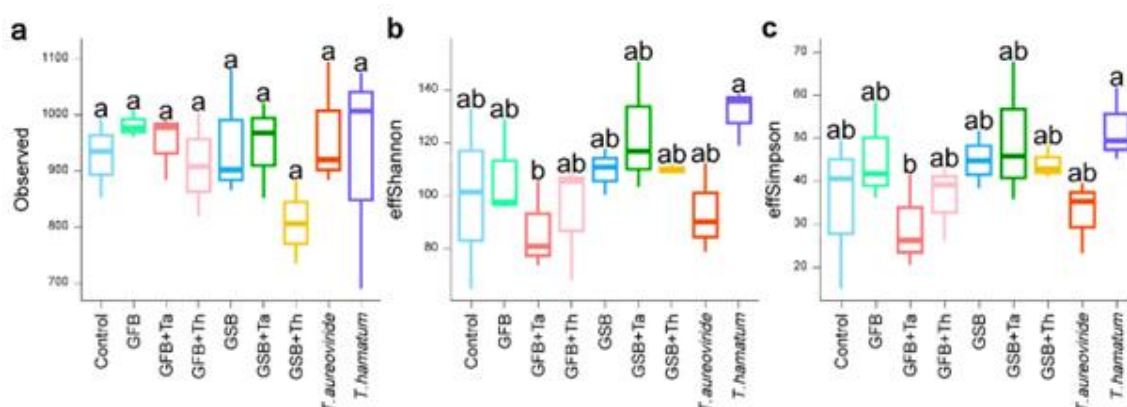
Figura 2- Análise de correlações canônicas incluindo variáveis químicas e enzimáticas e a atris de distância UniFraq das comunidades fúngicas de solo submetido a nove tratamentos.



3.3.2 Avaliação da diversidade com os índices de Shannon e Simpson

A diversidade da comunidade microbiana não apresentou diferenças estatísticas (Figura 3a), no entanto, para o tratamento com GSB+*T. hamatum* foi observado redução significativa da diversidade. Por outro lado, o índice de Shannon indicou maior riqueza para o solo que recebeu apenas *T. hamatum* (Figura 3b). Curiosamente, observamos que a combinação do GFB+*T.aureoviride* resultou em redução significativa da riqueza, indicando que a interação desse tratamento pode ter causado impacto negativo sobre as comunidades fúngicas no solo (Figura 3c).

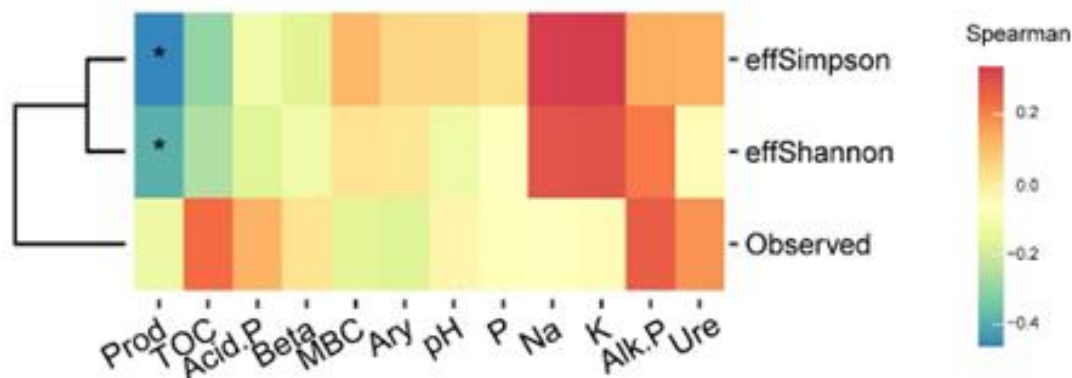
Figura 3-Variação nos números de ASVs (a), diversidade de Shannon (b) e índices de riqueza das comunidades fúngicas para cada tratamento (c).



Tratamentos: Control; GFB+Ta; GFB+Th; GFB; GSB+Ta; GSB+Th; GSB; *T. aureoviride*; *T. hamatum*. Tratamentos seguidas por diferentes letras minúsculas diferiram entre si, de acordo com os testes não paramétricos de Kruskal-Wallis, seguido de Dunn ($\alpha = 0.05$).

A análise de correlação de Spearman entre as variáveis bioquímicas do solo e os índices de alfa-diversidade revelou que apenas as variáveis químicas Na^+ e K^+ apresentaram correlações positivas com os índices de Simpson e de Shannon. Embora a produtividade das uvas e o carbono orgânico total do solo tenham apresentado correlações estatisticamente significativas ($P < 0,05$), essa relação foi considerada negativa (Figura 4).

Figura 4- Análise de associações entre variáveis bioquímicas e os índices de alfa-diversidade. Polígonos com asterisco (*) indicaram correlações de Spearman significativas (p -valor < 0.05) de acordo com análise de permutação multivariada (999 permutações).



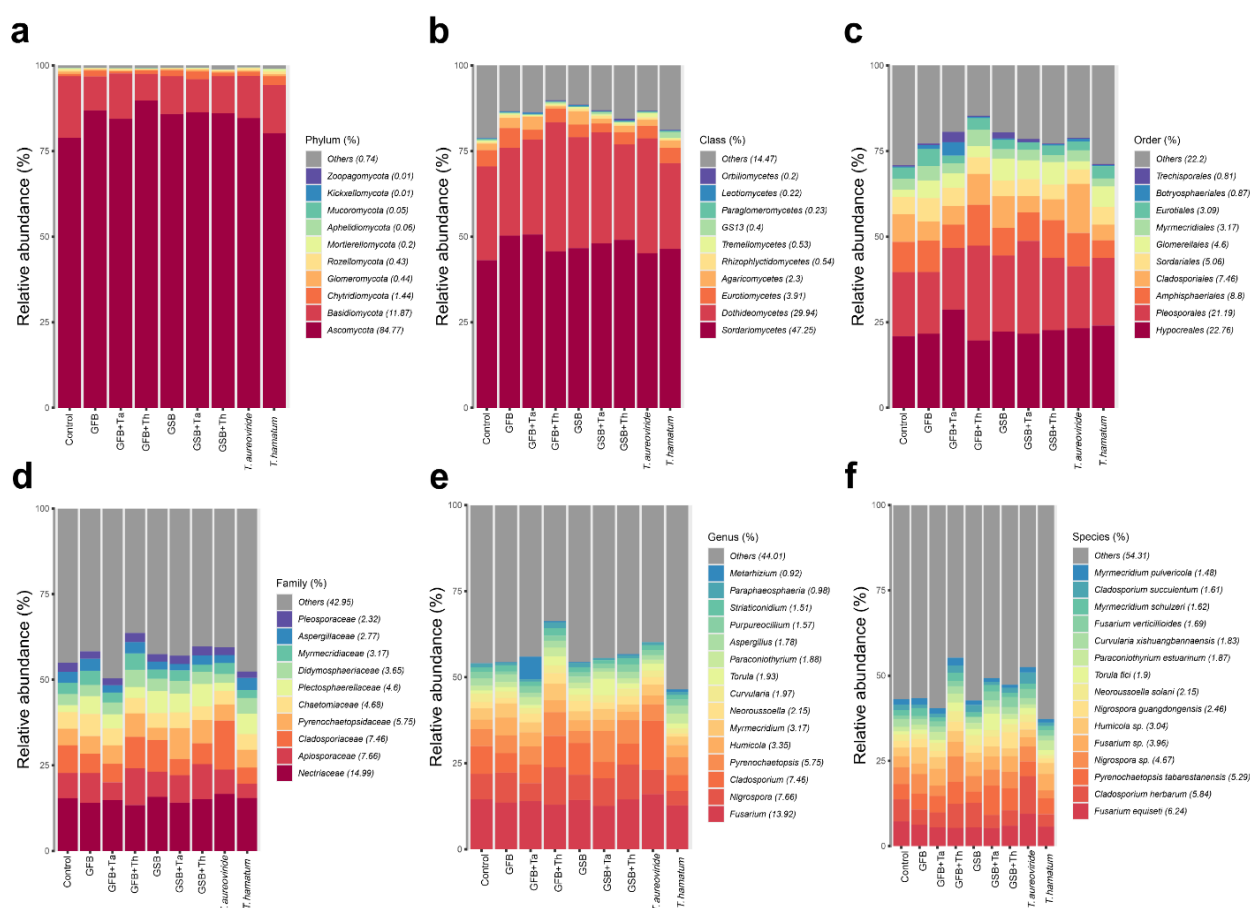
3.3.3 Abundância relativa dos táxons mais abundantes

No geral, identificamos 8.808 OTUs nas 27 amostras coletadas, sendo distribuídos em 17 filós, 59 classes, 148 ordens, 342 famílias, 785 gêneros, 1.353 espécies. A nível de filo, as comunidades fúngicas foram predominantemente compostas por Ascomycota, Basidiomycota, Chytridiomycota, Glomeromycota, Rozellomycota, Mortierellomycota, Aphelidiomycota, Mucoromycota, Kichxellomycota e Zoopamycota (Figura 5a). Entre eles, os quatro principais foram responsáveis por 0,44% a 84,77% da abundância relativa, com Ascomycota sendo o filo mais abundante (84,77%), seguido Basidiomycota, Chytridiomycota e Glomeromycota. Curiosamente, os quatro filós dominantes foram os mais impactados pela aplicação dos diferentes tratamentos, com destaque para o *T. hamatum*, que apresentou alterações superiores a 1% em relação ao solo controle. Por outro lado, Zoopagomycota e Mucoromycota foram os filós com menor abundância relativa, variando de 0,01% a 0,05%, respectivamente.

Os três gêneros *Fusarium*, *Nigrospora* e *Cladosporium*, foram dominantes independentemente dos diferentes tratamentos, onde as abundâncias relativas variaram de 13,92% a 7,45%. Os tratamentos que contribuíram para o aumento desses gêneros foram, GFB+Th e *T. aureoviride* (figura 5e). Além disso, curiosamente 44,01% das sequências desses fungos em cada amostra não puderam ser identificadas em um gênero definido. A nível de espécie, o mesmo padrão de alterações foram observadas para os tratamentos GFB+Th e *T. aureoviride*, com maiores contribuições atribuídas as espécies *Fusarium*

equiseti e *Cladosporium herbarium*, esse efeito pode ser atribuído à capacidade competitiva e funcional dessas espécies (Figura 5f).

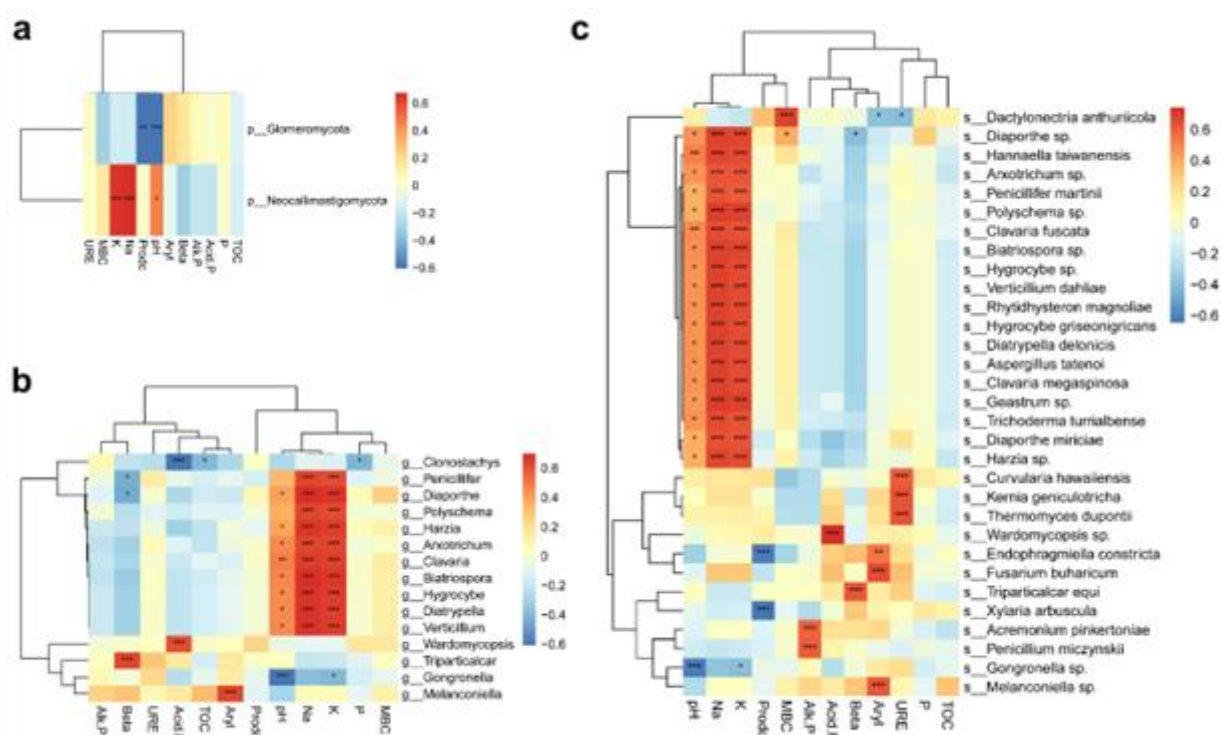
Figura 5- Abundância relativas dos táxons mais abundantes dentro dos seis ranks taxonômicos. Os dez principais grupos foram demonstrados nas barras para filo, classe, ordem e família, enquanto os quinze mais abundantes foram demonstrados para gênero e espécie.



