

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Dissertação

**Indicadores de qualidade do solo em Unidades de Referência Produtiva de
Noz-Pecã sob diferentes sistemas de manejo**

Jaqueline Lübke Weege

Pelotas, 2025

Jaqueline Lübke Weege

**Indicadores de qualidade do solo em Unidades de Referência Produtiva de
Noz-Pecã sob diferentes sistemas de manejo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador(a): Dr. Ezequiel Cesar Carvalho Miola

Coorientador(a)(es)(as): Dra. Rosane Martinazzo;
Dr. Carlos Roberto Martins.

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

W394i Weege, Jaqueline Lübke

Indicadores de qualidade do solo em Unidades de Referência Produtiva de Noz-Pecã sob diferentes sistemas de manejo [recurso eletrônico] / Jaqueline Lübke Weege ; Ezequiel Cesar Carvalho Miola, orientador ; Rosane Martinazzo, Carlos Roberto Martins, coorientadores. — Pelotas, 2025.
86 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. *Carya illinoensis*. 2. Atividade enzimática do solo. 3. Manejo do solo. 4. Saúde do solo. I. Miola, Ezequiel Cesar Carvalho, orient. II. Martinazzo, Rosane, coorient. III. Martins, Carlos Roberto, coorient. IV. Título.

CDD 634.521

Jaqueline Lübke Weege

Indicadores de qualidade do solo em Unidades de Referência Produtiva de
Noz-Pecã sob diferentes sistemas de manejo

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 28 de abril de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ezequiel Cesar Carvalho Miola (Orientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

Profa. Dra. Lizete Stumpf

Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Paulo Ademar Avelar Ferreira

Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Lavras

Resumo

WEEGE, Jaqueline Lübke. **Indicadores de qualidade do solo em Unidades de Referência Produtiva de Noz-Pecã sob diferentes sistemas de manejo.**

Orientador: Ezequiel Cesar Carvalho Miola. 2025. 86 f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e da Água)- Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

O aumento da produção de noz-pecã (*Carya illinoensis*) no Brasil e a valorização do seu cultivo mais sustentável reforçam a necessidade de buscar mais informações sobre os efeitos dos diferentes sistemas de manejo na qualidade do solo. Dessa forma, o objetivo geral do presente trabalho foi avaliar a relação de causa-efeito entre atributos de qualidade de diferentes tipos de solo, sob diferentes manejos e a saúde do solo em pomares de noqueira-pecã no Sul do Brasil. O estudo foi realizado em 15 pomares de noqueira-pecã localizados em 11 municípios do RS. Foram coletadas quatro amostras de solo em cada pomar, na camada de 0-10 cm de profundidade na projeção da copa das plantas. Foram determinados o carbono orgânico total (COT), carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal (RB), β -glicosidase (BETA), arilsulfatase (ARIL), granulometria, pH, H+Al, soma de bases, V%, CTC, e conteúdos de P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu, B, Mn do solo. Foi aplicada uma análise de componentes principais (PCA) a fim de definir qual(ais) variável(eis) foram mais importantes para a variabilidade dos dados analisados. A análise de redundância (RDA), foi aplicada buscando relacionar a influência da variável ou variáveis explicativas para os indicadores biológicos no solo. Também foram analisados os quocientes microbiano (qMic), metabólico (qCO₂), e de mineralização (qM). Além disso, foi avaliada a saúde do solo utilizando a combinação da abordagem da Avaliação Abrangente da Saúde do solo (CASH) e o modelo de quatro quadrantes (4QM). As análises multivariadas mostraram que há uma variabilidade do manejo dentro de cada pomar, o que prejudicou a verificação da primeira hipótese. O manejo de correção do pH mostrou-se importante, especialmente com variáveis associadas à fertilidade, como Ca, CTC e saturação de bases. Os indicadores biológicos COT e RB tiveram maior destaque diante das demais variáveis químicas e físicas. COT e BETA se correlacionam positivamente com a maioria dos macro e micronutrientes e CTC, mostrando sua influência nos processos de ciclagem de nutrientes e fertilidade. Além disso, COT, RB e CBM demonstram ser influenciados pelo tipo de solo e pelas práticas de manejo. Pomares em solos mais arenosos e com manejo não conservacionista, apresentam menor COT, RB e CBM, refletindo em perda de fertilidade e menor dinamismo do solo. Assim como, os maiores valores de quocientes foram em pomares com manejos de plantas de cobertura, sistema agroflorestal e pastejo de animais, sendo esse aporte de resíduos orgânicos que influenciou a maior eficiência dos microrganismos na transformação da matéria orgânica em nutrientes disponíveis no solo. A integração das metodologias CASH e 4QM foi eficiente para avaliar a saúde do solo nos pomares. Sistemas orgânicos, agroflorestais e com plantas de cobertura mostraram maior saúde do solo, confirmando a segunda hipótese do estudo. Além disso, a análise apontou solos em processo de degradação que requerem revisão de manejo.

Palavras-chave: *Carya illinoensis*; atividade enzimática do solo; manejo do solo; saúde do solo.

Abstract

WEEGE, Jaqueline Lübke. **Soil quality indicators in Pecan Productive Reference Units under different management systems**. Advisor: Ezequiel Cesar Carvalho Miola. 2025. 86 f. Dissertation (Master's Degree in Soil and Water Management and Conservation) - Eliseu Maciel School of Agronomy, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2025.

