


BIOCHAR E *Trichoderma* SPP. NO MANEJO BIOLÓGICO DA PODRIDÃO RADICULAR DA VIDEIRA: UMA ABORDAGEM INTEGRADA SOLO-PLANTA-PATÓGENO

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.141112613015>

Sabrina Esposito Oliveira da Mota
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Jamilly Alves de Barros
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Kedma Maria Silva Pinto
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Alberto dos Passos Vieira
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Elisiane Martins de Lima
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Diogo Paes da Costa
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Gustavo Pereira Duda
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

José Romualdo de Sousa Lima
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Mairon Moura da Silva
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

José Eduardo Cordeiro Cezar Santos

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Carlos Alberto Fragoso de Souza

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Rafael José Vilela de Oliveira

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Claude Hammecker

Institut de Recherche pour le Développement - France

Argemiro Pereira Martins Filho

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Everlaine Leolpodino Dias Silva

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

Erika Valente de Medeiros

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Garanhuns – Pernambuco

RESUMO: A podridão radicular causada por *Fusarium equiseti* constitui um entrave recorrente na produção de mudas de videira, especialmente em sistemas que buscam reduzir a dependência de insumos químicos. Neste capítulo, discute-se o uso combinado de *Trichoderma aureoviride* URM 6668 e *Trichoderma aureoviride* URM 3734, associados ou não ao biochar obtido a partir da poda de videiras, como estratégia de manejo biológico dessa doença. A interação entre biochar e *Trichoderma* spp. promoveu redução significativa da severidade da podridão radicular, acompanhada por incrementos no crescimento vegetal e por melhorias em atributos relacionados à qualidade do solo. O uso combinado de *T. aureoviride* URM 3734 e biochar foi o tratamento mais eficiente em controlar a podridão radicular da videira, enquanto *T. aureoviride* URM 6668 combinado ao biochar, apresentou maior efeito sobre o desenvolvimento das plantas. Em conjunto, os resultados evidenciam que a integração entre biochar e *Trichoderma* spp. contribui para a modulação das interações solo-planta-patógeno, configurando-se como uma abordagem promissora para o manejo sustentável da podridão radicular da videira.

PALAVRAS-CHAVE: Carbono preto; reutilização de resíduos, saúde do solo.

BIOCHAR E *Trichoderma* SPP. NO MANEJO BIOLÓGICO DA PODRIDÃO RADICULAR DA VIDEIRA: UMA ABORDAGEM INTEGRADA SOLO-PLANTA-PATÓGENO

ABSTRACT: Root rot caused by *Fusarium equiseti* is a recurring obstacle in grapevine seedling production, especially in systems seeking to reduce dependence on chemical inputs. This chapter discusses the combined use of *Trichoderma aureoviride* URM 6668 and *Trichoderma aureoviride* URM 3734, with or without biochar obtained from grapevine pruning, as a biological management strategy for this disease. The interaction between biochar and *Trichoderma* spp. consistently reduced the severity of root rot, accompanied by increases in plant growth and improvements in soil quality attributes. The combination of *Trichoderma aureoviride* URM 3734 with biochar stood out for its greater efficiency in suppressing the disease, while *Trichoderma aureoviride* URM 6668, when combined with biochar, showed a greater effect on plant development. Taken together, the results show that the integration of biochar and *Trichoderma* spp. contributes to the modulation of soil-plant-pathogen interactions, representing a promising approach for the sustainable management of grapevine root rot.

KEYWORDS: Black carbon; waste reuse; soil health.

RESUMO GRÁFICO



Biochar e *Trichoderma* spp. fortalecem as interações solo-planta-microrganismos, promovendo manejo biológico sustentável da podridão radicular da videira.

INTRODUÇÃO

A busca por sistemas agrícolas mais sustentáveis tem impulsionado estratégias de manejo que integram a melhoria da saúde do solo e a supressão de doenças de plantas, com ênfase nas interações solo-planta-microrganismos. Nesse contexto, abordagens baseadas na modulação da microbiota edáfica e na redução do uso de insumos químicos vem ganhando destaque, especialmente em culturas perenes como a videira, nas quais doenças radiculares comprometem o estabelecimento e a longevidade dos vinhedos (French et al., 2021).