Foram observadas correlações significativas ($P < 0,05$) entre as variáveis químicas do solo, como Na^+ , K^+ e pH, com os filos Glomeromycota e Neocallimastigomycota. Em contraste, a produtividade das uvas apresentou correlação negativa significativa apenas com o filo Glomeromycota (Figura 6a). A nível de gênero, o *Clonostachys*, *Penicillifer*, *Diaporthe*, *Polyschema*, *Harzia*, *Arxotrichum*, *Clavaria*, *Biatrispora*, *Hygrocybe*, *Diatrypella* e *Verticillium* mostraram correlações estatisticamente significativas e positivas com o pH do solo, Na^+ e K^+ (Figura 6b). Da mesma forma, as espécies *Dactylonectria anthriicola*, *Diaporthe* sp., *Hannaella taiwanensis*, *Arxotrichum* sp., *Penicillifer martinii*, *Polyschema* sp., *Clavaria fuscata*, *Biatrispora* sp., *Verticillium dahliae*, *Rhytidhysterium*

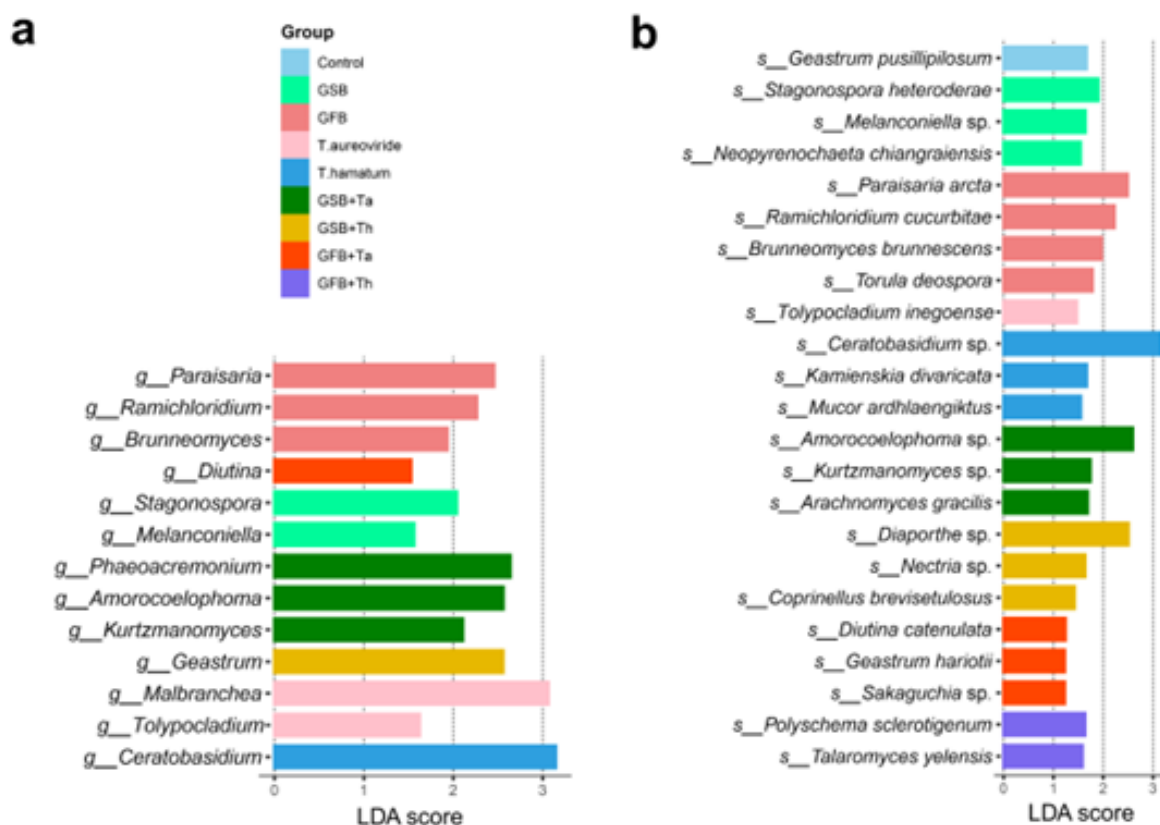
magnoliae, *Hygrocybe griseonigricans*, *Diatrypella delonicis*, *Aspergillus tatenoi*, *Clavaria megagaspinosa*, *Geastrum* sp., *Trichoderma turrialbense*, *Diaporthe miriciae*, *Harzia* sp., identificadas no ranking apresentaram correlações positivas (Figura 6c).

Figura 6- Correlações das variáveis bioquímicas com os principais táxons fúngicos. Apenas ranks taxonômicos que apresentaram níveis significativos foram plotados. Polígonos com asterisco (*) indicaram correlações de Spearman significativas (p -valor < 0.05) de acordo com análise de permutação multivariada (999 permutações).



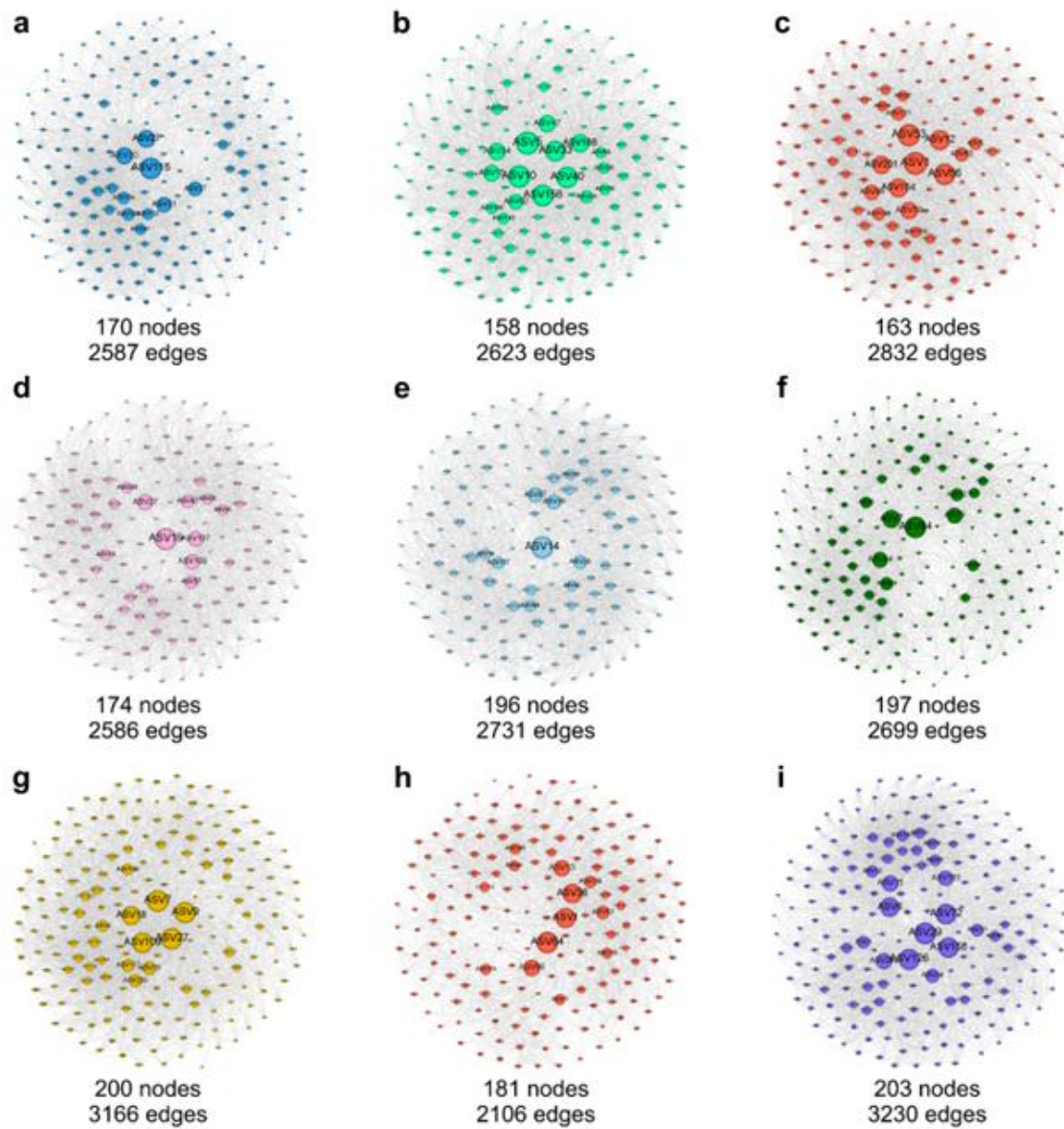
A análise de abundância diferencial por meio de Randon-forest, confirmou que a nível de gênero o GFB contribuiu para permanência dos gêneros *Paraisaria*, *Ramichloridium* e *Brunneomyces*, enquanto o GSB + *T.aureoviride* favoreceu os gêneros *Phaeoacremonium*, *Amorocoelophoma* e *Kurtzmanomyces*. Esses dois tratamentos foram os mais representativos com abundância relativa superior a 2% (Figura 7a). A nível de espécie, o tratamento com GFB foi o que mais contribuiu apresentando maior número de espécies em comparação aos demais tratamentos (Figura 7b).

Figura 7- Análises de abundância diferencial entre os principais gêneros e espécies. Apenas ranks taxonômicos que apresentaram níveis significativos foram plotados. Apenas os táxons ao nível de gênero (a) e espécie (b) apresentaram respostas significativas quanto a abundância diferencial ($p < 0.05$).



A análise de coocorrência revelou que a aplicação de *T. hamatum* resultou em uma rede de interações mais complexa em comparação ao solo controle. O tratamento com *T. hamatum* apresentou um coeficiente de complexidade ($C = 15,91$) e maior número de interações significativas ($\text{SparCC} \geq 0,9$, $p < 0,05$) em relação ao solo controle ($C = 15,21$). Essa complexidade foi avaliada com base na razão entre o número de arestas e nós dos ASVs, onde *T. hamatum* registrou 203 nós e 3.230 arestas, enquanto o solo controle apresentou 170 nós e 2.587 arestas (Figura 8).

Figura 8- Árvore de coocorrência de espécies fúngicas com interações significativas na rede.



Os nós (círculos) apresentaram diâmetro proporcional ao parâmetro grau (número de arestas conectadas), representando ASVs (Amplicon Sequence Variants) com interações significativas de acordo com análise de permutação ($\text{SparCC} \geq 0.9$, $p < 0.05$) com número de simulação SparCC para bootstrap igual a 1000 e o limite de abundância relativa (corte) foi de 0.0005. As arestas representam as correlações SparCC entre os nós. Os tratamentos: Control (a); GFB+Ta (b); GFB+Th (c); GBF (d); GSB+Ta (e); GSB+Th (f); GSB (g); *T. aureoviride* (h); *T. hamatum* (i)

3.4 Discussão

3.4.1 Estrutura da comunidade fúngica

Neste estudo, avaliamos o potencial da aplicação de dois tipos de biochars, provenientes de resíduos da produção do vinho, co-aplicados com dois isolados de duas espécies de *Trichoderma* na modulação das comunidades fúngicas de um solo cultivado com uva. Nossos resultados apoiam a hipótese inicial, revelando que a adição de biochar co-aplicados com *Trichoderma* pode alterar a estrutura das comunidades microbianas do solo. Conforme demonstrado na análise de correlações canônicas, a aplicação de biochar no solo teve efeito dinâmico sobre a comunidade fúngica alterações, especialmente do pH, e nos teores de Na e K favoreceram para o aumento de determinados táxons fúngicos, como revelado em nossos resultados. Considerando que o pH é um dos principais moduladores do microbioma do solo, variações nesse parâmetro podem alterar comunidades inteiras, influenciando a disponibilidade de nutrientes, competição microbiana, atividade metabólica e, conseqüentemente, a sobrevivência desses microrganismos no solo (HERRMANN et al., 2019). Mudanças no pH após a aplicação do biochar no solo são frequentemente relatadas em diversos estudos (ZHANG et al., 2024; IDBELLA et al., 2024) e nossos resultados estão de acordo com essas descobertas.

Os perfis de Shannon e Simpson revelaram que a aplicação de biochar e *Trichoderma* afetou a diversidade das comunidades microbianas, esse efeito pode ser atribuído às alterações que o biochar promove nas propriedades físicas e químicas do solo, incluindo o aumento da umidade e disponibilidade de nutrientes, criando condições seletivas que favorecem certos grupos microbianos enquanto inibem outros, resultando em redução da diversidade total (WEI et al., 2020; HUA et al., 2020). Por outro lado, a introdução do *Trichoderma* de forma isolada, curiosamente apresentou efeito negativo sobre a diversidade e abundância das comunidades fúngicas. Por ser um fungo altamente competitivo, é possível que o *T. aureoviride* tenha suprimido determinados grupos microbianos menos adaptados, reduzindo o número total de ASVs detectáveis (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023). Além disso, espécies do gênero *Trichoderma* produzem uma ampla gama de metabólitos antimicrobianos e enzimas hidrolíticas, capazes de inibir o crescimento de outros fungos (MUKHERJEE et al., 2022; ASHGAR et al., 2024), o que pode ter contribuído para a diminuição da diversidade microbiana no solo. Lopes et al. (2024), avaliando a produção de metabólitos secundários por isolados de *Trichoderma*,

observaram que algumas espécies são capazes de produzir compostos altamente supressivos, com grande impacto sobre outros microrganismos.

3.4.2 Composição da comunidade fúngica

A composição das comunidades foi fortemente afetada nos níveis taxonômicos mais altos (Filos e classes), Ascomycota e Basidiomycota foram os filos predominantes independentemente dos tratamentos. Esses filos são considerados os mais abundantes nas camadas superficiais do solo e desempenham funções ecológicas essenciais (MANICI et al., 2024). Os Ascomycota, amplamente reconhecidos como saprófitos, desempenham papel fundamental na degradação de compostos orgânicos, especialmente celulose e hemicelulose, enquanto os Basidiomycota são especializados na decomposição da lignina (FUKASAWA, 2021), juntos atuam em combinação ou em sequência de forma eficiente na decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes no solo (LI et al., 2022). Por outro lado, este resultado pode sugerir que as OTUs raras são mais afetadas do que as abundantes, resultando em alterações na composição da comunidade, mantendo a abundância geral de um filo ou uma classe específica. Algumas abordagens têm sido propostas para explicar o impacto do biochar nas comunidades microbianas do solo, uma das principais é que a aplicação inicial atua como uma fonte de nutrientes solúveis e carbono disponível, impulsionando a mineralização da pequena fração lábil do próprio biochar (IDBELLA et al., 2024), e essa pequena fração lábil de carbono atua como imputo da atividade microbiana, favorecendo o aumento de determinados grupos fúngicos no solo.

A predominância desses grupos de fungos pode ser atribuída a tolerância ao estresse e a alta capacidade de absorção de recursos, levando a estratégias mais generalistas, sugerindo que eles podem ser melhores na colonização de ampla gama de ambientes (JIA et al., 2018; EGIDI et al., 2019). Nossos achados estão alinhados com estudos anteriores que, ao avaliarem os impactos da aplicação do biochar sobre a diversidade fúngica, identificaram os filos Ascomycota e Basidiomycota como os mais abundantes e amplamente distribuídos na rizosfera (HERRMANN et al., 2019; MANAKAKIZA et al., 2024).

A nível de gênero, as abundâncias relativas de *Fusarium*, *Nigrospora* e *Cladosporium* foram favorecidos pela aplicação de GFB + *T. hamatum*. Esses gêneros, pertencentes ao filo Ascomycota, parecem se beneficiar tanto das propriedades do biochar quanto da presença do fungo *Trichoderma*. Comumente registrados como patógenos de plantas, esses fungos também são conhecidos pela produção de metabólitos secundários com grande

diversidade química e bioatividade no solo (XU et al., 2022). Por outro lado, curiosamente, observou-se que a aplicação isolada de *T. hamatum* sem biochar resultou em redução na abundância relativa do gênero *Fusarium* spp., isso sugere que *Trichoderma* pode inibir o crescimento desses fungos.

Além disso, quando analisamos esses fungos a nível de espécie, percebe-se que esse padrão se repete, revelando uma redução na abundância de *Fusarium equiseti* quando tratado com *T. hamatum*. Diversos estudos têm demonstrado a eficácia de espécies de *Trichoderma* no controle de *Fusarium* spp.. Por exemplo, Leyva-Morales et al. (2024), avaliaram os efeitos de *Trichoderma* no controle da murcha da pimenta, causada por *Fusarium equiseti*, e observaram redução significativa na abundância relativa deste fungo quando tratado com *Trichoderma harzianum*. Esses achados confirmam o potencial de *Trichoderma* como agente de biocontrole, destacando a capacidade de controlar patógenos de solo por meio de mecanismos de inibição.

A análise das correlações entre as variáveis químicas do solo e os táxons fúngicos evidencia que a estrutura das comunidades microbianas foi fortemente afetada pelas propriedades químicas do solo. Alterações no pH, e nos teores de K e Na foram determinantes na seleção dos táxons fúngicos com maior abundância identificados no presente estudo. Esses resultados sugerem que mudanças nas propriedades químicas do solo ocasionadas pela aplicação do biochar podem atuar como fatores seletivos na composição da microbiota, favorecendo alguns grupos fúngicos em detrimento de outros. Dentre os gêneros mais favorecidos por essas alterações, destacam-se *Verticillium*, *Diatrypella*, *Hygrocybe*, *Biatriospora*, *Clavaria*, *Arxotrichum*, *Harzia* e *Diaporthe*. Esse mesmo padrão também foi observado a nível de espécie, indicando que alterações nas propriedades químicas do solo foram determinantes na modulação das espécies fúngicas deste solo, especialmente para as espécies *Diaporthe* sp., *Clavaria fuscata* que apresentaram correlações significativas com essas variáveis.