Increased production of Pecan nut (*Carya illinoensis*) in Brazil and the need for a more sustainable cultivation system highlight further studies on the effects of different production systems on soil quality. Thus, the general objective of this study was to evaluate the cause-effect relationship between quality attributes of different soil types, under different management systems, and soil health in pecan orchards in southern Brazil. The study was carried out in 15 pecan orchards located in 11 municipalities of RS. Four soil samples were collected in each orchard, in the 0-10 cm layer in the projection of the plant canopy. Total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), basal respiration (RB), β -glucosidase (BETA), arylsulfatase (ARIL), particle size, pH, H+Al, sum of bases (V%), CEC, and soil P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu, B, and Mn contents were determined. A principal component analysis (PCA) was applied to define which variable(s) were most important for the variability of the analyzed data. Redundancy analysis (RDA) was applied to relate the influence of the explanatory variable or variable to the biological indicators in the soil. The microbial (qMic), metabolic (qCO₂), and mineralization (qM) quotients were also analyzed. In addition, soil health was assessed using a combination of the Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH) approach and the four-quadrant model (4QM). Multivariate analyses showed that there is variability in management within each orchard, which hindered the verification of the first hypothesis. PH correction management proved to be important, especially with variables associated with fertility, such as Ca, CEC and base saturation. The biological indicators TOC and RB stood out more than the other chemical and physical variables. TOC and BETA positively correlated with most macro and micronutrients and CEC, showing their influence on nutrient cycling and fertility processes. In addition, TOC, RB and MBC were shown to be influenced by soil type and management practices. Orchards in sandier soils and with non-conservationist management have lower TOC, RB and MBC, reflecting loss of fertility and lower soil dynamism. Likewise, the highest quotient values were in orchards with cover crop management, agroforestry system and animal grazing, and this input of organic residues influenced the greater efficiency of microorganisms in transforming organic matter into nutrients available in the soil. The integration of the CASH and 4QM methodologies was efficient in assessing soil health in orchards. Organic, agroforestry and cover crop systems showed greater soil health, confirming the second hypothesis of the study. In addition, the analysis indicated soils in the process of degradation that require management review.

Keywords: *Carya illinoensis*; soil enzyme activity; soil management; soil health.

Lista de Figuras

Figura 1	Modelo dos quatro quadrantes (4QM).....	21
Capítulo 1: Indicadores de qualidade do solo em Unidades de Referência Produtiva de noz-pecã sob diferentes sistemas de manejo		
Figura 1	Mapa do Brasil, destacando-se o Estado do RS com a localização dos onze municípios com URPecans, onde quinze pomares foram distribuídos e avaliados.....	33
Figura 2	Diagrama de ordenação resultante da análise de componentes principais (PCA).....	40
Figura 3	Nível de correlação de cada variável explicativa para o componente principal 1.....	41
Figura 4	Diagrama de ordenação resultante da análise de redundância (RDA).....	42
Capítulo 2: Avaliação da saúde do solo no sistema de produção de noz-pecã no Sul do Brasil		
Figura 1	Mapa do Brasil, destacando-se o Estado do Rio Grande do Sul com a localização dos onze municípios com URPecans, onde quinze pomares foram distribuídos e avaliados.....	59
Figura 2	Modelo de quatro quadrantes (4QM).....	66
Figura 3	Distribuição normal cumulativa (CND) para pontuação de carbono orgânico total do solo e atividade enzimática específica média (ASEA) em solos cultivados com nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul - RS.....	67
Figura 4	Diagrama de dispersão entre carbono orgânico total do solo (COT) e atividade enzimática específica média (ASEA) de 15 pomares de nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul - RS.....	68

Lista de Tabelas

Capítulo 1: Indicadores de qualidade do solo em Unidades de Referência Produtiva de noz-pecã sob diferentes sistemas de manejo

Tabela 1	Carbono orgânico total (COT), Carbono da biomassa microbiana (CBM), Respiração basal (RB), Quociente metabólico (qCO_2), Quociente microbiano ($qMIC$) e Quociente de mineralização (qM) do solo em pomares de nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do RS.....	48
----------	---	----

Capítulo 2: Aspectos ambientais da saúde do solo no sistema de produção de noz-pecã no Sul do Brasil

Tabela 1	Caracterização química e granulométrica da camada 0,00 - 0,10 m do solo de pomares de nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do RS.....	61
Tabela 2	Distribuição dos pomares nos quatro quadrantes (Q1, Q2, Q3 e Q4).....	69

Sumário

1 Introdução.....	8
2 Revisão de literatura.....	11
2.1 A cultura da noqueira-pecã.....	11
2.2 Sistemas de cultivo e manejo do solo.....	12
2.3 Indicadores biológicos da qualidade do solo.....	15
2.4 Qualidade do solo e o Modelo de Quatro Quadrantes (4QM).....	19
Referências.....	22
Capítulo 1: Indicadores de qualidade do solo em Unidades de Referência Produtiva de noz-pecã sob diferentes sistemas de manejo.....	29
1.1 Introdução.....	30
2 Material e métodos.....	32
2.1 Áreas de estudo.....	32
2.2 Amostragem e análise de solo.....	33
2.3 Levantamento de informações do manejo adotado nos pomares.....	34
2.4 Análises estatísticas.....	38
3 Resultados e Discussão.....	38
3.1 Variabilidade ambiental e efeitos do manejo sobre os indicadores biológicos do solo.....	38
3.2 Indicadores biológicos e quocientes metabólicos, microbianos e de mineralização de solos em pomares de noqueira-pecã no Estado do Rio Grande do Sul sob diferentes sistemas de manejo.....	44
Conclusões.....	49
Referências.....	49
Capítulo 2: Avaliação da saúde do solo no sistema de produção de noz-pecã no Sul do Brasil.....	55
1 Introdução.....	56
2 Material e Métodos.....	58
2.1 Área de estudo.....	58
2.2 Amostragem e análise do solo.....	60