O biochar, material rico em carbono obtido pela pirólise de biomassas orgânicas, apresenta propriedades físico-químicas que favorecem a melhoria da estrutura do solo, a retenção de água, o tamponamento da acidez e o aumento da disponibilidade de nutrientes (Li et al., 2019; Medeiros et al., 2020; Silva et al., 2020; Gong et al., 2024). Além desses efeitos, o biochar atua como uma matriz funcional para microrganismos benéficos, estimulando a diversidade e a atividade microbiana (De Medeiros et al., 2020), a adsorção de compostos fitotóxicos e a indução de respostas de resistência nas plantas, o que contribui para a supressão de doenças de origem edáfica (Li et al., 2017; Pandey et al., 2020).

Entre os microrganismos benéficos favorecidos por esse ambiente, espécies do gênero *Trichoderma* destacam-se como importantes agentes de controle biológico e promotores do crescimento vegetal. Esses fungos atuam por múltiplos mecanismos, incluindo produção de fitohormônios, solubilização de nutrientes, micoparasitismo, antibiose, competição por espaço e nutrientes, além da indução de resistência sistêmica nas plantas, configurando-se como alternativas eficazes ao controle químico convencional e seus impactos ambientais negativos (De Medeiros et al., 2021 b; Medeiros et al., 2023).

Na vitivinicultura, a podridão radicular representa uma das principais limitações fitossanitárias, estando associada a um complexo de patógenos fúngicos introduzidos, em grande parte, por material propagativo contaminado. Dentre esses patógenos, espécies do gênero *Fusarium*, como *Fusarium equiseti*, destacam-se pela elevada capacidade de adaptação, persistência no solo e dificuldade de controle, afetando tanto mudas quanto plantas adultas e resultando em perdas significativas de produtividade (Silva et al., 2024).

Apesar do reconhecido potencial do biochar e de *Trichoderma* spp. quando aplicados isoladamente, ainda são escassos os estudos que abordam de forma integrada a associação desses componentes (De Medeiros et al., 2021a), especialmente em substratos para produção de mudas de videira, especialmente quando o biochar é obtido a partir de resíduos da própria vitivinicultura. Diante disso, este capítulo analisa a coaplicação de biochar derivado da poda de videiras e isolados de *Trichoderma*

aureoviride (URM 3734 e URM 6668) no manejo biológico da podridão radicular causada por *Fusarium equiseti*, considerando seus efeitos sobre a severidade da doença, o desenvolvimento das plantas e indicadores químicos e microbianos do solo.

METODOLOGIA

Produção e caracterização de biochar

O biochar foi produzido a partir de resíduos de poda de videiras (BVP), obtidos de ramos de uvas finas provenientes da área experimental do Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA), no município de Brejão-PE e de um vinhedo comercial, Vale das Colinas, localizado no município de Garanhuns-PE, a aproximadamente 900m de altitude. Após a coleta, os resíduos vegetais foram submetidos à secagem à sombra, em temperatura ambiente, até atingirem umidade adequada para o processo de pirólise. A pirólise foi realizada em forno térmico de baixa tecnologia, baseado em modelo amplamente utilizado por agricultores tailandeses, conforme descrito por Prakongkep et al., (2015), com adaptações segundo Lima et al. (2018). O processo ocorreu a 450 °C, com capacidade aproximada de 140 L, durante um período de 12 horas. Após a pirólise, o material carbonizado foi moído em moinho de facas do tipo Willey, resultando em aproximadamente 5 kg de biochar, com rendimento de 55,6%.

Atividade antagonista de *Trichoderma* spp. contra *Fusarium equiseti*

A avaliação do potencial antagonista de isolados de *Trichoderma* spp. contra *Fusarium equiseti* foi avaliada pelo método de cultura emparelhada, conforme descrito por Liu et al. (2020). O ensaio foi conduzido em dois tipos de meio de cultura: batata dextrose ágar (BDA) e BDA suplementado com biochar proveniente da poda de videiras (BVP). O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, com nove tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em nove isolados de *Trichoderma* spp., pertencentes a diferentes espécies, dois isolados de *Trichoderma harzianum* (URM 3086 e URM 3197), quatro isolados de *Trichoderma aureoviride* (URM 3486, URM 3734, URM 5158 e URM 6668), um isolado de *Trichoderma virens* (URM 5007), um isolado de *Trichoderma longibrachiatum* (URM 6068) e um isolado de *Trichoderma hamatum* (URM 6656), além do tratamento controle (placas inoculadas apenas com o patógeno).