A análise de abundância diferencial revelou que *T. hamatum* e *T. aureoviride* favoreceram a abundância dos gêneros *Malbranchea* e *Ceratobasidium*. Esses fungos desempenham papéis ecológicos essenciais no solo, especialmente na decomposição da matéria orgânica. *Malbranchea* abrange diversas espécies com capacidade de degradar substratos ricos em lignina (MONTEIRO et al., 2021), enquanto *Ceratobasidium* está associado à doença de plantas, mas também tem grande participação na decomposição da matéria orgânica (LEIVA et al., 2023). Ambos os gêneros são conhecidos por produzirem enzimas hidrolíticas, como a beta-glicosidase, que participa ativamente do ciclo do

carbono, liberando açúcares simples que podem ser utilizados por outros microrganismos do solo (MONTEIRO et al., 2021). Por outro lado, a aplicação de GFB e GSB+Ta favoreceu uma maior diversidade de outros gêneros fúngicos, sugerindo que as alterações promovidas pela aplicação do biochar de forma isolada ou combinada com *Trichoderma* nas propriedades do solo foi determinante para a predominância desses gêneros no solo.

3.4.3 Impacto da aplicação do biochar e *Trichoderma* nas redes de comunidades microbianas

Utilizamos a análise de rede para entender a dinâmica das comunidades fúngicas e suas complexidades quando submetidos a diferentes tratamentos. A análise de redes fornece a compreensão das relações dos grupos microbianos e pode mostrar insights sobre a estrutura dessas comunidades no solo (GUSEVA et al., 2022). Nossos resultados revelam que, a aplicação de *T. aureoviride* curiosamente levou a uma redução nas conexões dentro da comunidade fúngica. Por ser considerado um fungo com características supressivas, *T. aureoviride* pode ter exercido um efeito de supressão competitiva, eliminando ou reduzindo populações de fungos sensíveis. Esse efeito provavelmente resultou em uma rede microbiana menos conectada, com impacto direto na dinâmica e estrutura da comunidade do solo. Por outro lado, a aplicação de GFB e GSF tanto na sua forma isolada quanto combinada com *T. hamatum* apresentaram maiores números de conexões. Esse resultado sugere que os biochars criaram condições favoráveis ao desenvolvimento da microbiota, aumentando a disponibilidade de nutrientes e compostos orgânicos no solo, resultando em interações mais conectadas, diversas e densas, indicando uma comunidade potencialmente mais complexa (GAO et al., 2022). Além disso, a aplicação combinada de biochar e *Trichoderma* favoreceu um ambiente mais diversos, aumentando a abundância de microrganismos generalistas. Esses organismos tendem a ser mais sensíveis a mudanças ambientais, como variações nas propriedades físicas e químicas do solo, o que pode gerar um efeito mais seletivo na estruturação da comunidade microbiana. Assim, nossa análise de redes reforça que as variações ambientais, especialmente aquelas resultantes da modificação das propriedades químicas do solo, desempenham um papel determinante na dinâmica da comunidade microbiana e na ocorrência de determinados táxons.

3.5 Conclusões

Este estudo de curto prazo ressalta a importância da aplicação de biochar e *Trichoderma* na melhoria das propriedades químicas e microbiológicas de solos cultivados com videiras. Os benefícios observados incluem desde o aumento no armazenamento de carbono a mudanças favoráveis na estrutura e no metabolismo das comunidades microbianas. A nível de filo, as comunidades fúngicas foram predominantemente compostas por *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Chytridiomycota* e *Glomeromycota*, que, juntos, representaram 98,52% da abundância relativa no solo. Os tratamentos que mais contribuíram para o enriquecimento desses filos foram o biochar da fermentação da uva (GFB) e a combinação de GFB com *T. hamatum*. No nível de espécie, o tratamento com GFB foi o que mais contribuiu para o aumento da riqueza específica, apresentando maior número de espécies em comparação aos demais tratamentos. Nossas descobertas reforçam o papel do biochar e do *Trichoderma* como aliados na promoção de práticas agrícolas sustentáveis, contribuindo tanto para a saúde do solo quanto para a resiliência do ecossistema dos vinhedos. No entanto, são necessários estudos de longo prazo para uma melhor compreensão da dinâmica de absorção e armazenamento de carbono, bem como seus efeitos sobre o metabolismo fúngico e a microbiota do solo. Maximizar os benefícios desses insumos sem comprometer a biodiversidade fúngica é essencial para manter a funcionalidade e a sustentabilidade do sistema edáfico.

Referências

- ABHISHEK, K.; SHRIVASTAVA, A.; VIMAL, V.; GUPTA, A. K.; BHUJBAL, S. K.; BISWAS, J. K.; ROY, S.; PAUL, T.; SRIVASTAVA, P.; CHAKRABORTY, S.; KUMAR, R.; MEENA, R. S.; KUMAR, S.; KUMAR, M. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: A state-of-the-art review. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158562, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158562>.
- ADHIKARI, S.; MOON, E.; TIMMS, W. Identifying biochar production variables to maximise exchangeable cations and increase nutrient availability in soils. **Journal of Cleaner Production**, v. 446, p. 141454, 2024. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.141454](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.141454).
- ARAÚJO, A. S. F.; MEDEIROS, E. V.; COSTA, D. P. D.; MENDES, L. W.; CHERUBIN, M. R.; NETO, F. D. A.; BEIRIGO, R. M.; LAMBAIS, G. R.; MELO, V. M. M.; NÓBREGA, G. G.; BARBOSA, H. A.; MOTA, J. C. A.; SANTANA, R. M.; KAVAMURA, V. N.; BORGES, W. L.; PEREIRA, A. P. A. Caatinga Microbiome Initiative: disentangling the soil microbiome across areas under desertification and restoration in the Brazilian drylands. **Restoration Ecology**, v. 32, n. 1, p. e14298, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.14298>.
- ASGHAR, W.; CRAVEN, K. D.; KATAOKA, R.; MAHMOOD, A.; ASGHAR, N.; RAZA, T.; IFTIKHAR, F. Application of *Trichoderma* spp., an old but novel and useful fungus, in the sustainable intensification of soil health: A comprehensive strategy to address challenges. **Plant Stress**, p. 100455, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100455>
- CASALÍ, J.; GIMÉNEZ, R.; SANTISTEBAN L.; ÁLVAREZ-MOZOS, J.; MENA, J.; LERSUNDI V.D.J. Determination of long-term erosion rates in vineyards of Navarre (Spain) using botanical benchmarks. **Catena**, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.02.015>
- DASHTI, A.; RAJI, M.; HARAMI, H. R.; ZHOU, J. L.; ASGHARI, M. Biochar performance evaluation for heavy metals removal from industrial wastewater based on machine learning: Application for environmental protection. **Separation and Purification Technology**, v. 312, p. 123399, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123399>.
- DIXON, P. VEGAN, A package of R functions for community ecology. *Journal of Vegetation Science: Official Organ of the International Association for Vegetation Science*, v. 14, n. 6, 927–930, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02228.x>
- EGIDI, E.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; PLETT, J. M.; WANG, J; E, D. J.; BARDGETT, R. D.; MAESTRE, F. T.; SINGH, B. K. A few Ascomycota taxa dominate soil fungal communities worldwide. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 2369, 2019. DOI: [10.1038/s41467-019-10373-z](https://doi.org/10.1038/s41467-019-10373-z)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- ENDERS, A.; LEHMANN, J. Comparison of Wet-Digestion and Dry-Ashing Methods for Total Elemental Analysis of Biochar. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. 43. 1042-1052, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.656167>

FUKASAWA, Y. Ecological impacts of fungal wood decay types: a review of current knowledge and future research directions. **Ecological Research**, v. 36, n. 6, p. 910–931, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12223>.

GAO, S.; DeLUCA, T. H. Rangeland application of biochar and rotational grazing interact to influence soil and plant nutrient dynamics. **Geoderma**, v. 408, art. 115572, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115572>.

GRYTA, A.; PIOTROWSKA-DŁUGOSZ, A.; DŁUGOSZ, J.; FRĄC, M. The microbiome structure and shifts in surface and subsurface soil horizon of Haplic Luvisol under different crops cultivation. **Applied Soil Ecology**, v. 202, p. 105557, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105557>.

GUSEVA, K.; DARCY, S.; SIMON, E.; ALTEIO, L. V.; MONTESINOS-NAVARRO, A.; KAISER, C. From diversity to complexity: Microbial networks in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 169, p. 108604, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108604>.

GUZMÁN-GUZMÁN, P.; KUMAR, A.; DE LOS SANTOS-VILLALOBOS, S.; PARRA-COTA, F. I.; OROZCO-MOSQUEDA, M. D. C.; FADIJI, A. E.; ADEYEMI, N. O.; CARRIÓN, V. J.; WHITE, J. F.; SANTOYO, G. Trichoderma species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—A review. **Plants**, v. 12, n. 3, p. 432, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12030432>

GUZMÁN-GUZMÁN, P.; KUMAR, A.; DE LOS SANTOS-VILLALOBOS, S.; PARRA-COTA, F. I.; OROZCO-MOSQUEDA, M. D. C.; FADIJI, A. E.; ADEYEMI, N. O.; CARRIÓN, V. J.; WHITE, J. F.; SANTOYO, G. Trichoderma species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—A review. **Plants**, v. 12, n. 3, p. 432, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12030432>

GUZMÁN-GUZMÁN, P.; PORRAS-TRONCOSO, M. D.; OLMEDO-MONFIL, V.; HERRERA-ESTRELLA, A. *Trichoderma* species: versatile plant symbionts. **Phytopathology**, v. 109, n. 1, p. 6-16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-18-0218-RVW>

HARTMANN, M.; SIX, J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 4, p. 4–18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>.

HERRMANN, L.; THONAT, T.; SERE, G.; JEMELLE, L.; GAUTIER, C.; DEVIN, S.; LESTAGE, G.; CHÉREAU, L.; BRUN, J.; BOSSIO, D. A.; RILLIG, M. C. Impacto da dose de aplicação de biochar em comunidades microbianas do solo associadas a seringueiras no nordeste da Tailândia. **Science of the Total Environment**, v. 689, p. 970–979, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.124>.

HUA, B.; YANG, Y.; WANG, Y.; LI, H.; CHEN, L.; CHEN, Z.; WU, Z. Emenda de solo em estufa de plástico usando biochar modificado: respostas de diversidade bacteriana do solo e carbono e nitrogênio da biomassa microbiana. **Biotechnology Letters**, v. 43, p. 655–666, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10529-021-03181-2>.

IDBELLA, M.; BARONTI, S.; GIAGNONI, L.; RENELLA, G.; BECAGLI, M.; CARDELLI, R.; BONANOMI, G. Long-term effects of biochar on soil chemistry, biochemistry, and microbiota: results from a 10-year field experiment in vineyards. **Applied Soil Ecology**, v. 195, p. 105217, 2024.

- IDBELLA, M.; BONFANTE, P.; BORRIS, R.; MARCHAL, K.; LEBRUN, M.; MAZET, F.; BERTIN, C. Long-term effects of biochar on soil chemistry, biochemistry, and microbiota: results from a 10-year field vineyard experiment. **Applied Soil Ecology**, [S.l.], v. 195, p. 105217, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105217>
- JIA, A.; LI, J.; WANG, H.; ZHAO, Y.; LIU, M.; Biochar enhances soil hydrological function by improving the pore structure of saline soil. **Agricultural Water Management**, 2024 v. 306, p. 109170. DOI: doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109170
- JIA, T.; WANG, R.; FAN, X.; CHAI, B. A comparative study of fungal community structure, diversity and richness between the soil and the phyllosphere of native grass species in a copper tailings dam in Shanxi Province, China. **Applied Sciences**, v. 8, n. 8, art. 1297, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8081297>.
- LEHMANN, J.; BOSSIO, D. A.; KÖGEL-KNABNER, I.; RILLIG, M. C. The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 10, p. 544-553, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>.
- LEIVA, A. M.; PHAN, T.; NGUYEN, H.; NGUYEN, H.; NGUYEN, N.; NGUYEN, P.; LEE, SEUNG Y. *Ceratobasidium* sp. is associated with cassava witches' broom disease, a re-emerging threat to cassava cultivation in Southeast Asia. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 22500, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28923-6>.
- LEYVA-MORALES, R.; GÓMEZ-POMPA, E.; SÁNCHEZ-CASTILLO, J. R.; MENDOZA-VARGAS, A.; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, J. L.; MARTÍNEZ-CARRILLO, B. E. Soil Fungal Communities Associated with Chili Pepper Respond to Mineral and Organic Fertilization and the Application of the Biocontrol Fungus *Trichoderma harzianum*. **Applied Soil Ecology**, v. 201, p. 105523, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105523>.
- LI, T.; CUI, L.; SONG, X.; CUI, X.; WEI, Y.; TANG, L.; MU, Y.; XU, Z. Wood decay fungi: An analysis of worldwide research. **Journal of Soils and Sediments**, v. 22, n. 6, p. 1688–1702, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03225-9>.
- LI, X.; LIAO, Q.; ZENG, S.; WANG, Y.; LIU, J. The use of *Trichoderma* species for the biocontrol of postharvest fungal decay in fruits and vegetables: Challenges and opportunities. **Postharvest Biology and Technology**, v. 219, p. 113236, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113236>
- LI, Z.; LIU, T. High-quality genome sequence data of *Trichoderma gracile* HK011-1, a fungal antagonist agent against plant pathogens. **Plant Disease**, v. 106, n. 3, p. 1035-1038, 2022. DOI: [10.1094/PDIS-09-21-2006-A](https://doi.org/10.1094/PDIS-09-21-2006-A).
- LIMA, J.R.S.; DE MORAES SILVA, W.; DE MEDEIROS, E.V.; DUDA, G.P.; CORRÊA, M.M.; MARTINS FILHO, A.P.; HAMMECKER, C. Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. **Geoderma**, v. 319, p. 14-23, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.033>
- LIU, B.; JI, S.; ZHANG, H.; WANG, Y.; LIU, Z. Isolation of *Trichoderma* from the rhizosphere soil of *Syringa oblata* in Harbin and its biocontrol and growth-promoting functions. **Microbiological Research**, v. 235, p. 126445, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126445>

LIU, G. C.; LI, M. F.; ZHANG, Z.; HAN, F. L.; YAN, W.; LIU, Y. L.; LIU, X. Enhancement of grape heat tolerance through VvZIP36-mediated quercetin production. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 139826, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139826>

LOPES, AD; RIVADAVEA, WR; SILVA, GJ Metabólitos secundários de Trichoderma para controle efetivo de patógenos de plantas. In: Fungicidas nanohíbridos . **Elsevier**, 2024. p. 239-255. DOI: 10.1016/B978-0-443-23950-2.00008-4.

MANICI, L. M.; CAPUTO, F.; FORNASIER, F.; PALETTO, A.; CEOTTO, E.; DE MEO, I. Filos fúngicos Ascomycota e Basidiomycota como indicadores de eficiência do uso da terra para acúmulo de carbono orgânico do solo com plantações lenhosas. **Ecological Indicators**, v. 160, p. 111796, 2024. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111796

MANIRAKIZA, E.; ZIADI, N.; LÉVESQUE, V.; LATERRIÈRE, M. Short-term effects of co-applied biochar and paper mill biosolids on soil microbial communities under field conditions. **Applied Soil Ecology**, p.105718, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105718>.