2.3 Atividade enzimática específica média (ASEA).....	62
2.4 Levantamento de informações do manejo anotado nos pomares.....	62
2.5 Estratégias de avaliação da saúde do solo combinando CASH e 4QM.....	65
3 Resultados e Discussão.....	66
3.1 Avaliações de saúde do solo em pomares de nogueira-pecã combinando CASH e 4QM.....	66
Conclusões.....	76
Referências.....	76
Considerações finais.....	82
Anexo 1: Caracterização química da camada 0,00 - 0,10 m do solo de pomares de nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do RS.....	83
Anexo 2: Caracterização granulométrica e enzimática da camada 0,00 - 0,10 m do solo de pomares de nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do RS.....	84

1 Introdução

O aumento da produção de noz-pecã (*Carya illinoensis*) no Brasil, principalmente na região sul, favorecido pelas condições do solo e clima da região, atrelado ao alto consumo devido às suas propriedades nutritivas, traz a necessidade de estudá-la para promover o cultivo mais sustentável com práticas agrícolas adequadas às condições de manejo e cultivo dos pomares (Alba *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2021).

A produção sustentável de noqueira-pecã é crucial para garantir a produtividade e a qualidade dos frutos a longo prazo. Práticas que conservam o solo, utilizam a água de forma eficiente e minimizam o uso de insumos sintéticos contribuem para a saúde do pomar e a qualidade das nozes. Em um cenário de mudanças climáticas, sistemas produtivos resilientes são essenciais para enfrentar eventos extremos como secas e ondas de calor, assegurando a estabilidade da produção e a rentabilidade do negócio. A adoção de técnicas sustentáveis não só protege o meio ambiente, mas também fortalece a capacidade da cultura da noqueira-pecã de se adaptar e prosperar em condições climáticas adversas.

Os pomares de noz-pecã apresentam um grande potencial ambiental, que é a imobilização do CO₂ em sua biomassa aérea e nas raízes, onde o sequestro de carbono vem sendo um tema com enorme perspectiva, e é útil para a elaboração de planos nacionais para medições de mitigação de gases de efeito estufa (GEEs) (Cambareri *et al.*, 2023).

O solo é um ambiente rico em diversidade biológica, especialmente na rizosfera, onde ocorrem interações entre plantas e microrganismos. Essas interações podem ser benéficas ou prejudiciais para as plantas, afetando seu crescimento, nutrição e resistência a estresses (Ren *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023). A interação entre os microrganismos e as plantas resulta na produção de compostos antimicrobianos e na ativação de mecanismos de defesa. Esse contexto é relevante para a noqueira-pecã, pois essas plantas apresentam uma arquitetura radicular que torna seu desenvolvimento lento, destacando a importância de estudá-las e avaliar as interações biológicas com a planta (Cambareri *et al.*, 2023; Martins *et al.*, 2021).

Informações sobre o efeito dos diferentes sistemas produtivos na qualidade do solo são importantes para a avaliação das práticas de manejo a serem adotadas, de modo a melhorar a produtividade e a qualidade das nozes (Martins *et al.*, 2021). Para isso, torna-se necessária a utilização de indicadores capazes de estimar com clareza os impactos destas práticas sobre o solo. Atributos microbiológicos, como a atividade enzimática, o carbono da biomassa microbiana e a respiração acumulada do solo, são considerados indicadores sensíveis de alterações ambientais decorrentes do uso agrícola. Por esse motivo, podem auxiliar na interpretação da magnitude dos efeitos de interferências antropogênicas no ecossistema (Barbosa *et al.*, 2023; Bastos, 2021).

As interações entre microrganismos do solo, enzimas extracelulares e matéria orgânica no solo são complexas e fortemente influenciadas pelo tipo de solo e uso da terra, o que tem impulsionado muitos estudos sobre os efeitos das práticas de manejo agrícola nas propriedades microbianas do solo e a ligação com a qualidade do solo (Chaer *et al.*, 2023). A atividade das enzimas do solo é um importante indicador da qualidade do solo, sendo muito sensível às mudanças no solo, devido a diferentes práticas de uso do solo. Embora plantas e animais também sejam fonte de enzimas do solo, os microrganismos são sua fonte primária. Essas enzimas são responsáveis por controlar diversos processos, com papéis fundamentais na síntese/decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) e na ciclagem de nutrientes (Rodrigues *et al.*, 2021), além de apresentarem boa correlação com o rendimento das culturas (Chaer *et al.*, 2023).

Uma avaliação em escala regional da atividade enzimática do solo que considere a diversidade edafoclimática, biológica e agrícola pode contribuir para aumentar o conhecimento da variabilidade natural da atividade enzimática nos solos e esclarecer o potencial de bioindicadores das melhores práticas de conservação para promover a qualidade do solo. Com base nessa premissa e tendo por base a necessidade de estudos relacionados a manejos adequados na cultura da noqueira-pecã, o estudo se propõe a elucidar os efeitos de diferentes sistemas de manejo na produção de noz-pecã, de modo a oportunizar o estabelecimento de práticas de manejo que interfiram positivamente na qualidade do solo.

Portanto, as hipóteses deste estudo são: a) as Unidades de Referência Produtiva de noz-pecã (URPecan) com plantas de cobertura no solo apresentam melhores resultados nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo; b) práticas de manejo como a adubação orgânica e a adoção de sistemas de irrigação promovem maior atividade biológica e interferem positivamente na saúde do solo.

Dessa forma, o objetivo geral do presente trabalho foi avaliar a relação de causa-efeito entre atributos de qualidade de diferentes tipos de solo, sob diferentes manejos e a saúde do solo em pomares de noqueira-pecã no Sul do Brasil. Já os objetivos específicos foram: a) coletar dados de solo e sistematizar as informações em 13 URPecan localizadas nos principais polos produtores de noz-pecã no Rio Grande do Sul; b) Identificar, avaliar e selecionar bioindicadores que melhor representam a qualidade do solo para a produção da noz pecã; c) Avaliar a saúde do solo dos pomares por meio da integração da abordagem da Avaliação Abrangente da Saúde do Solo (CASH) e o modelo de quatro quadrantes (4QM).