O isolado patogênico *Fusarium equiseti* (P113) foi obtido a partir de plantas de videira sintomáticas do Vale das Colinas. Para a realização do ensaio, discos de 5 mm de diâmetro, retirados de colônias ativamente crescentes de *Trichoderma* spp. e de *F. equiseti*, foram inoculados em posições opostas nas placas de Petri contendo os respectivos meios de cultura. As placas foram incubadas em câmara

do tipo B.O.D a 25 °C, sob fotoperíodo de 12 horas, por um período de sete dias. Ao final do período de incubação, o crescimento micelial do patógeno foi mensurado, e a porcentagem de inibição do crescimento micelial foi calculada em relação ao tratamento controle, utilizando a equação proposta por Edgington et al. (1971): [% inibição do crescimento micelial = $((C-T)/C) \times 100$], onde C representa o crescimento do patógeno no tratamento controle e T representa o crescimento do patógeno no tratamento com o antagonista.

Produção do inóculo

Para os ensaios subsequentes, foram selecionados os dois isolados de *Trichoderma* spp. que apresentaram maior eficiência nos testes de antagonismo *in vitro*: *T. aureoviride* URM 6668 (T1) e *T. aureoviride* URM 3734 (T2). Ambos isolados foram obtidos da Coleção de Culturas URM do Departamento de Micologia do Centro de Biociências da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e reativados no Centro Laboratorial de Apoio à Pesquisa da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (CENLAG/UFPE).

Os isolados de *Trichoderma* spp. foram cultivados em meio BDA, sob condições controladas de temperatura (25 °C) e fotoperíodo de 12 horas, por um período de cinco dias. A partir dessas colônias, os conídios foram suspensos em solução salina contendo Tween 80, e a concentração do inóculo foi determinada por contagem em câmara de Neubauer, sendo posteriormente ajustada para 10^6 conídios mL⁻¹, concentração utilizada nos ensaios *in vivo*.

A multiplicação do patógeno *F. equiseti* (P113) foi realizada conforme Steffen e Maldaner (2019), utilizando arroz parboilizado como substrato. O material foi previamente esterilizado e inoculado com discos de micélio provenientes de cultura pura do patógeno cultivado em meio BDA. As culturas foram incubadas a 25 ± 1 °C, sob fotoperíodo de 12 horas, até a completa colonização do substrato. Durante o período de incubação, o material foi homogeneizado diariamente, visando favorecer a aeração, a fragmentação do micélio e o aumento da superfície de colonização fúngica.

Experimento *in vivo*

O experimento em viveiro foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, envolvendo sete tratamentos com quatro repetições. Os tratamentos foram: -T= ausência de *Trichoderma*; T1= *Trichoderma aureoviride* URM 6668; T2= *Trichoderma aureoviride* URM 3734, além da ausência do microrganismo (-T) e a aplicação de biochar proveniente da poda de videiras (B1). Adicionalmente, foram incluídos tratamentos controle, um positivo, com plantas inoculadas com o patógeno

(-TB0), e um negativo, sem inoculação. Com exceção do controle negativo, todas as plantas foram expostas a *F. equiseti*.

Mudas de videira da cultivar Cabernet Sauvignon, enxertadas sobre o porta-enxerto SO4, foram transplantadas para vasos contendo substrato composto por solo esterilizado e matéria orgânica. Após um período inicial de desenvolvimento, os tratamentos foram aplicados de forma escalonada, iniciando-se com a incorporação do biochar ao solo, seguida da aplicação dos isolados de *Trichoderma* spp. e posteriormente, da inoculação do patógeno.

A condução do experimento ocorreu em condições controladas de viveiro, mantendo-se o monitoramento hídrico do substrato de modo a evitar estresses hídricos excessivos ao longo do período experimental. Após a inoculação do patógeno, as plantas permaneceram em avaliação por período suficiente para a manifestação dos sintomas e análise dos efeitos dos tratamentos sobre o desenvolvimento vegetal e a severidade da doença.

Severidade da doença, crescimento das plantas e atributos do solo

A severidade da podridão radicular foi avaliada por meio de uma escala ordinal de severidade, variando de plantas assintomáticas até morte da planta (Tokeshi e Galli, 1966). A presença do patógeno foi confirmada por teste de patogenicidade, assegurando a associação dos sintomas observados com *F. equiseti*. O crescimento das plantas foi avaliado a partir de parâmetros morfológicos e biométricos, incluindo altura das brotações, diâmetro do caule e produção de biomassa aérea e radicular, expressa em matéria fresca e seca.