MCMURDIE, P. J.; HOLMES, S. phyloseq: An R package for reproducible interactive analysis and graphics of microbiome census data. **Plos ONE**, v. 8, n. 4, p. e61217, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061217>

MEDEIROS, E. V.; COSTA D., S.; FERREIRA, A.; ROMUALDO, J.; HAMMECKER, C.; MENDES, L. W.; PRUDÊNCIO, A.; FERREIRA, S. Biochar and *Trichoderma* as an eco-friendly and low-cost alternative to improve soil chemical and biological properties. **Waste and Biomass Valorization**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02240-2>

MONTEIRO, L. M. O.; VICI, A. C.; MESSIAS, J. M.; HEINEN, P. R.; PINHEIRO, V. E.; VARGAS-RECHIA, C. G.; BUCKERIDGE, M. S.; TEIXEIRA DE MORAES-POLIZELI, M. de L. Increased *Malbranchea pulchella* β -glucosidase production and its application in agroindustrial residue hydrolysis: A research based on experimental designs. **Biotechnology Reports**, v. 30, p. e00618, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00618>.

MUKHERJEE, P. K.; MENDOZA-MENDOZA, A.; ZEILINGER, S.; HORWITZ, B. A. Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases. **Fungal Biology Reviews**, v. 39, p. 15-33, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004>

MUKHERJEE, P. K.; MENDOZA-MENDOZA, A.; ZEILINGER, S.; HORWITZ, B. A. Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases. **Fungal Biology Reviews**, v. 39, p. 15-33, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004>

NOVOTNY, ETELVINO HENRIQUE; MAIA, CLAUDIA MARIA BERTOLINI DE CARVALHO; CARVALHO, MARCO TÚLIO DE MELLO; MADARI, BEÁTA ÉVA. BIOCHAR: pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 39, n. 2, p. 321–344, abr. 2015. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/01000683rbcs20140818.

OKSANEN, J.; BLANCHET, F. G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; O'HARA, R. B.; SIMPSON, G. L.; WAGNER, H. vegan: Community Ecology Package. **R package version 1.17-2**, 2010., 2024. DOI: <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.vegan>.

PESCHEL, S. NetCoMi: **Network Construction and Comparison for Microbiome** Data. Versão 1.1.0. 2024.

POKHAREL, P.; MA, Z.; CHANG, S. X. Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra-and intracellular enzyme activities: a global meta-analysis. **Biochar**, v. 2, p. 65-79, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00039-1>.

PUROHIT, H. J.; PANDIT, P.; PAL, R.; WARKE, R.; WARKE, G. M. Soil microbiome: An intrinsic driver for climate smart agriculture. **Journal of Agriculture and Food Research**, p. 101433, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101433>.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: **R Foundation for Statistical Computing**, 2025. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 08 jan. 2025.

SCHLIEP, K. P. *phangorn: phylogenetic analysis in R*. **Bioinformatics**, v. 27, n. 4, p. 592–593, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq706>.

SILVA, J. S., VALENTE, E., DIOGO, ALBERTO, C., BRAGA, J., FÉLIX, R., SOUZA-MOTTA, C., ROMUALDO, J., & HAMMECKER, C. Biochar and Trichoderma aureoviride URM 5158 as alternatives for the management of cassava root rot. **Applied Soil Ecology**, 172, 104353–104353, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104353>

SILVA, J. S.; VALENTE, E.; DIOGO, A. C.; BRAGA, J.; FÉLIX, R.; SOUZA-MOTTA, C.; ROMUALDO, J.; HAMMECKER, C. Biochar and Trichoderma aureoviride URM 5158 as alternatives for managing cassava root rot. **Applied Soil Ecology**, v. 172, p. 104353, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104353>

SINGH, H.; NORTHUP, B. K.; RICE, C. W.; PRASAD, P. V. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. **Biochar**, v. 4, n. 1, p. 8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1>.

SOOD, M.; KAPOOR, D.; KUMAR, V.; SHETIWIY, M. S.; RAMAKRISHNAN, M.; LANDI, M.; ARANITI, F.; SOFO, A.; SHARMA, A. Trichoderma: the “secrets” of a multitasking biocontrol agent. **Plants**, v. 9, n. 6, p. 762, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9060762>

SUN, HONG; FENG, YAN; YI, ZHEN; JAYAKUMAR, PRABAKARAN; XIA, CHANG; LAM, SIMON S.; SONNE, CHRISTIAN; WANG, HAO; SHI, WEI. Effect of biofertilizer and wheat straw biochar application on nitrous oxide emission and ammonia volatilization from paddy soil. **Environmental Pollution**, v. 275, p. 116640, 2021. DOI: [10.1016/j.envpol.2021.116640](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116640).

WEI, MENGMEI; ZHANG, YUAN; LI, YU; ZHENG, XU. Biochar inoculado com *Pseudomonas putida* melhora a qualidade da uva (*Vitis vinifera* L.) e altera a diversidade bacteriana. **Rhizosphere**, v. 16, p. 100261, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100261>.

WOO, S. L.; HERMOSA, R.; LORITO, M.; MONTE, E. Trichoderma: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. **Nature Reviews Microbiology**, v. 21, n. 5, p. 312-326, 2023. DOI: <https://doi.org/s41579-022-00819-5>.

WRIGHT, E. S. Using DECIPHER v2.0 to analyze big biological sequence data in R. **The R Journal**, v. 8, n. 1, p. 352–359, 2016. DOI: [10.32614/RJ-2016-025](https://doi.org/10.32614/RJ-2016-025).

YU, L. Design and performance of micro-zone C diffusion device to explore the importance of distance for soil microorganisms to utilize available exogenous carbon source. **Applied Soil Ecology**, v. 201, p. 105494, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105494>.

ZHANG, PENG; LI, YAN; WANG, YU; LI, JIAN; LIU, XIAO; ZHANG, HONG. Como o biochar reduz os impactos negativos da cobertura plástica sobre enzimas e microrganismos do solo, ao mesmo tempo em que eleva os rendimentos das culturas em sistemas de sulcos de cumeeira. **Environmental Research**, v. 263, p. 120155, 2024. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120155.

4.CAPÍTULO III: BIOCHAR E *TRICHODERMA* MODIFICAM PROPRIEDADES QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DE UM SOLO CULTIVADO COM UVA MALBEC

Resumo

A aplicação de biochar é amplamente reconhecida como uma estratégia eficaz para aprimorar os serviços ecossistêmicos do solo. Seu uso tem ganhado destaque devido à sua capacidade de atuar como condicionador do solo. Embora o biochar tenha se destacado devido a sua versatilidade em aplicações nos sistemas agrícolas, seu efeito combinado com microrganismos benéficos no solo ainda precisa ser elucidada, especialmente com o gênero *Trichoderma spp.* Esses microrganismos são amplamente reconhecidos por sua eficiência no controle biológico de fitopatógenos e na promoção do crescimento vegetal. No entanto, o impacto da co-aplicação na microbiota do solo e nos processos de ciclagem de nutrientes ainda necessita de mais investigação para uma melhor compreensão. Para preencher essa lacuna, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do biochar produzido a partir do engaço de uva e resíduos da fermentação da uva, aplicado em conjunto com *Trichoderma aureoviride* URM 5158 e *Trichoderma hamatum* URM 6656 em solos cultivados com videiras Malbec. O experimento foi conduzido em campo com delineamento em blocos ao acaso, com nove tratamentos e três repetições. Nossos resultados revelaram que tanto os tipos de biochar quanto *Trichoderma* promoveram alterações nas propriedades do solo. Os maiores incrementos foram observados com a co-aplicação do biochar da fermentação de uva (GFB) e *T. hamatum* (GFB+Th), com aumentos de 569,23% no carbono da biomassa microbiana (MBC), 60,73% no carbono orgânico total (TOC) e 86,70% no teor de potássio (K). A aplicação isolada do GFB elevou a atividade da fosfatase ácida em 38,76%, enquanto sua co-aplicação com *T. hamatum* aumentou a atividade da beta-glicosidase em 56,46%. Além disso, nossos resultados indicam que a aplicação isolada de *T. hamatum* melhorou a produtividade, com aumento de 51,20% no número de cachos e 121,14% no peso total dos cachos de uva em comparação ao controle. Os achados deste estudo, fornecem evidências substanciais de que o biochar e *Trichoderma* podem ser utilizados para melhorar as propriedades químicas e biológicas dos solos de vinhedos, aumentando a disponibilidade de nutrientes, especialmente o carbono. Esses efeitos podem contribuir para melhorar a qualidade do solo, promovendo um ambiente mais favorável ao desenvolvimento da microbiota e ao crescimento das videiras. Assim, a aplicação combinada de biochar e *Trichoderma* surge como uma estratégia promissora para a sustentabilidade e produtividade dos vinhedos.

Palavras-chave: Enzimas do solo. Biomassa microbiana. Biocarvão. Viticultura sustentável.

4. CHAPTER III: BIOCHAR AND TRICHODERMA MODIFY THE CHEMICAL AND MICROBIAL PROPERTIES OF A SOIL CULTIVATED WITH MALBEC GRAPES

Abstract

The application of biochar is widely recognized as an effective strategy for enhancing soil ecosystem services. Its use has gained prominence due to its capacity to function as a soil conditioner. Although biochar stands out for its versatility in agricultural systems, its combined effect with beneficial soil microorganisms still requires further clarification—particularly with the genus *Trichoderma* spp. These microorganisms are well known for their efficiency in the biological control of phytopathogens and in promoting plant growth. However, the impact of co-application on soil microbiota and nutrient cycling processes remains insufficiently understood and warrants further investigation. To address this gap, the present study aimed to evaluate the effect of biochar produced from grape pomace and grape fermentation residues, co-applied with *Trichoderma aureoviride* URM 5158 and *Trichoderma hamatum* URM 6656 in soils cultivated with Malbec grapevines. The field experiment was conducted using a randomized block design with nine treatments and three replicates. Our results revealed that both types of biochar and *Trichoderma* strains induced changes in soil properties. The greatest improvements were observed with the co-application of grape fermentation biochar (GFB) and *T. hamatum* (GFB+Th), resulting in increases of 569.23% in microbial biomass carbon (MBC), 60.73% in total organic carbon (TOC), and 86.70% in potassium (K) content. The sole application of GFB enhanced acid phosphatase activity by 38.76%, while its co-application with *T. hamatum* increased β -glucosidase activity by 56.46%. Furthermore, our results indicated that the isolated application of *T. hamatum* improved productivity, with a 51.20% increase in the number of grape clusters and a 121.14% increase in total cluster weight compared to the control. The findings of this study provide substantial evidence that biochar and *Trichoderma* can be used to improve the chemical and biological properties of vineyard soils by increasing nutrient availability, particularly carbon. These effects contribute to enhanced soil quality, fostering a more favorable environment for microbial development and grapevine growth. Therefore, the combined application of biochar and *Trichoderma* emerges as a promising strategy for enhancing the sustainability and productivity of vineyards.

Keywords: Soil Enzymes. Microbial Biomass. Biochar. Sustainable Viticulture.

4.1 Introdução

A viticultura é uma das práticas agrícolas mais antigas, amplamente difundidas e economicamente rentáveis no mundo. No entanto, enfrenta desafios significativos devido ao uso intensivo e prolongado de práticas insustentáveis, como a aplicação excessiva de fertilizantes e pesticidas (GIFFARD et al., 2022). Essas práticas podem comprometer a biodiversidade do solo e afetar negativamente as funções ecossistêmicas essenciais (TEIXEIRA et al., 2025), reduzindo sua resiliência e sustentabilidade a longo prazo.

A saúde do solo é um fator determinante para uma viticultura sustentável, impactando diretamente na produtividade e qualidade do vinho. Dessa forma, é crucial desenvolver práticas que reduzam os impactos ambientais e promovam melhorias na qualidade do solo, favorecendo o crescimento e a produtividade das videiras. Nesse contexto, o biochar, um material rico em carbono obtido da pirólise de resíduos vegetais, surge como uma solução promissora para a melhoria da qualidade do solo, contribuindo para o aumento da fertilidade e a redução de impactos ambientais (KURNIAWAN et al., 2023).

Além de atuar como condicionador do solo, o biochar desempenha um papel importante na mitigação das mudanças climáticas, promovendo o sequestro de carbono e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa (ZHOU et al., 2024; ZHANG et al., 2024). Sua eficácia nesse processo está relacionada à sua estrutura carbonácea altamente estável, que se decompõe lentamente no ambiente, criando um reservatório de carbono a longo prazo, reduzindo a liberação de gases como o dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera (MARQUES et al., 2022). Nos últimos anos, a adição de biochar ao solo tem sido amplamente estudada como uma estratégia promissora para reduzir o descarte de resíduos orgânicos e, ao mesmo tempo, melhorar a qualidade dos solos agrícolas, tornando-se um recurso valioso para a construção de sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis. Sua aplicação contribui para a regulação do pH do solo (SINGH et al., 2022), aumenta a capacidade de retenção de água (RAZZAGHI et al. 2020), e melhora a fertilidade dos solos, pois atua como uma fonte de macro e micronutrientes, graças ao seu alto valor nutricional (ZOU et al., 2023).

Aplicações de biochar também pode ter vários efeitos diretos e indiretos nas comunidades microbianas do solo que são sensíveis a mudanças ambientais (WANG et al., 2021). Dependendo de suas propriedades físico-químicas, a adição de biochar no solo

pode melhorar a estrutura da comunidade microbiana do solo por meio de mudanças nos processos bioquímicos e funções microbianas (PALANSOORIYA et al., 2019).

As propriedades físico-químicas do biochar podem variar de acordo com a temperatura de pirólise, o tipo de matéria-prima e os métodos de produção (GHODAKE et al., 2021; RUAN et al., 2025), sendo esses fatores determinantes para sua estabilidade no solo. Pesquisas recentes têm explorado as interações entre biochar e microrganismos benéficos no solo, destacando essa combinação como uma estratégia promissora para impulsionar o crescimento das plantas e aprimorar as propriedades do solo (ARAÚJO et al., 2025).

Trichoderma é um gênero de fungos filamentosos amplamente reconhecidos por seu papel na proteção de plantas contra diversos fitopatógenos do solo (GUZMÁN-GUZMÁN et al., 2023; KREDICS et al., 2024). Não é surpreendente que o *Trichoderma* seja o principal componente ativo em diversas formulações de agentes de biocontrole disponíveis comercialmente, oficialmente reconhecidas como produtos para a proteção de plantas (WOO et al., 2023). No entanto, seu potencial vai além, pois também atua como promotor do crescimento de plantas facilitando a absorção de nutrientes e ativando mecanismos naturais de defesa das plantas. Pesquisas recentes (LIU et al., 2020; ASGHAR; KATAOKA, 2021; CONTRERAS-CORNEJO et al., 2024) destacam os efeitos positivos de *Trichoderma* no crescimento das plantas, reforçando seu potencial como um aliado na sustentabilidade agrícola.