2 Revisão de literatura

2.1 A cultura da noqueira-pecã

A cultura da noqueira-pecã (*Carya illinoensis*) é uma das culturas perenes mais antigas e importantes do sul do Brasil, cujo cultivo teve início no século passado, com a introdução de dezenas de variedades oriundas da América do Norte (Martins *et al.*, 2021; Siebeneichler *et al.*, 2024). As noqueiras-pecã são árvores frutíferas, de grande longevidade produtiva e podem superar os 40 metros de altura (Alba *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2020). O seu nome vem de origem indígena, onde a palavra “Pakan” significa “a noz que requer uma pedra para romper-se” (Santos, 2021).

Durante muito tempo a noqueira-pecã foi cultivada somente para pequenas vendas e consumo próprio nas propriedades rurais. No entanto, a partir dos anos 2000 a cultura passou a ser valorizada e reconhecida como uma oportunidade para grandes investimentos comerciais, o que resultou na expansão da área plantada, especialmente nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (Martins *et al.*, 2021; Poletto *et al.*, 2022). A noqueira-pecã é cultivada em muitos países ao redor do mundo e tem relevância econômica em países como Argentina, África do Sul, Austrália, Brasil, China, Estados Unidos, Israel, México e Peru, devido a essas regiões possuírem condições climáticas favoráveis para o crescimento e desenvolvimento da cultura (Poletto *et al.*, 2020; Santos, 2021; Sulzbacher *et al.*, 2019). Esta distribuição mundial da noz-pecã mostra a sua capacidade de adaptação a uma diversidade de solos e ambientes, o que é principalmente notório no continente americano (Cambareri *et al.*, 2023).

A expansão contínua da produção de noz-pecã e a ampliação do seu consumo estão associados à composição bioquímica da fruta, caracterizada pela presença de compostos bioativos que conferem efeitos benéficos à saúde humana, especialmente na mitigação de fatores de risco relacionados a diversas doenças (Siebeneichler *et al.*, 2024).

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023), o Brasil destina 4.750 ha para produção de noz, colhendo 7.194 t. E a produtividade média é inferior a 1.000 kg/ha (Martins *et al.*, 2023). O Rio Grande do Sul é o Estado com maior área de produção na última década, com total de 4.427 ha de área cultivada, o que mostra o quanto a cultura da

nogueira-pecã tem apresentado seu potencial para expansão no Estado. As perspectivas do mercado são promissoras devido ao crescimento do consumo diário de nozes, estimulado pelos benefícios das nozes para a saúde e aliado ao considerável valor pago pelo fruto, gerando mais renda e oportunidades de emprego (Ribeiro *et al.*, 2020).

No Estado do Rio Grande do Sul, foi criada uma unidade para tratar a cultura dentro da secretaria de agricultura estadual, com pesquisas que buscam aprimorar as cultivares que se adaptam no Estado e que apresentam produtividade satisfatória. Uma variedade que apresenta destaque no meio técnico é a Barton, por apresentar características como a tolerância à sarna (*Venturia effusa*) e facilidade em propagação (Ortiz *et al.*, 2019).

Segundo Casagrande *et al.* (2023), algumas práticas são fundamentais no cultivo da noqueira-pecã, como por exemplo o manejo de poda do pomar, que é uma poda de limpeza, que geralmente ocorre nos meses de junho a agosto. Neste período são retirados os galhos quebrados, galhos com pouco acesso a luz solar, que impedem a entrada de luz na planta. No verão, nos meses de janeiro e fevereiro, é feita a retirada de galhos com crescimento excessivo e a coleta dos frutos de noqueira-pecã ocorre nos meses de abril e maio.

2.2 Sistemas de cultivo e manejo do solo

A devastação da cobertura vegetal é um problema ambiental enfrentado em todo o mundo. A necessidade de aumentar a produção de alimentos sem aumentar a área cultivada é uma demanda crescente que desafia o setor agrícola mundial (Guimarães *et al.*, 2023). Neste cenário, o Brasil se destaca como um grande produtor mundial de alimentos, com uma área plantada de um pouco mais de 83 milhões de hectares (IBGE, 2020).

À medida que o cultivo da noqueira cresceu comercialmente, sua continuidade foi limitada pela falta de apoio, problemas fitossanitários, ausência de informações técnicas e de pesquisas para apoiar o cultivo (Martins *et al.*, 2021). Além disso, a implantação de pomares em locais inadequados, a suscetibilidade a doenças de determinadas variedades e a escassez de aplicação de manejos culturais, tiveram impacto negativo, resultando na falta de interesse no cultivo comercial dos pomares (Alba *et al.*, 2021).

O cultivo sustentável da noqueira-pecã envolve diversas práticas de manejo do solo e das plantas, onde são utilizadas técnicas que priorizam fontes alternativas de adubação e práticas agroecológicas, promovendo a manutenção da biodiversidade, a otimização dos ciclos biológicos de plantas e animais e a redução da emissão de GEEs (Guimarães *et al.*, 2023).

O cultivo da noqueira requer planejamento em função da adaptação da cultivar em diferentes regiões, executando-se práticas agrícolas adequadas às condições de manejo e cultivo do pomar. Diante disso, a escolha de locais apropriados para implantar os pomares de pecã é um fator importante para expressar toda a potencialidade produtiva (Alba *et al.*, 2021; Siebeneichler *et al.*, 2024). Segundo Casagrande *et al.*, (2023) a noqueira-pecã é adaptada a solos com pH entre 6 e 6,5, e áreas de inverno curto e frio e verão longo e quente. Além disso, as temperaturas baixas com formação de geadas são necessárias para seu florescimento e as temperaturas elevadas no verão favorecem a formação do fruto.