Os atributos químicos do solo avaliados incluíram pH em água, disponibilidade de nutrientes e teor de carbono orgânico total, determinados segundo métodos padronizados descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (Teixeira e Donagemma, 2017), sendo o carbono orgânico total quantificado conforme Yeomans e Bremner (1988). A biomassa microbiana do solo foi estimada a partir do carbono da biomassa microbiana, utilizando o método de irradiação, conforme Mendonça e Matos (2005) e Bartlett & Ross (1988).

As atividades enzimáticas do solo foram utilizadas como indicadores da funcionalidade microbiana e da ciclagem de nutrientes, sendo avaliadas as atividades da β -glicosidase, fosfatases ácida e alcalina, arilsulfatase e urease, de acordo com metodologias consagradas na literatura (Eivazi & Tabatabai, 1977; Tabatabai & Bremner, 1969).

Análises estatísticas

As análises foram realizadas no R v.4.3.1 (R Core Team, 2023) através da interface RStudio (RStudio Team, 2023). Os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias foram analisados através dos testes de Shapiro-Wilk, respectivamente. A abordagem estatística adotada foi um delineamento inteiramente casualizado, seguido de análise de variância e teste post-hoc de Scott-Knott em casos de diferenças significativas, ambos ao nível de significância de 5%. Os dados não paramétricos foram submetidos ao teste de Kruskal-Wallis seguido do teste post-hoc de Dunn ao nível de 5% de significância. A análise de Componentes Principais (ACP) foi conduzida para estudar a variância explicada pelas variáveis de solo e planta simultaneamente, identificando o agrupamento relacionado aos tratamentos fatoriais. Essa modelagem foi feita utilizando os recursos do pacote R 'factoextra' (Kassambara e Mundt, 2020). Todos os gráficos foram criados utilizando a biblioteca "ggplot2" do R.

RESULTADOS

As estirpes de *Trichoderma* spp. apresentam elevada capacidade de suprimir o crescimento micelial de *F. equiseti* em condições *in vitro*, evidenciando seu potencial antagonista (Figura 1). Em meio BDA, observou-se maior eficiência de inibição quando comparado ao meio suplementado com biochar de poda de uva, no qual ocorreu uma redução média de 17,26% no potencial antagonista. Entre os isolados avaliados, T1 destacou-se pela maior taxa de inibição micelial (78,16%), embora tenha apresentado redução de 15,71% na presença do biochar. Ainda assim, tanto T1 quanto T2 mostraram desempenho superior e elevada capacidade de esporulação, justificando sua seleção para a etapa *in vivo* e indicando que a interação entre biochar e antagonista pode modular a expressão do antagonismo dependendo da estirpe envolvida.

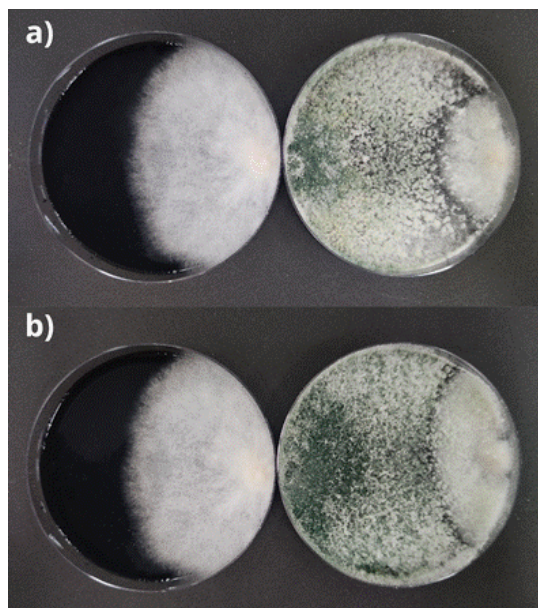
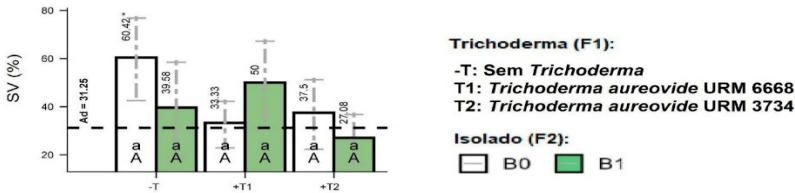


Figura 1. Teste de antagonismo *in vitro*. Placa com *Fusarium equiseti* em BDA+BVP e em confronto com *Trichoderma aureoviride* URM 3734 (a); Placa com *Fusarium equiseti* em BDA+BVP e em confronto com *Trichoderma aureoviride* URM 6668 (b).