Os mecanismos de promoção de crescimento das plantas estão envolvidos na liberação de ácido indol acético e outros compostos ligados à auxina, um hormônio vegetal semelhante à auxina, que desempenha um papel crucial no desenvolvimento da raiz durante os estágios iniciais do crescimento da planta (LLESCAS et al., 2021). Além de estimular o desenvolvimento radicular, esses compostos regulam diversos processos fisiológicos da planta, resultando em maior absorção de nutrientes e resistência a estresses ambientais. Embora estudos (WEI et al., 2020; MEDEIROS et al., 2023) tenham relatado os efeitos positivos da associação de microrganismos com biochar, impactos específicos da co-aplicação de biochar e *Trichoderma* spp. em solos cultivados com videiras ainda são pouco explorados e necessitam de mais investigação, devido a complexidade dessa interação. Mais investigações são necessárias para desenvolver uma abordagem sustentável que permita aos produtores reaproveitar resíduos agrícolas em um produto de valor agregado, reduzindo assim a dependência de insumos externos.

Diante disto, hipotetizamos que o biochar amplificará os efeitos benéficos de *Trichoderma* na produtividade do vinhedo, ao mesmo tempo em que melhorará as propriedades químicas do solo, bem como as atividades enzimáticas absolutas e específicas. Para testar essa hipótese, investigamos a eficácia do biochar derivado de diferentes resíduos de vinhedo, associado a *Trichoderma* spp., na produtividade das videiras Malbec e nas propriedades químicas e biológicas do solo. Este é o primeiro estudo de campo a investigar o impacto do reaproveitamento de resíduos de vinícola transformados em biochar, combinados com isolados de *Trichoderma*, em videiras Malbec.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo e delineamento experimental

O estudo foi conduzido na Vinícola Vale das Colinas, situada em Garanhuns, estado de Pernambuco, Brasil (8°56'19" S, 36°31'21" O), a uma altitude de 800 metros acima do nível do mar. A região apresenta temperatura média anual de 20 °C e precipitação média de 1.300 mm. O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico com textura franco-arenosa, de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (EMBRAPA, 2018). Os atributos químicos do solo experimental estão na Tabela 3.

Tabela 3- Propriedades químicas da área cultivada com videiras Malbec.

pH	C.E	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	P	B.S	H+Al	CTC	Al ³⁺	V%	C	O.M
H ₂ O	dS/m	Cmolc/dm ³											
7,4	0,52	3,6	1,8	0,44	0,22	96,08	6,02	0,00	6,02	0,00	100	10,7	18,5

B.S -Base saturation, O.M organic matter.

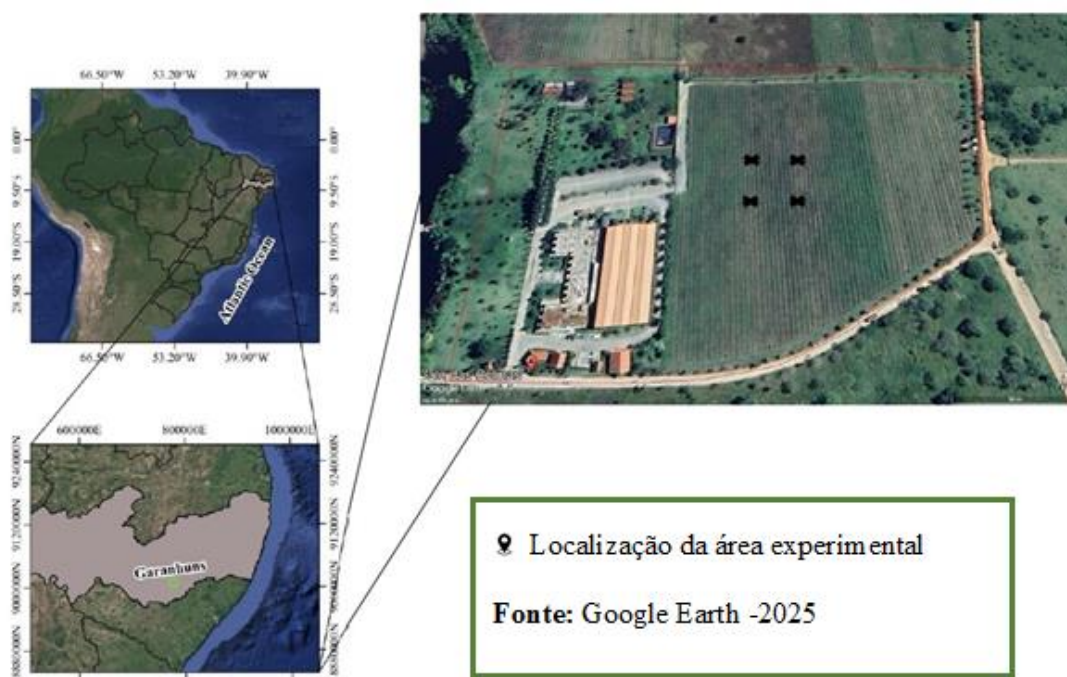
O experimento foi realizado em áreas de cultivo de videiras da variedade Malbec, com avaliações iniciadas em julho de 2023 e concluídas em setembro de 2024. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados com nove tratamentos e três repetições. Os tratamentos foram: (1) Controle; (2) Biochar produzido a partir do engaço da uva (GSB); (3) Biochar originado do subproduto da fermentação da uva. (GFB); 4. *Trichoderma aureoviride* (*T. aureoviride*); 5. *Trichoderma hamatum* (*T.hamatum*); 6. Biochar engaço da uva + *Trichoderma aureoviride* (GSB+Ta); 7. Biochar engaço da uva + *Trichoderma hamatum* (GSB+Th); 8. Biochar fermentação da uva +*Trichoderma*

aureoviride (GFB+Ta); 9. Biochar fermentação da uva+ *Trichoderma hamatum* (GFB+Th).

4.2.2 Produção e caracterização do biochar

Os biochars foram produzidos por meio de pirólise utilizando ramos de uva (GSB) e resíduos de fermentação de uva (GFB), ambos gerados como subprodutos da produção de vinho. Esses resíduos foram obtidos de uma vinícola localizada na região semiárida do Brasil, onde o experimento de campo foi conduzido (Figura 9). O processo de pirólise foi realizado a 400 °C por 12 horas em condições limitadas de oxigênio.

Figura 9- Mapa da área experimental vinícola vale das colinas, Garanhuns, PE.



Os teores dos nutrientes (Ca, Mg, Al, Fe, Mn e Zn) nos biochars foi determinado por espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), enquanto K e Na foram medidos por fotometria de chama, sendo as amostras previamente submetidas à digestão ácida, de acordo com o método de cinzas secas sugerido por Enders e Lehmann (2012), com algumas modificações. Após a digestão ácida, o conteúdo de P foi determinado

pelo método colorimétrico do ácido molibdovanadofosfórico (MAPA). A caracterização química dos dois biochars é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4- Caracterização química dos biochars de engaço e fermentação da uva Malbec.

Atributos químico	Unidade	Biochar engaço da uva	Biochar fermentação da uva
pH	H ₂ O	10.44	10.28
CEC	mmol/dm ³	9.0	107.9
C	g kg ⁻¹	332.2	142.8
N	g kg ⁻¹	7.4	21.7
C/N	-	44.8	6.6
P	g kg ⁻¹	11.8	7.6
K	g kg ⁻¹	82.0	51.9
Ca	g kg ⁻¹	13.2	6.8
Mg	g kg ⁻¹	3.6	2.0
Na	g kg ⁻¹	4.6	4.5
Si	g kg ⁻¹	1.2	0.1
Fe	mg kg ⁻¹	5055.9	796.0
Cu	mg kg ⁻¹	26.8	29.9
Mn	mg kg ⁻¹	118.8	57.0
Zn	mg kg ⁻¹	182.8	263.2
B	mg kg ⁻¹	29.0	20.1

O pH foi determinado em água na proporção de 1:2,5; CTC (Capacidade de Troca Catiônica) foi medida a pH 7,0; P disponível foi determinado como fósforo disponível; Ca - cálcio trocável; Mg - magnésio trocável; Na - sódio trocável; K - potássio trocável.

4.2.3 Preparo e inoculação dos *Trichoderma*

Utilizamos dois isolados: *Trichoderma aureoviride* URM 5158 (Ta) e *Trichoderma hamatum* URM 6656 (Th). Ambos isolados foram obtidas da Coleção de Culturas URM (<https://www.ufpe.br/micoteca/>). Os inoculantes de *Trichoderma* foram cultivados em frascos de Erlenmeyer de 125 mL contendo 25 mL de ágar batata dextrose e incubados em um incubador B.O.D. por 7 dias a 30 °C. Os inoculantes foram preparados de acordo com o método descrito por Silva et al. (2022), e ajustados para manter uma concentração de 10⁶ esporos mL⁻¹. Cada biochar foi individualmente inoculado com a concentração de esporos descrita acima, acrescido de 100 ml de água destilada e em seguida aplicado e incorporado no solo. A concentração de biochar utilizada foi utilizada abaixo da dose de 2%, considerada como limite para uso do biochar em solos agrícolas (NOVOTNY et al., 2015).

4.2.4 Amostragem de solo e análise química

Para a avaliação das propriedades químicas do solo, as amostras foram coletadas na camada de 0 a 10 cm de profundidade, próxima às raízes das plantas. O pH foi determinado em água 1:2,5, os teores de fósforo disponível, sódio (Na^+) e potássio (K^+), foram extraídos utilizando o método Mehlich-1, conforme descrito pela Teixeira (2017). A determinação do fósforo foi realizada por espectrofotometria, seguindo o método de Braga e Defelipo (1947), enquanto os teores de Na^+ e K^+ foram determinados por fotometria de chama. O carbono orgânico total (COT) do solo foi determinado pelo método de combustão seca, utilizando uma mufla, de acordo com a metodologia proposta por Teixeira (2017).

4.2.5 Biomassa microbiana e Atividades Enzimáticas

O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi extraído pelo método da irradiação, descrito por Mendonça e Matos (2005). A extração da biomassa seguiu os protocolos proposto por Vance et al. (1987) e Tate et al. (1988), utilizando K_2SO_4 0,5 M como extrator. A determinação do CBM foi realizada por colorimetria, conforme descrito por Bartlett e Ross (1988).

As atividades das enzimas fosfatase ácida (EC 3.1.3.2), e alcalina (EC 3.1.3.1), foram avaliada usando p-nitrofenil fosfato dissódico como substrato, incubado por 1 hora a 37°C, e o p-nitrofenol produzido foi medido a 420 nm (TABATABAI; BREMNER, 1969). A atividade potencial da β -glucosidase (EC 3.2.1.21) foi determinada com p-nitrofenil β -glucopiranosídeo como substrato, incubado por 1 hora a 37°C, e o p-nitrofenol resultante foi quantificado espectrofotometricamente a 400 nm (EIVAZI; TABATABAI, 1988). Arilsulfatase (EC 3.1.6.1) foi medida após a liberação do p-nitrofenol, quando o solo foi incubado com solução de p-nitrofenil sulfato de potássio (SPENCER, 1958). E urease (EC 3.5.1.5), foi determinada usando ureia como substrato, incubada por 2 horas a 37°C, e o amônio produzido foi medido espectrofotometricamente a 690 nm.

4.2.6 Avaliação da produtividade das uvas

A produtividade das uvas foi analisada com base em três parâmetros: (1) produção por planta, representada pela quantidade de uvas colhidas por videira (kg/planta), sendo cada unidade experimental equivalente a uma planta, totalizando 27 unidades experimentais; (2)

número total de cachos produzidos por planta; e (3) peso médio dos cachos (kg/cacho). Esses indicadores permitiram uma avaliação detalhada do desempenho produtivo das videiras submetidas aos diferentes tratamentos.

4.2.7 Análises estatísticas

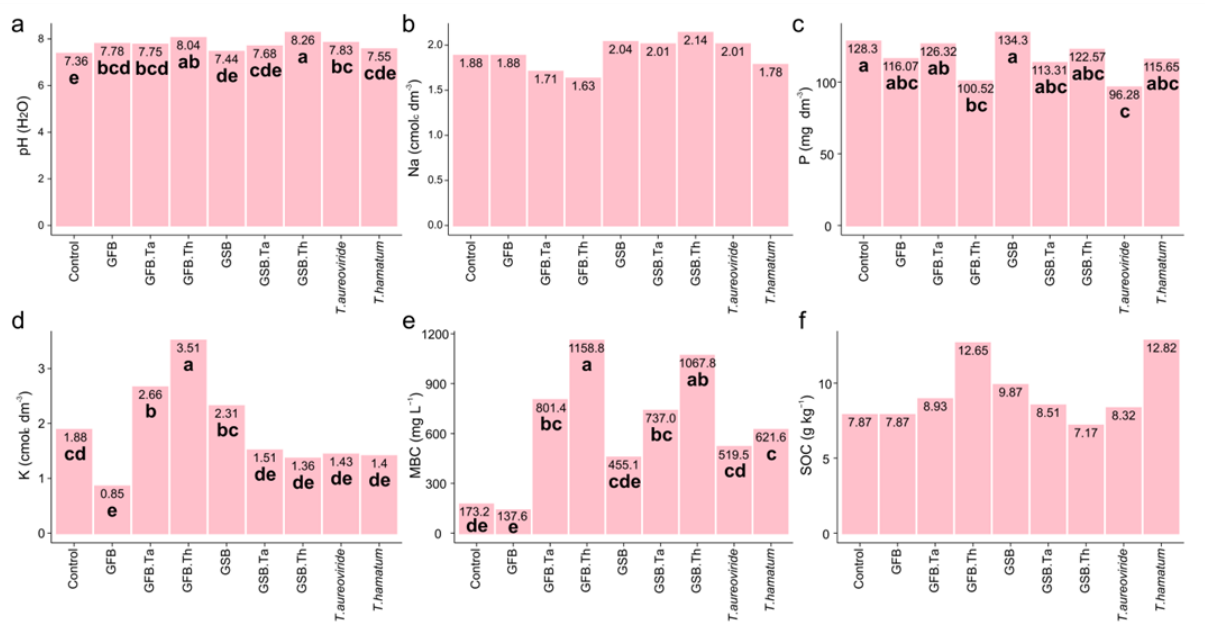
Todos os dados foram analisados utilizando o software R v.4.2.3. A análise de variância (ANOVA) foi realizada em blocos inteiramente casualizado, com nove tratamentos, uma variedade de uva (Malbec), e três repetições, totalizando um universo amostral de 27 parcelas. A suposição de normalidade foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk, e as médias das variáveis com variâncias significativas foram comparadas pelo teste de Tukey (HSD). Um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) foi adotado para todos os testes estatísticos. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada para explorar correlações entre variáveis e influências dos tratamentos, utilizando os recursos do pacote 'factoextra' do R.

4.3 Resultados

4.3.1 Alterações nas propriedades químicas e microbiológicas do solo

Os atributos químicos e biológicos do solo diferiram entre as aplicações de *Trichoderma* spp. e biochar (Fig. 10 e 11). A aplicação de biochar GSB + *T. hamatum* aumentou o pH do solo em 12,22% (Fig. 10a). Enquanto, a aplicação de GSB resultou em aumento de 4,68% no fósforo e 86,70% no teor de potássio. Além disso, o conteúdo de carbono orgânico total aumentou 60,73% em comparação ao controle (Fig. 10). A aplicação de biochar, tanto isoladamente quanto em combinação com *Trichoderma*, afetou significativamente o carbono da biomassa microbiana. O aumento maior pronunciado foi registrado no tratamento GFB + *T. hamatum*, atingindo impressionantes 569,23%, (Fig 10e).