A produção também pode ser limitada por problemas físicos e fatores químicos que limitam o desenvolvimento das raízes e restringem a absorção de nutrientes. O uso do calcário, por exemplo, é uma prática essencial em solos muito ácidos, permitindo aumentar os teores de cálcio e magnésio, neutralizar o alumínio e reduzir a acidez do solo, promovendo melhor aproveitamento dos fertilizantes com melhor assimilação de nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre (Rodrigues *et al.*, 2021).

Segundo Cambareri *et al.* (2023), a agrossilvicultura tem sido apontada como uma alternativa promissora para os pomares de noz-pecã, pois podem ser integrados não apenas às culturas de inverno, como trigo e cevada, devido à sua natureza caducifolia da espécie, mas também com a pecuária de corte e leite, dada a possibilidade de estabelecimento de pastagens de alta qualidade entre as plantas e entrelinhas. De acordo com Carvalho *et al.* (2024), a integração de animais, árvores e arbustos em áreas de cultivo pode contribuir para a restauração dos ciclos biogeoquímicos e a recuperação da multifuncionalidade dos ecossistemas naturais, promovendo maior complexidade estrutural e influenciando positivamente o microclima, a disponibilidade de água e a diversidade biológica. Portanto, os pomares de nozes podem fornecer uma base a ser combinada com qualquer sistema

agroalimentar, levando a sistemas sustentáveis integrados (ISS) (Guimarães *et al.*, 2023).

Em sistemas convencionais é comum o cultivo da noqueira-pecã em monocultura com o solo descoberto nas entrelinhas. No entanto, há consequências desta prática que trazem malefícios ao solo, tornando-o suscetível a erosão e a perda de umidade, assim como, prejudica a microbiota do solo que é responsável pela ciclagem de nutrientes (Rodriguez-Ramos *et al.*, 2022). No entanto, segundo Ding *et al.* (2024), pomares que utilizam plantas de cobertura nas entrelinhas se beneficiam de diversas melhorias no solo, incluindo supressão de ervas daninhas, melhoria nos atributos físico-químicos bem como, dá suporte aos microrganismos benéficos para as plantas. Neste sentido, as plantas de cobertura contribuem para o aumento dos teores de matéria orgânica do solo (MOS), aumentando a atividade enzimática extracelular ao fornecer substratos mais abundantes, o que cria um ambiente rico em nutrientes que dá suporte ao crescimento das plantas (Ding *et al.*, 2024). De acordo com Benati *et al.* (2021), é importante que o manejo do solo dos pomares de noqueira-pecã seja feito com a utilização de plantas de cobertura, como aveia, azevém, nabo-forrageiro, entre outras, pois colabora, por meio da ciclagem, para a redução da deficiência de nutrientes ao longo da vida produtiva dos pomares.

A combinação de adubação química e orgânica têm sido bastante difundida e muitos trabalhos mostram que essa adoção pode trazer benefícios para o solo, no que tange a qualidade do solo atrelada a maior produtividade das culturas (Wang, Ma e Zhang, 2024; Xu *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2025). Dessa forma, os estudos revelaram que a combinação de ambos é essencial no crescimento das culturas, fertilidade do solo e sustentabilidade, em comparação ao uso exclusivo de fertilizante químico. Além disso, essa prática preserva o meio ambiente, tornando-a uma estratégia de manejo ambientalmente compatível para alcançar o desenvolvimento sustentável. De acordo com Tong *et al.* (2023), essa combinação aumenta significativamente o teor de nutrientes do solo e as atividades enzimáticas do solo em pomares de noqueira-pecã, promovendo melhoria da qualidade da fruta e dos aspectos econômicos.

Em regiões serranas do Rio Grande do Sul é comum que os agricultores encontrem desafios diante do relevo topográfico acidentado, então utilizam alternativas para se adaptar a essas condições naturais. Dessa forma, são construídos patamares, onde são escavados degraus largos nas encostas das serras, que auxiliam na acessibilidade para o manejo das nogueiras, bem como, tem grande eficácia na conservação do solo, pois minimiza a erosão do solo (Mesfin *et al.*, 2019; Tadesse e Shiferaw, 2024; Jiao, Yang e Li, 2024).

As limitações devido à má distribuição pluviométrica, condicionam o sucesso da cultura da noz-pecã, o que motiva o uso de irrigação. Diante disso, o manejo de irrigação é uma estratégia que permite otimizar a produtividade e a qualidade do produto final. De acordo com Zermeño-González *et al.* (2023), a irrigação por gotejamento é muito utilizada e tem o potencial de ser o sistema mais eficiente e usa menos água pois a área de molhagem comparativamente menor reduz as perdas devido à evaporação da superfície do solo. Além disso, o consumo de água das árvores do pomar depende do seu estágio de crescimento, das variações climáticas diárias e do teor de água do solo, neste sentido, os emissores de água estão localizados ao longo da linha das árvores, fornecendo de maneira eficiente água para as plantas (Zermeño-González *et al.*, 2023; Scudiero *et al.*, 2024).

No entanto, é necessário ficar atento, pois, segundo Alba *et al.* (2021), a má drenagem do solo prejudica a produção vegetal, devido ao excesso de água que compromete a aeração no solo, inibindo o crescimento radicular. De acordo com Rodriguez-Ramos *et al.* (2022), as nogueiras têm sistemas radiculares profundos e freatofíticos que alcançam camadas subterrâneas de água, o que lhes confere tolerância natural à seca e capacidade de prosperar em regiões mais secas.