Fonte: BARROS, J. A. e MOTA, S. E. O. (2024).

No experimento conduzido em viveiro, as respostas das mudas de videira à coaplicação de biochar e *Trichoderma* spp. revelaram tendências biologicamente relevantes, mesmo na ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos coaplicados. A associação entre biochar e T2 promoveu redução de 33,34% na severidade da podridão radicular em relação ao controle positivo, sugerindo efeito supressivo consistente sobre a doença. Em contraste, a coaplicação de biochar com T1 resultou em aumento de 16,67% na severidade, evidenciando sensibilidade dessa estirpe à presença do biochar (Figura 2). A diferença significativa entre o controle positivo e o controle negativo confirmou o elevado potencial patogênico de *Fusarium equiseti* em causar doença nas mudas, validando o modelo experimental adotado.

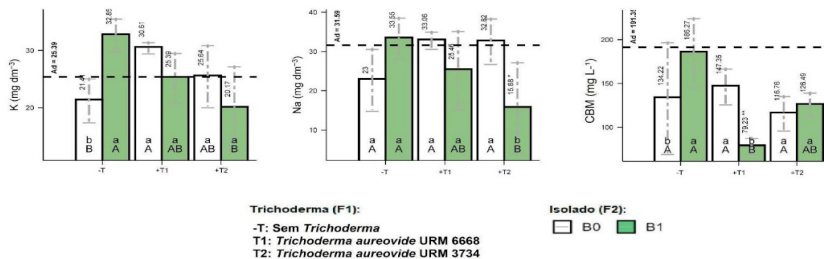


Médias com letras iguais, dentro dos níveis de *Trichoderma* spp. (F1) e biochar (F2), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (5%). Médias indicadas por asterisco diferem do tratamento adicional pelo teste de Dunnnett (5%).

Figura 2. Severidade da doença causada por *Fusarium equiseti* em plantas de uva cultivadas em solo tratado com biochar de poda de uva e *Trichoderma* spp. T = ausência de *Trichoderma*; T1 = *Trichoderma aureoviride* URM 6668; T2 = *T. aureoviride* URM 3734; B0 = sem biochar; B1 = com biochar de poda de uva; tracejado = controle negativo; TB0 = controle positivo.

Embora o crescimento vegetal não tenha apresentado diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, respostas expressivas foram observadas em variáveis morfológicas. O tratamento com biochar associado a T2 resultou em aumento no número de folhas, na massa seca da parte aérea e na massa fresca de raízes, com incrementos de 129,41%, 68,38% e 32,29%, respectivamente, quando comparado ao controle positivo. Por sua vez, a aplicação de T2 na ausência de biochar destacou-se pelo aumento do comprimento dos ramos e da massa seca radicular, indicando que essa estirpe favorece o desenvolvimento vegetativo das mudas independentemente da adição do biochar, enquanto sua associação potencializa atributos específicos de crescimento.

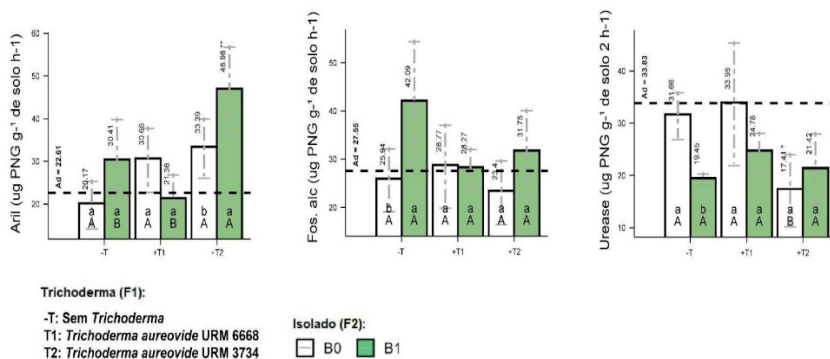
As alterações observadas no desempenho das plantas refletiram-se também nos atributos químicos e microbiológicos do solo. Diferenças significativas foram detectadas para os teores de potássio, sódio e carbono da biomassa microbiana. O biochar aplicado isoladamente promoveu os maiores valores de CBM, com incremento de 38,77% em relação ao controle positivo, reforçando o papel do biochar como condicionador do solo e estimulador da biomassa microbiana. Entretanto, a coaplicação com T1 resultou em redução expressiva do CBM (53,76%), evidenciando uma interação negativa, entre essa estirpe e o biochar (Figura 3). Tendência semelhante foi observada para os teores de K e Na, que aumentaram significativamente com a aplicação isolada do biochar, mas foram reduzidos quando associados a T2, sugerindo que as estirpes de *Trichoderma* podem influenciar a dinâmica de nutrientes do solo de forma distinta quando combinadas com biochar.