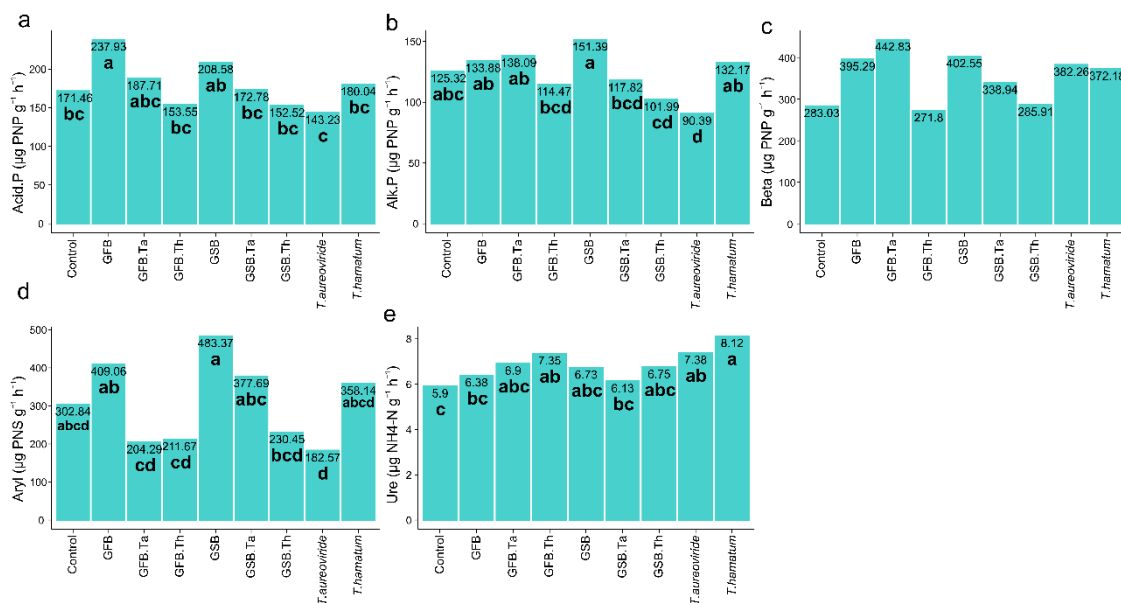
Figura 10- Atributos químicos e biológicos do solo submetido a diferentes fontes de biochar e isolados de *Trichoderma* e cultivado com videiras da cultivar Malbec.



a) pH, b) Na, c) P, d) K, e) Carbono da biomassa microbiana (MBC), f) Carbono orgânico do solo (SOC). Diferenças significativas entre os tratamentos são indicadas por letras minúsculas diferentes ($p < 0,05$). Tratamentos: controle (Ctrl); biochar de bagaço de uva (GSB); biochar de fermentação de uva (GFB); *Trichoderma aureoviride* URM 5158 (Ta); **Trichoderma hamatum** URM 6656 (Th); GSB combinado com *T. aureoviride* (GSB.Ta); GSB combinado com *T. hamatum* (GSB.Th); GFB combinado com *T. aureoviride* (GFB.Ta); e GFB combinado com *T. hamatum* (GFB.Th).

As atividades enzimáticas absolutas do solo responderam de forma distinta às diferentes fontes de biochar e à presença de *Trichoderma*. A aplicação de GFB aumentou significativamente a atividade da fosfatase ácida em 38,76% (Figura 11a), enquanto o GSB promoveu aumentos de 20,80% na atividade da fosfatase alcalina (Figura 11b) e 59,61% na atividade da arilsulfatase (Figura 11d). Além disso, a atividade da urease mostrou aumento de 37,62% em comparação ao controle (Figura 11e).

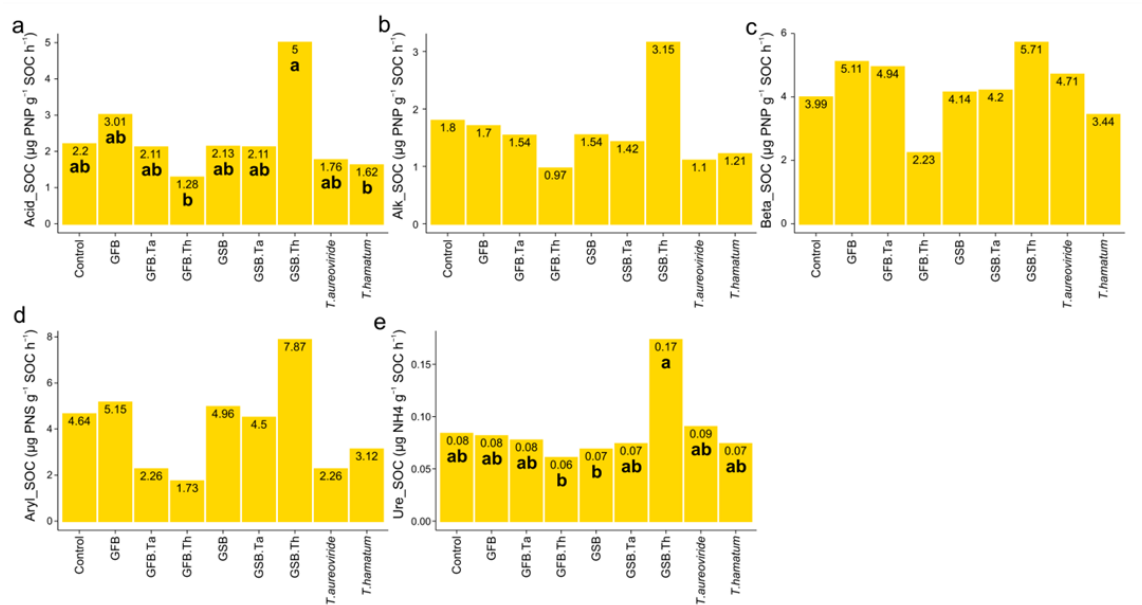
Figura 11- Atividades enzimáticas absolutas do solo submetido a diferentes fontes de biochar e isolados de *Trichoderma*, cultivado com plantas de uva da cultivar Malbec.



a) Fosfatase ácida, b) Fosfatase alcalina, c) β -glucosidase, d) Arilsulfatase, e) Urease. Diferenças significativas entre os tratamentos são indicadas por letras minúsculas diferentes ($p < 0,05$). Médias seguidas de um ou mais asteriscos (*) diferiram significativamente de outros tratamentos de acordo com o teste de Dunnett. Tratamentos: controle (Ctrl); biochar de bagaço de uva (GSB); biochar de fermentação de uva (GFB); *Trichoderma aureoviride* URM 5158 (Ta); *Trichoderma hamatum* URM 6656 (Th); GSB combinado com *T. aureoviride* (GSB.Ta); GSB combinado com *T. hamatum* (GSB.Th); GFB combinado com *T. aureoviride* (GFB.Ta); e GFB combinado com *T. hamatum* (GFB.Th).

O solo tratado com GFB exibiu aumento significativo em atividades enzimáticas específicas por unidade de carbono da biomassa microbiana (Figura 12). Essa descoberta sugere que a aplicação de biochar derivado de resíduos da fermentação do vinho pode aumentar a atividade microbiana do solo, melhorando a eficiência da decomposição da matéria orgânica e do ciclo de nutrientes.

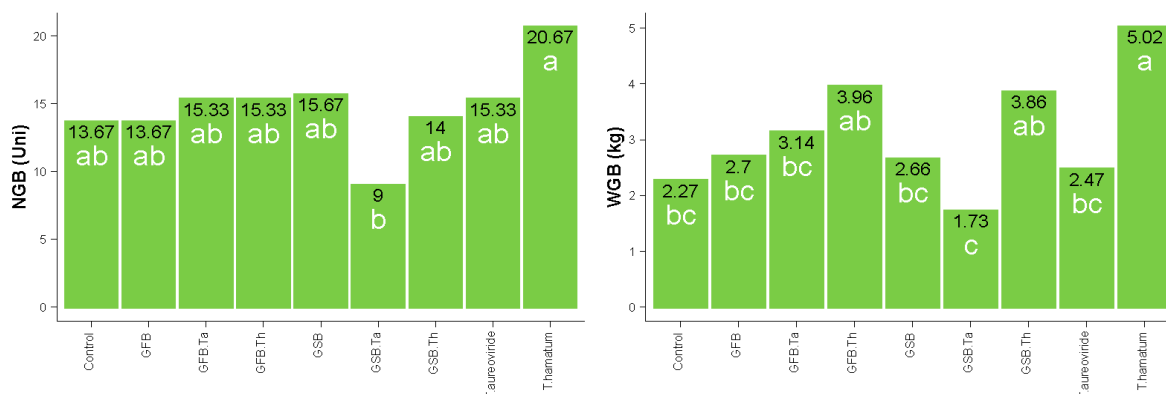
Figura 12- Atividades enzimáticas específicas por unidade de carbono orgânico do solo (SOC) em solo submetido a diferentes fontes de biochar e isolados de *Trichoderma* e cultivado com plantas de uva da cultivar Malbec



a) Fosfatase ácida/ SOC, b) Fosfatase alcalina/ SOC, c) beta-glicosidase/ SOC, d) Aril-sulfatase/ SOC, e) Urease/ SOC. Diferenças significativas entre os tratamentos são indicadas por diferentes letras minúsculas ($p < 0,05$). Médias seguidas por um ou mais asteriscos (*) diferiram significativamente do tratamento adicional de acordo com o teste de Dunnett. Tratamentos: controle (Ctrl); biochar de pedúnculo de uva (GSB); biochar de fermentação de uva (GFB); *Trichoderma aureoviride* URM 5158 (Ta); *Trichoderma hamatum* URM 6656 (Th); GSB combinado com *T. aureoviride* (GSB.Ta); GSB combinado com *T. hamatum* (GSB.Th); GFB combinado com *T. aureoviride* (GFB.Ta); e GFB combinado com *T. hamatum* (GFB.Th).

A combinação de GSB + *T. aureoviride* levou a redução tanto no número de cachos quanto no peso total do cacho por planta. Em contraste, a maior contribuição para a produtividade foi observada com a aplicação isolada de *T. hamatum*, com aumento de 51,20% no número de cachos e 121,14% no peso total do cacho em comparação ao controle (Fig. 13a e b).

Figura 13- Produtividade de videiras Malbec cultivadas em solo tratado com diferentes fontes de biochar e isolados de *Trichoderma*.

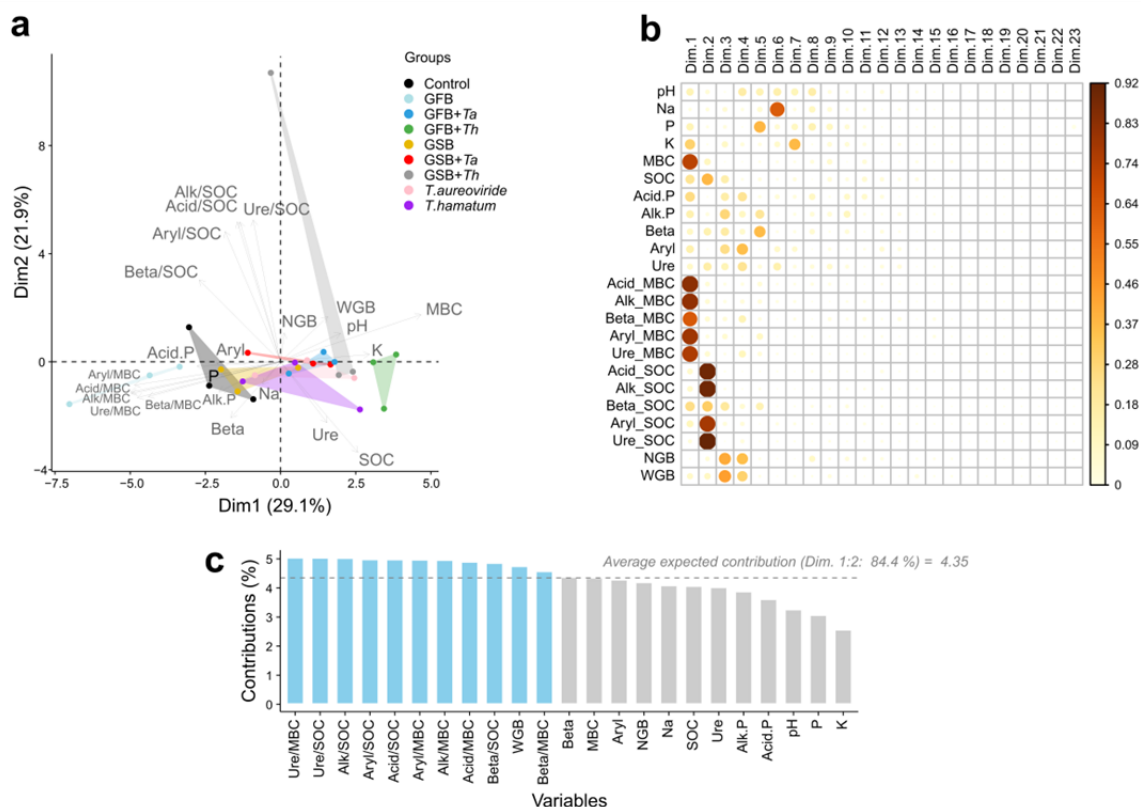


a) Número de cachos de uva; b) Peso total do cacho por planta. Diferenças significativas entre os tratamentos são indicadas por diferentes letras minúsculas ($p < 0,05$). Médias seguidas por um ou mais asteriscos (*) diferiram significativamente do tratamento adicional de acordo com o teste de Dunnett. Tratamentos: controle (Ctrl); biochar de pedúnculo de uva (GSB); biochar de fermentação de uva (GFB); *Trichoderma aureoviride* URM 5158 (Ta); *Trichoderma hamatum* URM 6656 (Th); GSB combinado com *T. aureoviride* (GSB+Ta); GSB combinado com *T. hamatum* (GSB+Th); GFB combinado com *T. aureoviride* (GFB+Ta); e GFB combinado com *T. hamatum* (GFB+Th).

A Análise de Componentes Principais (PCA) revelou influência de diferentes biochars e *Trichoderma* nas variáveis de produtividade da uva, bem como nos atributos químicos e biológicos do solo (Figura 14). Os componentes principais (PC1 e PC2) explicaram 29,15% e 21,9% da variância total, respectivamente (Figura 14a). De forma geral, os efeitos dos tratamentos foram distintamente agrupados em diferentes clusters em comparação com o tratamento controle. No entanto, os solos que receberam o tratamento com GSB+Th apresentaram a maior correlação com as variáveis de produtividade da uva, posicionando-se no mesmo quadrante da biomassa microbiana do solo. Por outro lado, os solos tratados com apenas GFB mostraram correlações mais fortes com as variáveis mais sensíveis, alinhando-se com todas as atividades enzimáticas específicas por unidade de carbono da biomassa microbiana. As atividades enzimáticas específicas por unidade de carbono da biomassa microbiana foram as mais sensíveis para explicar a variabilidade dos

dados (Figuras 14b e c), demonstrando que essas enzimas são mais sensíveis do que as enzimas absolutas.

Figura 14- Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis de planta e solo tratadas com diferentes fontes de biochar e isolados de *Trichoderma* em videiras de Malbec.



a) Biplot dos componentes principais. b) Correlação das variáveis com os componentes principais. c) Contribuição das variáveis para explicar as diferenças observadas. Tratamentos: controle (Ctrl); biochar de sarmentos de uva (GSB); biochar fermentação da uva (GFB); *Trichoderma aureoviride* URM 5158 (Ta); *Trichoderma hamatum* URM 6656 (Th); GSB combinado com *T. aureoviride* (GSB+Ta); GSB combinado com *T. hamatum* (GSB.Th); GFB combinado com *T. aureoviride* (GFB+Ta); e GFB combinado com *T. hamatum* (GFB.Th). Carbono da biomassa microbiana (MBC), Carbono orgânico do solo (SOC), Atividades enzimáticas absolutas: Fosfatase ácida (Acid.P), Fosfatase alcalina (Alk.P), Beta-glucosidase (Beta), Arilsulfatase (Ary), Urease (Ure), Número de cachos de uva (NGB), Peso total de cachos (WGB) por planta.