2.3 Indicadores biológicos da qualidade do solo

Os atributos microbiológicos, como a atividade enzimática, a biomassa microbiana e a respiração acumulada do solo desempenham um papel fundamental na avaliação da qualidade do solo e na interpretação dos efeitos das práticas de manejo agrícola. No caso específico da cultura de noqueira-pecã, esses indicadores microbiológicos podem ser utilizados como ferramentas para monitorar e avaliar o impacto das interferências

antropogênicas no ecossistema. Segundo Zheng *et al.* (2024), a eficácia de práticas conservacionistas, por exemplo, pode ser avaliada através dos indicadores biológicos do solo, refletindo a capacidade do solo em sustentar a vida microbiana e, conseqüentemente, a saúde do ecossistema como um todo.

O quociente microbiano, quociente de mineralização e quociente metabólico têm sido utilizados como indicadores biológicos da qualidade do solo (Antisari *et al.*, 2021; Ashraf; Waqas; Rahman, 2022; Mganga *et al.*, 2024), pois são vinculados a funções-chave do ecossistema do solo, como a ciclagem de nutrientes, estrutura e estabilidade do solo, além da biodiversidade microbiana e vegetal, então podem ser usados para detectar e revelar mudanças no uso da terra (Mganga *et al.*, 2024).

O quociente metabólico nos indica a eficiência dos microrganismos no uso do substrato e se dá pela razão entre a respiração basal e a biomassa microbiana do solo, por unidade de tempo (Silva, Azevedo e De-Polli, 2007). Ele expressa quanto de CO₂ é liberado pela biomassa microbiana em função do tempo, representando a taxa de respiração específica da biomassa microbiana (Ashraf; Waqas; Rahman, 2022). O quociente metabólico prediz que a biomassa bacteriana se torna mais eficiente quando menos carbono é perdido na forma de CO₂, possibilitando maior incorporação do carbono nos tecidos microbianos (Kolln *et al.*, 2023). Segundo Ashraf, Waqas e Rahman (2022), quocientes metabólicos elevados são associados a comunidades microbianas em processo inicial de desenvolvimento ou em estresse metabólico, apresentando mais microrganismos ativos do que inativos. Diante disso, de acordo com Mganga *et al.* (2024), o quociente metabólico é um indicador muito sensível para avaliar as mudanças no uso da terra.

O quociente microbiano fornece indicações acerca da qualidade da matéria orgânica a partir da relação entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total, sendo esse relacionado a utilização de carbono pelos microrganismos (Mganga *et al.*, 2024). Além disso, seus resultados podem refletir situações de estresse ambiental que diminuem a capacidade de utilização de carbono, levando a redução do quociente microbiano. Por outro lado, a adição de matéria orgânica de alta qualidade pode aumentar o quociente microbiano (Junior e Mendes, 2007). O quociente de mineralização (*qM*), que expressa a fração de C orgânico total mineralizado ao longo de um

período de tempo, indica a eficiência da microflora no metabolismo da MO, sendo, portanto, um indicador valioso da estabilidade da MOS (Pinzari *et al.*, 1999). Segundo Saikia *et al.* (2019), o quociente de mineralização é um indicador sensível para avaliar a qualidade e saúde do solo, podendo ser utilizado para identificar práticas sustentáveis.

A rizosfera, que fornece uma interface entre as raízes das plantas e o solo e abriga muitos microrganismos, é uma zona estreita perto das raízes do solo. As comunidades microbianas na rizosfera estão intimamente relacionadas com a absorção de nutrientes e o crescimento das plantas (Torabian *et al.*, 2025). A microbiota da rizosfera obtém carboidratos das plantas hospedeiras e, em troca, secreta ácidos orgânicos para ativar nutrientes no solo que inicialmente não estão disponíveis para as plantas (Ren *et al.*, 2023).

A importância dos microrganismos no funcionamento dos ecossistemas tem gerado um crescente interesse na determinação da biomassa microbiana do solo (Guimarães *et al.*, 2017; Shokuhifar *et al.*, 2023; Costa *et al.*, 2024). De acordo com Mganga *et al.* (2024), a biomassa microbiana do solo é o componente ativo do reservatório orgânico do solo, responsável pela decomposição da matéria orgânica, afetando o conteúdo de nutrientes do solo e, conseqüentemente, a produtividade primária em diversos processos biogeoquímicos em ecossistemas terrestres. Por isso, o carbono da biomassa microbiana é um indicador valioso para compreender e prever os efeitos a longo prazo sobre as mudanças no uso da terra e nas condições do solo associadas (Costa *et al.*, 2024).

A vegetação e as condições ambientais determinam a quantidade e a qualidade do material que se deposita no solo, influenciando a heterogeneidade e a taxa de decomposição dos resíduos na superfície (Ding *et al.*, 2024). A decomposição desses materiais depende dos processos de transformação da matéria orgânica pelos microrganismos do solo, que permitem medir a qualidade do solo através dos valores de carbono da biomassa microbiana (Costa *et al.*, 2024). A biomassa microbiana, composta por bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários e algas, é um componente importante na avaliação da qualidade do solo, pois participa na decomposição natural, na dinâmica dos nutrientes e na estabilidade dos agregados (Perez, Ramos e McManus, 2004). Ela é afetada pelas variações sazonais de umidade

e temperatura, pelo manejo do solo, pelo cultivo e pelos resíduos vegetais (Costa *et al.*, 2024).