Médias com letras iguais, dentro dos níveis de *Trichoderma* spp. (F1) e biochar (F2), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (5%). Médias indicadas por asterisco diferem do tratamento adicional pelo teste de Dunnett (5%).

Figura 3. Alterações nos atributos do solo tratado com biochar e estirpes de *Trichoderma*, cultivado com plantas de uva e inoculado com *Fusarium equiseti*. T = ausência de *Trichoderma*; T1 = *Trichoderma aureoviride* URM 6668; T2 = *T. aureoviride* URM 3734; B0 = sem biochar; B1 = com biochar de poda de uva; tracejado = controle negativo; TB0 = controle positivo.

As atividades enzimáticas do solo responderam de maneira diferenciada às interações entre biochar e *Trichoderma* spp., refletindo alterações na funcionalidade microbiana e na ciclagem de nutrientes. A coaplicação favoreceu a atividade da arilsulfatase, com incremento de 40,64% em relação ao tratamento sem biochar, indicando estímulo aos processos relacionados ao ciclo do enxofre. A fosfatase alcalina também apresentou aumento expressivo (62,25%) na presença do biochar, sobretudo quando associada a *Trichoderma* spp., enquanto, na ausência do antagonista, essa enzima foi igualmente favorecida pelo biochar. Em contraste, a atividade da urease foi negativamente afetada pela aplicação isolada do biochar, entretanto, sua associação T2 resultou em aumento de 23,03%, sugerindo que essa estirpe pode mitigar os efeitos negativos do biochar sobre os processos relacionados ao ciclo do nitrogênio (Figura 4).



Médias com letras iguais, dentro dos níveis de *Trichoderma* spp. (F1) e biochar (F2), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (5%). Médias indicadas por asterisco diferem do tratamento adicional pelo teste de Dunnett (5%).

Figura 4. Alterações nos atributos enzimáticos do solo tratado com biochar e estirpes de *Trichoderma*, cultivado com plantas de uva e inoculado com *Fusarium equiseti*. T = ausência de *Trichoderma*; T1 = *Trichoderma aureoviride* URM 6668; T2 = *T. aureoviride* URM 3734; B0 = sem biochar; B1 = com biochar de poda de uva; tracejado = controle negativo; TB0 = controle positivo.

DISCUSSÃO

Este estudo evidencia o potencial do manejo biológico integrado, baseado na coaplicação de biochar oriundo de poda de videira e *Trichoderma* spp. como estratégia sustentável para o manejo da podridão radicular da videira causada por *Fusarium equiseti*. A necessidade de alternativas ao controle químico de patógenos do solo tem crescido, sobretudo devido à persistência desses organismos e às limitações ambientais e agrônômicas dos fungicidas sintéticos (Panth, Hassler & Baysal-Gurel, 2020). Nesse contexto, os resultados demonstraram que a integração entre condicionadores do solo e agentes de biocontrole pode ser mais eficaz do que a aplicação isolada desses componentes (De Medeiros et al. 2021).

A combinação entre biochar e T2 foi a mais eficiente na redução da severidade da doença, indicando que essa interação favorece um ambiente edáfico mais supressivo ao patógeno. O biochar atua como micro-habitat para microorganismos benéficos, aumentando a competitividade de *Trichoderma* no solo, conforme observado também por Silva et al. (2022) ao avaliar o potencial dessa combinação contra *Fusarium solani* agente causador da podridão radicular da mandioca. Os mecanismos envolvidos estão associados ao aumento da atividade microbiana, à maior diversidade funcional e à indução de resistência sistêmica mediada por compostos associados ao biochar (Medeiros et al., 2020; De Lima et al., 2025).

Os efeitos do biochar, entretanto, mostram-se dependentes da estirpe de *Trichoderma*. Enquanto o T2 apresentou resposta positiva, a estirpe T2 demonstrou maior sensibilidade à presença do biochar, refletida na redução do carbono da biomassa microbiana. Esses resultados confirmam que biochars oriundos de diferentes biomassas apresentam propriedades físico-químicas específicas, capazes de modular de forma distinta a microbiota do solo (Lima et al., 2018; Taskin et al., 2019).