4.4 Discussão

Este estudo investigou o potencial da aplicação de biochar e *Trichoderma* nas propriedades químicas e biológicas de um solo cultivado com uvas Malbec. Os biochars estudados, derivados de resíduos da produção de vinho, melhoraram efetivamente a qualidade do solo e a produtividade das uvas Malbec. Os resultados mostraram que o biochar GSB+Th contribuiu para uma maior produtividade das uvas, enquanto o biochar GFB favoreceu as variáveis mais sensíveis do solo, especificamente as atividades enzimáticas por unidade de biomassa microbiana. Esses achados estão alinhados com a hipótese principal de que o biochar produzido a partir de resíduos agrícolas é eficaz no aprimoramento da produtividade do solo e das características do solo (HE et al., 2021; IWUOZOR et al., 2023; ARAÚJO et al., 2025), pois reutiliza resíduos que poderiam ser considerados passivos ambientais e oferece um destino sustentável.

A aplicação de ambos os biochars, isoladamente ou em combinação com *Trichoderma*, aumentou o pH do solo cultivado com uvas Malbec, conforme esperado e em concordância com estudos anteriores (ABHISHEK et al., 2022; YUAN et al., 2023; JIA et al., 2024). Esse aumento no pH é atribuído à natureza alcalina da maioria dos biochars, cuja superfície reativa sofre protonação, resultando na acumulação de cargas positivas (HERRMANN et al., 2019). Da mesma forma, os teores de Na, P e K no solo tenderam a aumentar com a aplicação de biochar. Esse aumento tem sido associado tanto à composição do biochar, que contém esses nutrientes em sua estrutura, quanto à sua alta capacidade de troca catiônica, que favorece a retenção e liberação desses elementos no solo (FOULADIDORHANI et al., 2023). Além disso, a estrutura porosa do biochar pode atuar como um reservatório de nutrientes, reduzindo as perdas por lixiviação e aumentando a disponibilidade de nutrientes para as plantas ao longo do tempo (WEI et al., 2020).

Os resultados deste estudo confirmam que a aplicação de biochar é uma estratégia eficaz para melhorar a fertilidade do solo e aumentar a disponibilidade de nutrientes essenciais para o crescimento das plantas. Além disso, essa prática se destaca como uma abordagem agrícola sustentável e adaptada às mudanças climáticas, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (NAZIN et al., 2025). No entanto, a magnitude desses efeitos pode variar de acordo com a taxa de aplicação, o tipo de biomassa utilizada na produção do biochar e as características do solo (COSTA et al., 2024).

Neste estudo, a aplicação de biochar em combinação com isolados de *Trichoderma* resultou em um aumento do carbono orgânico do solo (SOC). Esse incremento desempenhou um papel fundamental na melhoria das propriedades biológicas do solo, fornecendo uma fonte de carbono mais estável para a microbiota, o que, por sua vez, estimulou a atividade enzimática e o metabolismo microbiano (SINGH et al., 2022).

Enzimas extracelulares são indicadores sensíveis da mineralização do carbono (β -glucosidase), nitrogênio (urease), fósforo (fosfatase ácida) e enxofre (arilsulfatase), fornecendo informações sobre possíveis alterações no status bioquímico do solo (BARBOSA et al., 2024) e refletindo rapidamente mudanças na fertilidade e no funcionamento biológico do solo. Derivadas principalmente da biomassa microbiana, essas enzimas catalisam reações bioquímicas essenciais para o ciclo de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica (LUO et al., 2020). Neste estudo, a aplicação de ambos os biochars combinados com isolados de *Trichoderma* estimulou a atividade enzimática do solo. Esse efeito pode ser atribuído ao aporte de carbono e outros nutrientes presentes na composição do biochar, resultando no aumento da atividade, especialmente da β -glucosidase, uma das enzimas-chave do ciclo do carbono (COSTA et al., 2024). Estudos anteriores relataram que a aplicação de biochar ao solo aumenta a disponibilidade de carbono lábil ou libera compostos orgânicos que podem servir como substrato para intensificar a atividade dessas enzimas no solo (SILVA et al., 2022, MEDEIROS et al., 2023; BARROS et al., 2024).

A atividade das enzimas fosfatase ácida, fosfatase alcalina e urease foi influenciada pelo tipo de biochar e pelo isolado de *Trichoderma*. Esse efeito pode ser explicado pela capacidade do biochar de adsorver fosfatos solúveis no solo, reduzindo sua disponibilidade para plantas e microrganismos. Em resposta, há um aumento na produção de fosfatases, enzimas responsáveis por liberar fósforo da matéria orgânica (MARTINS et al., 2023). Além disso, a alta área superficial do biochar pode potencializar esse efeito ao aumentar a retenção de fósforo e, consequentemente, estimular a atividade enzimática no solo para compensar essa limitação (LUO et al., 2024).

Como esperado, nosso estudo demonstrou que o uso de biochar, com ou sem *Trichoderma*, aumentou todas as atividades enzimáticas por unidade de biomassa microbiana e algumas atividades enzimáticas por unidade de carbono orgânico do solo, em concordância com estudos anteriores (SILVA et al., 2022; XU et al., 2020). As atividades enzimáticas específicas são consideradas indicadores mais sensíveis, pois refletem a contribuição dos microrganismos e do carbono orgânico do solo (SOC) para a atividade

enzimática (STONE et al., 2014; XU et al., 2020). Em comparação com as atividades enzimáticas absolutas, as atividades específicas apresentam vantagens, pois eliminam a forte covariância com SOC e carbono da biomassa microbiana (MBC), padronizam diferenças nos teores de SOC e MBC e expressam características microbianas baseadas em substâncias orgânicas (RAIESI; BEHESHTI, 2014). Notavelmente, a análise multivariada mostrou que as atividades enzimáticas específicas foram mais sensíveis para detectar mudanças nas propriedades do solo e na produtividade das plantas (Figura 6), indicando um efeito positivo dessa interação ao combinar os benefícios do *Trichoderma* com o biochar.

A aplicação isolada de *T. hamatum* foi mais eficaz no aumento da produtividade das uvas. Esse efeito pode ser atribuído à capacidade do *Trichoderma* de atuar como promotor de crescimento vegetal, estimulando o desenvolvimento das plantas por meio da produção e regulação de fitohormônios. Além de influenciar a própria síntese hormonal da planta, *Trichoderma* pode secretar diretamente hormônios ou fornecer precursores para a biossíntese de fitohormônios essenciais, como parte dos mecanismos benéficos da interação *Trichoderma*-planta (GUZMÁN – GUZMÁN et al., 2019). Outro fator chave é o impacto positivo de *Trichoderma* no sistema radicular, promovendo um maior volume e densidade de raízes, o que melhora a absorção de água e nutrientes do solo (VERMA et al., 2024). Esses achados destacam o potencial de *T. hamatum* como um biostimulante eficiente para o aumento da produtividade e qualidade das uvas, reforçando sua aplicabilidade em sistemas agrícolas sustentáveis.

Esses achados são particularmente interessantes, pois combinam os benefícios bem estabelecidos do biochar, amplamente utilizado na agricultura sustentável, com as vantagens dos fungos *Trichoderma*. Essa interação pode contribuir para a preservação de funções microbianas essenciais, como a supressão de patógenos e a promoção do crescimento vegetal por meio de diferentes mecanismos (MEDEIROS et al., 2021). Como amplamente reconhecido, a manutenção da funcionalidade microbiana tem um impacto direto no desempenho das plantas. Dessa forma, a reutilização de resíduos agrícolas para a produção de biochar representa uma alternativa sustentável para os produtores, reduzindo a dependência de insumos externos e, ao mesmo tempo, melhorando a saúde do solo e a produtividade das culturas.

4.5 Conclusões

Este estudo demonstra que a coaplicação de biochar derivado de resíduos agrícolas e *Trichoderma* spp. melhorou tanto a produtividade da uva Malbec quanto a saúde do solo. O biochar produzido a partir de engaços de uva e inoculado com *Trichoderma hamatum* aumentou significativamente a produtividade da uva, enquanto o biochar derivado de resíduos da fermentação da uva promoveu maiores atividades enzimáticas, especialmente a atividade enzimática específica por unidade de biomassa microbiana. Ambos os tipos de biochar mostraram-se altamente eficazes na melhoria da fertilidade do solo, da atividade microbiana e da disponibilidade de nutrientes. Esses achados são particularmente relevantes para a viticultura, oferecendo uma alternativa sustentável para melhorar a saúde do solo e a produtividade das culturas, reduzindo a dependência de insumos externos. Além disso, os efeitos conjunto entre biochar e *Trichoderma* destacam seu potencial como uma estratégia agrícola inteligente para lidar com os desafios climáticos. Este é um dos primeiros estudos a avaliar o biochar derivado de resíduos da vinificação em combinação com *Trichoderma* para a melhoria da qualidade do solo e da produtividade da videira. No entanto, são necessárias mais pesquisas para explorar diferentes composições de biochar, avaliar os impactos de longo prazo na dinâmica microbiana do solo e analisar a viabilidade econômica em aplicações em larga escala.

Referências

- ABHISHEK, K.; KUMAR, S.; SINGH, R. K.; RANJAN, R.; SINGH, A. P. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: A state-of-the-art review. **Science of The Total Environment**, v. 853, p. 158562, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158562.
- ARAUJO, I. S.; SOUZA, R. M.; OLIVEIRA, A. M.; LIMA, D. F.; SILVA, P. R.; SANTOS, M. D. Biochar and plant growth-promoting bacteria boost chemical and biological properties of semiarid soil in cowpea. **Soil Systems**, v. 9, p. 19, 2025. DOI: 10.3390/soilsystems9010019.
- ASGHAR, W.; KATAOKA, R. Effect of co-application of *Trichoderma* spp. with organic composts on plant growth enhancement, soil enzymes and fungal community in soil. **Archives of Microbiology**, v. 203, n. 7, p. 4281-4291, 2021. DOI: 10.1016/j.stress.2024.100455.
- BARBOSA, F. L. A.; BARROS, J. A.; MARTINS FILHO, A. P.; COSTA, D. P.; VIEIRA, A. P. Seasonal responses of soil microbial biomass C and enzymatic activity comparing no-tillage and integrated crop-livestock systems. **European Journal of Soil Biology**, v. 121, p. 103628, 2024. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2024.103628.
- BARBOSA, F. L. A.; COSTA, R. M.; BARROS, J. A.; MARTINS FILHO, A. P.; VIEIRA, A. P.; ARAÚJO, E. R. et al. Potential of biochar to restoration of microbial biomass and enzymatic activity in a highly degraded semiarid soil. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 26065, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-77368-9.
- BARROS, J. A. de.; MARTINS FILHO, A. P.; COSTA, D. P.; VIEIRA, A. P.; ARAÚJO, E. R.; LOPES, M. H. L.; SOUZA JÚNIOR, J. H. de; SILVA, M. M.da; HAMMECKER, C.; MEDEIROS, E. V. de. Residual effect of biochar on microbial biomass and enzyme activities of soil cultivated with grape varieties: a two-year field assessment. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 17, n. 4, p. 2284–2293, 2024. DOI: 10.26848/rbgf.v17.4.p2284-2293.
- BARTLETT, R. J.; ROSS, D. S. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 4, p. 1191–1192, 1988. DOI: 10.2136/sssaj1988.03615995005200040055x.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 21, n. 113, p. 73–85, 1974.
- BRAZILIAN AGRICULTURAL RESEARCH CORPORATION (EMBRAPA). Brazilian Soil Classification System 5th ed. Brasília, DF: Embrapa; 2018.
- CONTRERAS-CORNEJO, H. A.; GALVÁN, G. A.; GÓMEZ, M. S.; HERRERA-ESTRELLA, A. Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma* in natural and managed terrestrial ecosystems. **Research in Microbiology**, v. 281, p. 127621, 2024. DOI: 10.1016/j.micres.2024.127621.
- COSTA, R. M.; ARAUJO, E. M. B.; SILVA, D. E. O.; ROCHA, S. M. B.; BONIFÁCIO, A.; SOUSA, R. S.; PEREIRA, A. P. de ARAÚJO; MEDEIROS, E. V. de; SAGRILO, E.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L. de; SOUZA, H. A. de; ARAÚJO, A. S. F. Seasonal responses of soil microbial biomass C and enzymatic activity comparing no-tillage and integrated crop-livestock systems. **European Journal of Soil Biology**, [S. l.], v. 121, jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103628>

- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, p. 601–606, 1988. DOI: 10.1016/0038-0717(88)90141-1.
- ENDERS, A.; LEHMANN, J. Comparison of wet-digestion and dry-ashing methods for total elemental analysis of biochar. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, p. 1042–1052, 2012. DOI: 10.1080/00103624.2012.656167.
- FOULADIDORHANI, M.; SHAYANNEJAD, M.; MOSADDEGHI, M. R.; SHARIATMADARI, H.; ARTHUR, E. Biochar, manure and superabsorbent improve the physical quality of saline-sodic soil under greenhouse conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 87, n. 5, p. 1003–1017, 2023. DOI: 10.1002/saj2.20538.
- GHODAKE, G. S.; YADAV, R.; CHOUDHARY, V.; GAUR, R.; SINHA, A.; MISHRA, A. Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. **J Clean Prod.**; v. 297, p. 126645, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126645.
- GIFFARD B, AVELINE A, DETRAIN L, VAN CAPELLEN P, ALAVOINE G, COLLET S, GAUTIER M, HANNACHI S, BÉRARD A, LE DIZES S, TESSIER D. Vineyard management and its impacts on soil biodiversity, functions, and ecosystem services. **Front Ecol Evol.** V. 10, p.850272, 2022.DOI: doi.org/10.3389/fevo.2022.850272.
- GUZMÁN-GUZMÁN P, PORRAS-TRONCOSO MD, OLMEDO-MONFIL V, HERRERA-ESTRELLA A. Trichoderma species: versatile plant symbionts. **Phytopathology**.v.109 p. 6–16, 2019.DOI: doi.org/10.1094/PHYTO-07-18-0218-RVW
- HE, M.; LI, L.; LIU, X.; ZHANG, H.; ZHANG, W.; WANG, J. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils. **J Hazard Mater.** 2021; 414:125378. DOI: doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125378
- HERRMANN, L.; WONG, M. T.; PHIPHATTANAPRECH, S.; HONGWANG, R.; Impact of biochar application dose on soil microbial communities associated with rubber trees in Northeast Thailand. **Sci Total Environ.** 2019; 689:970–9. DOI: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.441
- ILLESCA, M.; LÓPEZ-LEÓN, R.; GARCÍA-BRAVO, C.; BERMÚDEZ, R.; LÓPEZ-GARCÍA, A.; GARCÍA, J. Phytohormone Production Profiles in Trichoderma Species and Their Relationship to Wheat Plant Responses to Water Stress. **Pathogens.** 2021;10(8):991. DOI: doi.org/10.3390/pathogens10080991
- IWUOZOR, K. O.; NWACHUKWU, E. O.; UMOH, I. A.; OKE, S. O.; OLUWASEGUN, O. O. Unlocking the hidden value of pods: A review of thermochemical conversion processes for biochar production. **Bioresour Technol Rep.** 2023; 22:101488. DOI: 10.1016/j.biteb.2023.101488
- JIA, A.; LI, J.; WANG, H.; ZHAO, Y.; LIU, M.; Biochar enhances soil hydrological function by improving the pore structure of saline soil. **Agricultural Water Management**, 2024 v. 306, p. 109170. DOI: doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109170
- KANDELER E, GERBER H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biol Fert Soils.** 1988; 6:68–72. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00257924

KREDICS, L.; KOVÁCS, T.; VÁSÁRHELYI, T.; FARKAS, T.; SZEGEDI, E.; HAJDU, P.; SZEGEDI, S. Recent advances in the use of Trichoderma-containing multicomponent microbial inoculants for pathogen control and plant growth promotion. **World J Microbiol Biotechnol.** 2024;40(5):162. DOI: doi:10.1007/s11274-024-03965-5.