De acordo com Moreira e Siqueira (2006), a matéria orgânica morta representa a maior parte do carbono orgânico do solo, principalmente na forma de húmus. A fração viva da matéria orgânica representa apenas de 1 a 5% da totalidade da matéria orgânica do solo, e dessa parte, 5 a 10% são raízes, de 15 a 30% são compostos pela macrofauna e a maior parte, de 60 a 80% é composta de microrganismos. Sendo assim, a maior parte da matéria orgânica viva do solo é composta pela biomassa microbiana. Dessa forma, a biomassa microbiana pode ser usada como um indicador biológico ou índice de sustentabilidade de sistemas de produção, refletindo mudanças na concentração de matéria orgânica (Mganga *et al.*, 2024).

Segundo Zheng *et al.* (2024), a matéria orgânica do solo reflete a história de longo prazo das práticas de manejo da terra e seu impacto na qualidade do solo. É relativamente estável, e portanto, considerado um indicador confiável, sendo menos afetado por flutuações de curto prazo em comparação com outros indicadores. Nesse sentido, outros indicadores biológicos mais sensíveis a estas alterações podem ser usados, contudo, são muito dispendiosos e não estão disponíveis nas análises de rotina acessadas pelos produtores rurais. Nessa perspectiva, a partir do ano 2020 a pesquisa brasileira disponibilizou indicadores para a avaliação da atividade biológica do solo que apresentam elevada sensibilidade às alterações das práticas de manejo, boa correlação com a matéria orgânica e com o rendimento das culturas e que permitem a avaliação da qualidade do solo em escala comercial (Mendes *et al.*, 2019). O Brasil é o único país do mundo que possui parâmetros biológicos, calibrados em função do rendimento das culturas e da matéria orgânica, nas análises de solo em nível comercial.

No solo, os microrganismos produzem enzimas extracelulares para degradar biomoléculas de alto peso molecular que não conseguem absorver diretamente (Barbosa *et al.*, 2023; Chaer *et al.*, 2023). As enzimas são proteínas com alta capacidade de ativação específica, e este é o fator responsável pela rede coordenada de reações químicas que ocorrem nas células vivas, cuja soma constitui o metabolismo (Mól *et al.*, 2023). A maioria das enzimas do solo são de origem microbiana, embora plantas e animais

também sejam fontes possíveis. Dentre as inúmeras enzimas presentes na solução do solo, as atividades da arilsulfatase e da β -glicosidase, combinadas com algumas medidas de fertilidade e textura do solo, têm sido consideradas para o cálculo do índice de qualidade do solo (Rodrigues *et al.*, 2021). Vários estudos mostraram que a β -glicosidase e arilsulfatase são enzimas do solo de particular interesse porque desempenham papéis fundamentais na avaliação da qualidade do solo (Barbosa *et al.*, 2023; Bastos *et al.*, 2023; Chaer *et al.*, 2023).

A β -glicosidase desempenha um papel essencial na ciclagem do carbono no solo, atuando na etapa final de decomposição da celulose liberando glicose para o crescimento microbiano e a arilsulfatase é responsável pela hidrólise dos ésteres sulfato e liberação de SO_4 , que é uma forma de enxofre disponível para as plantas (Bastos *et al.*, 2023; Kunito *et al.*, 2022; Tabatabai, 1994). No entanto, os bioindicadores não refletem sozinhos as condições do solo, por isso é importante entender de forma mais abrangente sua atuação nas funções do solo, avaliando diversos atributos para compreender as condições da saúde do solo (Zheng *et al.*, 2024). Por isso, o estudo e monitoramento de vários atributos da qualidade do solo são essenciais para garantir práticas de manejo sustentáveis e preservar a qualidade do solo na cultura da noqueira-pecã.

2.4 Qualidade do solo e o Modelo de Quatro Quadrantes (4QM)

De acordo com Yang *et al.* (2025), a qualidade do solo refere-se à capacidade do solo de sustentar a produtividade biológica, proteger o meio ambiente e apoiar a saúde das plantas e dos animais. Sua avaliação geralmente considera propriedades físicas, químicas e biológicas, como teores de matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes, pH, textura e atividade dos microrganismos. A qualidade do solo desempenha um papel crucial na saúde das plantas, inclusive se tratando da cultura da noqueira-pecã que necessita de uma boa disponibilidade de nutrientes, por isso a obtenção de um ambiente sustentável que apresenta um solo saudável vem ganhando cada vez mais atenção entre os pesquisadores (Benati *et al.*, 2021). O solo é um ambiente altamente complexo, com uma atividade biológica intensa, principalmente na rizosfera, onde ocorrem interações entre as plantas e os microrganismos

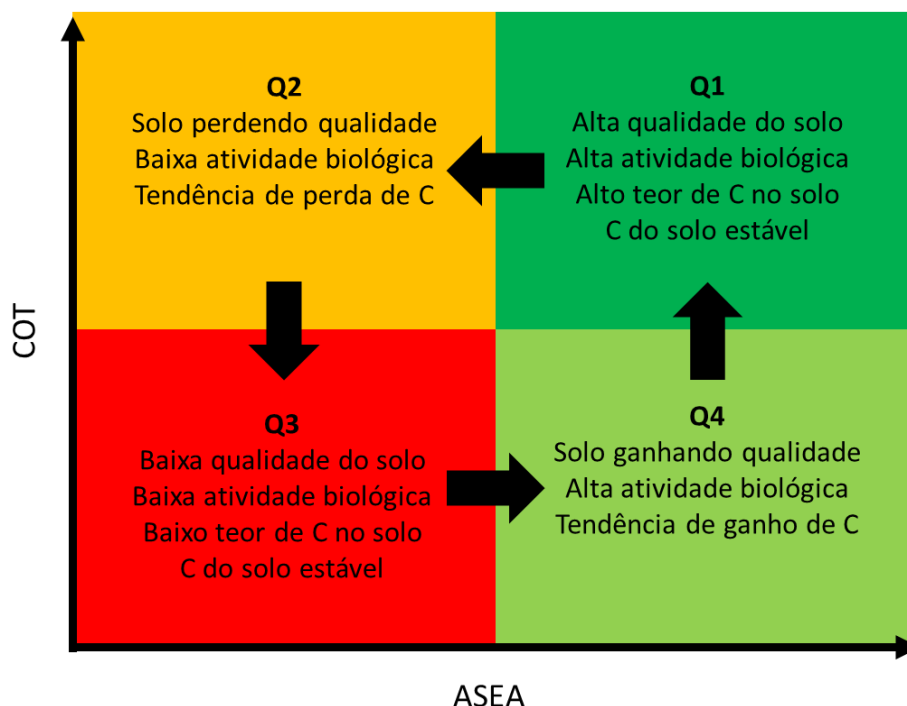
presentes, que podem ser tanto benéficas quanto prejudiciais para as plantas, afetando seu crescimento, nutrição e resistência a estresses (Zheng *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2025).