Apesar do pH alcalino do biochar de poda de videira, os valores de pH do solo permaneceram em faixas adequadas ao desenvolvimento de *Trichoderma* spp., possivelmente em função da liberação de ácidos orgânicos provenientes da decomposição da matéria orgânica e dos exsudados radiculares (Adeleke et al., 2017). Além disso, o biochar potencializou a competição por nutrientes e espaço no solo, dificultando o estabelecimento de *Fusarium equiseti*, embora sua aplicação isolada não tenha sido suficiente para suprimir a doença.

De forma integrada, os resultados reforçam que o sucesso do manejo biológico da podridão radicular da videira depende da compatibilidade funcional entre o tipo de biochar e a estirpe de *Trichoderma* utilizada. Essa abordagem fortalece as interações solo-planta-microrganismos e se apresenta como uma base promissora para sistemas vitivinícolas mais resilientes e sustentáveis.

CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou o potencial do reaproveitamento de resíduos da poda da videira para a produção de biochar associado a *Trichoderma* spp. no manejo biológico da podridão radicular causada por *Fusarium equiseti*. De forma geral, a associação entre biochar e *Trichoderma aureoviride*, especialmente a estirpe URM 6668, apresentou maior eficiência na redução da severidade da doença e na manutenção das comunidades microbianas benéficas e dos processos bioquímicos do solo, quando comparada aos demais tratamentos. As respostas observadas foram dependentes da estirpe de *Trichoderma*, evidenciando comportamento diferencial entre os isolados e reforçando a importância da seleção criteriosa de agentes biológicos. De maneira integrada, a combinação entre biochar e *Trichoderma* spp. configura-se como alternativa promissora à redução do uso de fungicidas sintéticos e ao aproveitamento sustentável de resíduos da vitivinicultura, embora estudos adicionais em condições de campo sejam necessários para consolidar essa estratégia como prática aplicável em sistemas vitivinícolas comerciais.

REFERÊNCIAS

- ADELEKE, R.; NWANGBURUKA, C.; OBOIRIEN, B. Origins, roles and fate of organic acids in soils: a review. **South African Journal of Botany**, v. 108, p. 393–406, 2017. DOI: 10.1016/j.sajb.2016.09.002
- 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
- DE LIMA, E. M., et al. Winery Residues Transformed into Biochar and Co-Applied with *Trichoderma* Increase Grape Productivity and Soil Quality. **Sustainability**, 17(9), 4150, 2025. DOI: 10.3390/su17094150
- DE MEDEIROS, E. V., et al. Effect of biochar and inoculation with '*Trichoderma aureoviride*' on melon growth and sandy Entisol quality. **Australian Journal of Crop Science**, 14(6), 971–977, 2020.
- DE MEDEIROS, E. V., da Silva, L. F., da Silva, J. S. A., da Costa, D. P., de Souza, C. A. F., Berger, L. R. R. & Hammecker, C. (2021 a). Biochar and *Trichoderma* spp. in management of plant diseases caused by soilborne fungal pathogens: a review and perspective. **Research, Society and Development**, 10(15), e296101522465-e296101522465.
- De Medeiros, E.V., Lima, N.T., de Sousa Lima, J.R. et al. Biochar as a strategy to manage plant diseases caused by pathogens inhabiting the soil: a critical review. **Phytoparasitica** 49, 713–726 (2021 b). <https://doi.org/10.1007/s12600-021-00887-y>
- MEDEIROS, E. V., MORAES, M. C. ., COSTA, D. P., DUDA, G. P., SILVA, J. S., OLIVEIRA, J. B., LIMA, J. R. S. ., MENEZES, R. S. C., & HAMMECKER, C. Biochar and *Trichoderma aureoviride* applied to the sandy soil: effect on soil quality and watermelon growth. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, 48(2), 735–751, 2020. DOI:10.15835/nbha48211851
- EDGINGTON, L. V.; KHEW, K. L.; BARRON, G. L. Fungitoxic spectrum of benzimidazole compounds. **Phytopathology**, v. 61, p. 42–44, 1971. DOI: 10.1094/Phyto-61-42
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Phosphatases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 9, p. 167–172, 1977. DOI: 10.1016/0038-0717(77)90070-0
- FRENCH, E.; KAPLAN, I.; IYER-PASCUZZI, A.; NAKATSU, C.; ENDERS, L. Emerging strategies for precision microbiome management in diverse agroecosystems. **Nature Plants**, v. 7, p. 256–267, 2021. DOI: 10.1038/s41477-020-00830-9

GONG, Z. et al. Graph-structured speculative decoding. In: KU, L.-W.; MARTINS, A.; SRIKUMAR, V. (ed.). **Findings of the Association for Computational Linguistics – ACL 2024**. Bangkok: Association for Computational Linguistics, 2024. p. 11404–11415. DOI: 10.18653/v1/2024.findings-acl.677

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses**. R package version 1.0.7, 2020. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>. Acesso em: 14 jan. 2026.