KURNIAWAN T A, OTHMAN M H D, LIANG X, GOH H H, GIKAS P. Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. **J. Environ Manage.** 2023; 332:117429. DOI: doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117429.

LIN, G.; ZHANG, W.; LI, H.; WANG, L.; ZHAO, X.; YANG, Y. Improving agricultural productivity with biochar: Evaluating feedstock patterns and quality. **Bioresour Technol Rep.** 2025;102059. DOI: doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116623

LIU, B.; LI, X.; ZHANG, W.; LIU, J.; WANG, Y.; LI, Z.; ZHU, X. Isolation of Trichoderma from the rhizosphere soil of Syringa oblata in Harbin and its biocontrol and growth-promoting functions. **Microbiol Res.** 2020; 235:126445. DOI: doi: 10.1016/j.micres.2020.126445.

LUO G, XUE C, JIANG Q, XIAO Y, ZHANG F, GUO S. Soil microbial populations in the carbon, nitrogen, and phosphorus cycles and their resistance to global changes depend on the soil C: N:P stoichiometry. **MSystems**, 2020 5(3):e00162-20 DOI: doi.org/10.1128/msystems.00162-20

LUO, X.; WANG, Y.; LI, X.; ZHANG, X.; LIU, X.; CHEN, W.; LI, F.; LIU, L.; LIU, Q.; MIAO, J.; ZHENG, H. The addition of corn straw biochar increased phosphorus availability in a salt-affected coastal soil under conditions of different inputs of halophytic litter and moisture levels. **Science of The Total Environment**, v. 908, p. 168355, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168355.

MARQUES, C. A.; SANTOS, L. L.; SOUZA, L. G.; COSTA, R. L.; OLIVEIRA, F. J.; PEREIRA, J. M.; SILVA, T. S.; MORAIS, R. D. Biochar production with sugarcane straw (*Saccharum* sp.) **Res Soc Dev.** 2022;11(1): e31211124675. DOI: doi:10.33448/rsd-v11i1.24675.

MARTINS FILHO, A. P.; FRANCA, R. F.; MEDEIROS, E. V.; SILVA, R. O.; COSTA, D. P.; SIMOES, L. R.; SOUZA, C. A. F.; LIMA, J. R. S.; HAMMERCKER, C.; ARAUJO, A. P. Biochar in different topsoil type as alternative for increase the cassava **development and soil quality.** 2023, v. 16, p. 1813-1822. DOI: doi.org/10.26848/rbgf.

MEDEIROS, E. V.; COSTA, D. P.; SILVA, E. L. D.; FRANÇA, A. F.; LIMA, J. R. D.; HAMMECKER, C.; MENDES, L. W.; PEREIRA, A. P. A.; ARAUJO, A. S. F. Biochar and Trichoderma as an eco-friendly and low-cost alternative to improve soil chemical and biological properties. **Waste and Biomass Valorization**, 2023. DOI: 10.1007/s12649-023-02240-2.

MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; SANTOS, L. A. R.; LIMA, J. R. S.; ALMEIDA-CORTÊZ, J. S.; HAMMECKER, C.; LARDY, L.; CURNAC, L. Soil organic carbon, microbial biomass, and enzyme activities responses to natural regeneration in a tropical dry region in Northeast Brazil. **Catena**, v. 151, p. 137–146, 2017. DOI: 10.1016/j.catena.2016.12.012.

MEDEIROS, E. V.; SANTOS, A. R.; OLIVEIRA, L. G.; ALMEIDA, A. F.; SILVA, P. R.; SOUZA, J. M. Biochar and Trichoderma as an eco-friendly and low-cost alternative to improve soil chemical and biological properties. **Waste Biomass Valorization.** 2023. DOI: doi:10.1007/s12649-023-02240-2.

MEDEIROS, E. V.; SILVA, R. F.; PEREIRA, G. D.; ARAÚJO, A. S. F.; HAMMECKER, C.; MENDES, L. W. Biochar as a strategy to manage plant diseases caused by pathogens inhabiting the soil: a critical review. **Phytoparasitica**, v. 49, n. 4, p. 713–726, 2021. DOI: 10.1007/s12600-021-00887-y.

MENDONÇA E.D.S, MATOS E.D.S. **Matéria orgânica do solo: Métodos de análises** (In Portuguese). 2005.

NAZIM, M.; GHAFOR, A.; HUSSAIN, A.; TABASSUM, M.; NAWAZ, A.; AHMAD, M. Biochar as a Climate-Smart Agricultural Practice: Reducing Greenhouse Gas Emissions and Promoting Sustainable Farming. **Phyton - International Journal of Experimental Botany**, v. 94, n. 1, p. 65–99, 2025. DOI: 10.32604/phyton.2025.058970.

NOVOTNY, ETELINO HENRIQUE; MAIA, CLAUDIA MARIA BERTOLINI DE CARVALHO; CARVALHO, MARCO TÚLIO DE MELLO; MADARI, BEÁTA ÉVA. BIOCHAR: pyrogenic carbon for agricultural use – a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 39, n. 2, p. 321–344, abr. 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140818.

PALANSOORIYA, K. N.; ALI, M.; HARTONO, A.; KUMAR, P.; TSANG, D. C. W.; ZHANG, M.; OK, Y. S. Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. **Biochar**. 2019; 1:3–22. DOI:10.1007/s42773-019-00009-2

POVEDA J, MILLEN M.R, BAILEY A.M. Analise de *Trichoderma* as an effective biocontrol agent against honey fungus (*Armillaria* spp.). **Biol Control**. 2024; 188:105424. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2023.105424

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: **R Foundation for Statistical Computing**; 2023. Available from: <https://www.r-project.org/>.

RAIESI F, BEHESHTI A. Soil specific enzymatic activity more clearly shows the soil responses to rice husk cultivation than absolute enzymatic activity in primary forests of northwestern Iran. **Appl Soil Ecol**. 2014; 75:63–70. DOI: 10.1016/J.APSOIL.2013.10.012

RAMÍREZ-VALDESPINO, C. A.; CASAS-FLORES, J. S.; OLMEDO-MONFIL, V. G. *Trichoderma* as a model to study effector-like molecules. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1030, 2019. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01030.

RAZZAGHI F, OBOUR P.B, ARTHUR E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. **Geoderma**. 2020; DOI: doi: 361:114055. /10.1016/j.geoderma.2019.114055

RUAN, G.; LI, X.; ZHANG, Z.; LIU, X.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, L. A review of the current status of nitrogen self-doped biochar applications. **J Environ Chem Eng**. 2025:115291. DOI: doi: 10.1016/j.jece.2025.115291.

SILVA, E. O.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; LIRA JÚNIOR, M. A.; BROSSARD, M.; OLIVEIRA, J. B.; SANTOS, U. J.; HAMMECKER, C. Seasonal effect of land use type on soil absolute and specific enzyme activities in a Brazilian semi-arid region. **Catena**, v. 172, p. 397–407, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2018.09.007.

SILVA, J. A. T.; SILVA, L. M.; PEREIRA, G. B.; LIMA, A. R.; SANTOS, T. T.; PINTO, J. E. *Trichoderma aureoviride* URM 5158 and *Trichoderma hamatum* URM 6656 are Biocontrol Agents that act against Cassava Root rot through different Mechanisms. **J Phytopathol**. 2016;164(11-12):1003-1011. DOI: doi.org/10.1111/jph.12521

- SILVA, J. S.; COSTA, L. B.; MENDES, L. W.; SANTOS, L. L.; SILVA, A. G.; PEREIRA, M. J. Biochar and *Trichoderma aureoviride* URM 5158 as alternatives for the management of cassava root rot. **Appl Soil Ecol.** 2022; 172:104353. DOI: doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104353
- SINGH, H.; KUMAR, S.; SINGH, A.; PATEL, M.; AGARWAL, N.; VERMA, P.; SHARMA, S. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. **Biochar** 2022;4(1):8. DOI: [doi.org 10.1007/s42773-022-00138-1](https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1)
- SOMBRA, K. E. S.; SILVA, E. F. DA; SILVA, T. S.; VASCONCELOS, A. A.; FERREIRA, E. A.; SANTOS, E. P. S.; FREITAS, D. F.; LAVÔR, W. K. B.; SANTO, A. E.; CUNHA, M. L.; DIAS, N. S. Biochar: Recovery of an Important Tool in Soil Management. Rural Extension in Focus: Support for Family Farming, Entrepreneurship, and Innovation.. Guarujá, SP: **Editora Científica Digital**, v. 1, p. 136-145, 2020. DOI: <https://doi.org/10.37885/200600383>
- SPENCER, B. Studies on sulphatases. XX. Enzymic cleavage of aryl hydrogen sulphates in the presence of $H_2^{18}O$. **Biochemical Journal**, London, v. 69, n. 1, p. 155–159, maio 1958.
- STONE MM, DEFOREST JL, PLANTE AF. Changes in extracellular enzyme activity and microbial community structure with soil depth at the Luquillo Critical Zone Observatory. **Soil Biol Biochem.** 2014; 75:237–47. DOI: doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.04.017
- TABATABAI MA, BREMNER JM. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biol Biochem.** 1969; 1:301–7. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(69\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1)
- TATE, K. R.; ROSS, D. J.; FELTHAM, C. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: effects of experimental variables and some different calibration procedures. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 20, p. 329–335, 1988.
- TEIXEIRA, A.; MARTINS, V.; MANSO, J.; CORREIA, S.; FERREIRA, A. R.; FONTES, N.; GRAÇA, A.; GERÓS, H. Exploring the influence of cover crops with native plant species on soil and berry microbiota in a Moscatel Galego vineyard: implications for sustainable viticulture. **Science of The Total Environment**, v. 380, p. 109384, 2025. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.160184](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160184).
- TEIXEIRA, A.; MARTINS, V.; MANSO, J.; CORREIA, S.; FERREIRA, A. R.; FONTES, N.; GRAÇA, A.; GERÓS, H. Exploring the influence of cover crops with native plant species on soil and berry microbiota in a Moscatel Galego vineyard: Implications for sustainable viticulture. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 380, p. 109384, 2025. DOI: [10.1016/j.agee.2024.109384](https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109384).
- TEIXEIRA, J. F. V.; CAMPOS, A. L.; SALDANHA, E. P **Manual de Métodos Químicos de Análise de Solos**, Embrapa, 2017.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

VERMA, ISHA; SONI, SUMIT K.; SINGH, POONAM C. Trichoderma produces methyl jasmonate-rich metabolites in the presence of Fusarium, showing biostimulant activity and wilt resistance in tomatoes. **Plant Physiology and Biochemistry** 2024, v. 215, p. 108953. DOI: doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108953

WANG, C.; ZHANG, X.; LI, W.; LI, Y.; LIU, X.; ZHAO, Y.; YANG, X. Biochar alters soil microbial communities and potential functions 3–4 years after amendment in a double rice cropping system. **Agric Ecosyst Environ.** 2021; 311:107291. DOI: doi.org/10.1016/j.agee.2020.107291

WANG, H. X.; HUANG, X. Q.; ZHOU, Y. H.; LIU, J. H.; GUO, L. L.; ZHAO, J.; CHEN, X.; ZHENG, H. L. *Trichoderma gamsii* strain TC959 with comprehensive functions to effectively reduce seedling damping-off and promote growth of pepper by direct and indirect action mechanisms. **Journal of Integrative Agriculture**, 2024. DOI: 10.1016/j.jia.2024.02.003.

WEI, M.; LI, W.; ZHANG, H.; LI, Y.; YU, Z.; LI, J.; WANG, Q. Biochar inoculated with *Pseudomonas putida* improves grape (*Vitis vinifera* L.) quality and alters bacterial diversity. **Rhizosphere.** 2020; 16:100261. DOI: doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100261

WOO, S. L.; REYES, J. M.; GÓMEZ, R.; RAMOS, A. A.; PÉREZ, J. F.; FERNÁNDEZ, M. A. Trichoderma: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. **Nat Rev Microbiol.** v. 21(5), p.312-326, 2023. DOI: doi:10.1038/s41579-022-00819-5.

XU, H.; QU, Q.; LU, B.; LI, P.; XUE, S.; LIU, G. Response of soil specific enzyme activity to vegetation restoration in the Loess hilly region of China. *Catena*, v. 191, p. 104564, 2020. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104564.

YEOMANS JC, BREMNER JM. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Commun Soil Sci Plant Anal.** V.19(13), p.1467–1476. 1988. DOI: doi.org/10.1080/00103628809368027

YUAN, Y.; LIU, Y.; WANG, X.; ZHANG, J.; ZHOU, Q. Biochar as a sustainable tool to improve the health of salt-affected soils. **Soil & Environmental Health**, v. 1, n. 3, p. 100033, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100033

ZHANG, M.; LI, Z.; WANG, F.; WANG, M.; SHEN, J.; LI, Y.; ZHU, Q.; WU, J. Impact of biochar on the antibiotic resistome and associated microbial functions in the rhizosphere and bulk soil of rice fields under water-saving and flooded irrigation. **Environ Pollut.** v.342, p. 123026. 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123026

ZHOU, YONGCHUN; LI, DANYANG; LI, ZHENGLONG; GUO, SIBO; CHEN, ZHIMIN; WU, LIULIN; ZHAO, YAN. Effects of aged biochar additions at different addition ratios on soil greenhouse gas emissions. **Sci Total Environ.** p.176914. 2024. DOI: .org/ 10.1016/j.scitotenv.2024.176914.

ZOU, C.; LI, X.; LIU, X.; WANG, Z.; WANG, X.; LI, J.; LIU, J. Effects of pyrolysis temperature and atmosphere on grinding properties of semicoke prepared from Shenmu low-rank coal. **J Anal Appl Pyrolysis.** v. 173, p.106059, 2023. DOI: doi: 10.1016/j.jaap.2023.106059.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pesquisas apresentadas ressaltam o potencial da aplicação conjunta de biochar derivado de resíduos da vinificação e *Trichoderma* spp. como estratégia eficaz para melhorar a qualidade do solo e a produtividade da videira. Os resultados apontam benefícios significativos, como o aumento do armazenamento de carbono, o enriquecimento da diversidade fúngica, a melhora na fertilidade do solo e no metabolismo microbiano. O uso de diferentes tipos de biochar influenciou positivamente tanto a estrutura da comunidade microbiana quanto a atividade enzimática e a produtividade da uva Malbec. No entanto, reforça-se a necessidade de estudos de longo prazo e avaliação da viabilidade econômica, visando maximizar os benefícios agrônômicos e ambientais dessas práticas sustentáveis, sem comprometer a biodiversidade do solo.