KRAHN, J. R. T. **Microbiota do solo em três sistemas de cultivo de citros e patogenicidade de *Fusarium spp.*** 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

LIMA, J. R. S.; SILVA, W. M.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; CORRÊA, M. M.; MARTINS FILHO, A. P.; CLERMONT-DAUPHIN, C.; ANTONINO, A. C. D.; 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. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.12.033

LI, H. et al. Mechanisms of metal sorption by biochars: biochar characteristics and modifications. **Chemosphere**, v. 178, p. 466–478, 2017. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.072

LI, Z. et al. Effects of phytolith rice-straw biochar, soil buffering capacity and pH on silicon bioavailability. **Plant and Soil**, v. 438, p. 187–203, 2019. DOI: 10.1007/s11104-019-04013-0

LIU, B. et al. Isolation of *Trichoderma* in the rhizosphere soil of *Syringa oblata* from Harbin and their biocontrol and growth promotion function. **Microbiological Research**, 2020. DOI: 10.1016/j.micres.2020.126445

MEDEIROS, E. V.; MORAES, M. C. H. S.; COSTA, D. P.; DUDA, G. P.; SILVA, J. S. A.; OLIVEIRA, J. B.; LIMA, J. R. S.; MENEZES, R. S. C.; HAMMECKER, C. Biochar and *Trichoderma aureoviride* applied to sandy soil: effect on soil quality and watermelon growth. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 48, p. 735–751, 2020. DOI: 10.15835/nbha48211851

MEDEIROS, E. V.; PEREIRA, A. P. A.; SILVA, A. C.; ALBUQUERQUE, M. F.; ROCHA, E.; FARIAS, L.; FERRAZ, R. Biochar and *Trichoderma* as an eco-friendly and low-cost alternative to improve soil chemical and biological properties. **Waste and Biomass Valorization**, v. 14, p. 3507–3520, 2023. DOI: 10.1007/s12649-023-02240-2

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005.

PANDEY, D.; DAVEREY, A.; ARUNACHALAM, K. Biochar: production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120267

PANTH, M.; HASSLER, S. C.; BAYSAL-GUREL, F. Methods for management of soilborne diseases in crop production. **Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 16, 2020. DOI: 10.3390/agriculture10010016

PRAKONGKEP, N.; GILKES, R. J.; WIRIYAKITNATEEKUL, W. Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 5, p. 732–740, 2015. DOI:10.1002/jpln.201500001

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 30, p. 507–512, 1974. DOI: 10.2307/2529204

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. Testing the normality of several samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591–611, 1965.

SILVA, J. S. A. et al. 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. et al. Biochar amendment increases soil microbial biomass and plant growth and suppresses *Fusarium* wilt in tomato. **Tropical Plant Pathology**, v. 45, n. 1, p. 73–83, 2020. DOI: 10.1007/s40858-020-00332-1

SILVA, M. A. et al. Biocontrol potential of grapevine endophytic and rhizospheric fungi against trunk pathogens. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 614620, 2021. DOI: 10.3389/fmicb.2020.614620

STEFFEN, G. P.; MALDANER, J. **Metodologia para multiplicação de *Trichoderma* sp. em substratos orgânicos**. Porto Alegre: SEAPDR/DDPA, 2019. 22 p. (Boletim técnico).

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 1, n. 4, p. 301–307, 1969. DOI: 10.1016/0038-0717(69)90012-1

TASKIN, E.; BRANÀ, M. T.; ALTOMARE, C.; LOFFREDO, E. Biochar and hydrochar from waste biomass promote the growth and enzyme activity of soil-resident ligninolytic fungi. **Heliyon**, v. 5, n. 7, e02051, 2019. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02051

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

TOKESHI, H.; GALLI, F. Variabilidade de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* em São Paulo. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 23, p. 195–209, 1966.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p. 1467–1476, 1988. DOI: 10.1080/00103628809368027