Segundo Chaer *et al.* (2023), as interações entre microrganismos do solo, enzimas extracelulares e matéria orgânica no solo são complexas e fortemente influenciadas pelo tipo de solo e uso da terra, o que tem impulsionado muitos estudos sobre os efeitos das práticas de manejo agrícola nas propriedades microbianas do solo e a ligação com a qualidade do solo.

Com base na análise das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase foram construídas estruturas interpretativas para avaliação da saúde do solo que estabelecem níveis de referência (baixo, médio e alto), estabelecendo limites para funções de pontuação padronizadas (Mendes *et al.*, 2021). Os primeiros estudos que abordaram essa interpretação, basearam-se no princípio de calibração de nutrientes do solo (Lopes *et al.*, 2013), aplicando modelos de regressão linear, utilizando as enzimas, Carbono Orgânico do Solo (SOC) e uma função de rendimento cumulativo. No entanto, em situações onde a obtenção do rendimento da cultura é inacessível, desenvolveram-se novas estratégias para interpretar a saúde do solo nesses sistemas, com o intuito de pontuar indicadores que não dependam do rendimento da cultura (Carneiro *et al.*, 2024). Diversas metodologias foram propostas para a interpretação de indicadores de saúde do solo e qualidade do solo. A Avaliação Abrangente da Saúde do Solo (CASH), desenvolvida pela Universidade Cornell (Moebius-Clune *et al.*, 2016), resultou na criação do Quadro de Avaliação de Monitorização do Solo (SMAF) (Stott *et al.*, 2010) e do Protocolo de Avaliação da Saúde do Solo (SHAPE) (Nunes *et al.*, 2021).

O modelo de quatro quadrantes (4QM) foi introduzido por Chaer *et al.* (2023) (Figura 1) e, permite a separação de grupos de amostras em quatro categorias: solos saudáveis com alta atividade biológica e alto teor de carbono (quadrante 1), solos passando por degradação biológica, com baixa atividade enzimática e tendência à perda de carbono (quadrante 2), solos não saudáveis, com baixa atividade biológica e baixo teor de carbono (quadrante 3) e solos passando por processos regenerativos, com alta atividade biológica e tendência ao aumento de carbono (quadrante 4).

Figura 1 - Modelo dos quatro quadrantes (4QM)



Fonte: Adaptado de Chaer *et al.*, (2023). Representação esquemática do modelo de quatro quadrantes para avaliar tendências de C usando a atividade enzimática específica média (ASEA) vs. carbono orgânico do solo (COT).

O 4QM integra a relação SOC com a atividade média de ARYL e GLU por unidade de SOC. Nesse sentido, Carneiro *et al.* (2024) avaliaram a combinação da abordagem CASH (Moebius-Clune *et al.*, 2016) e 4QM (Chaer *et al.*, 2023) como uma ferramenta de avaliação da saúde do solo, onde utilizaram dados de BETA e ARIL e SOC. Os autores concluíram que essa abordagem facilitou a diferenciação entre manejos com base em níveis variados de adoção de boas práticas de manejo. Portanto, a implementação de práticas de manejo adequadas é essencial para promover um ambiente favorável ao desenvolvimento da planta (Carneiro *et al.*, 2024). O entendimento das interações entre os microrganismos presentes no solo e a planta pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes, visando garantir a produtividade e a qualidade dos frutos (Chaer *et al.*, 2023).

Referências

- ALBA, José Maria Filippini; WREGE, Marcos Silveira; ALMEIDA, Ivan Rodrigues de; MARTINS, Carlos Roberto. INDICADORES DE SOLO E CLIMA PARA O CULTIVO DE NOGUEIRA-PECÃ NO SUL DO BRASIL: base para zoneamento edafoclimático. **A Face Transdisciplinar das Ciências Agrárias**, [S.L.], p. 31-42, 10 ago. 2021. Atena Editora. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.9172110085> Acesso em: 24 fev. 2025.
- ANTISARI, Livia Vittori *et al.* Soil Biochemical Indicators and Biological Fertility in Agricultural Soils: a case study from northern Italy. **Minerals**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 219, 20 fev. 2021. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/min11020219> Acesso em: 24 fev. 2025.
- ASHRAF, M. N.; WAQAS, M. A.; RAHMAN, S. Microbial Metabolic Quotient is a Dynamic Indicator of Soil Health: trends, implications and perspectives (review). **Eurasian Soil Science**, [S.L.], v. 55, n. 12, p. 1794-1803, dez. 2022. Pleiades Publishing Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1134/S1064229322700119> Acesso em: 24 fev. 2025.
- BARBOSA, Julierme Zimmer *et al.* Soil enzymatic activity in Brazilian biomes under native vegetation and contrasting cropping and management. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 190, p. 105014, out. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105014> Acesso em: 24 fev. 2025.
- BASTOS, Tatiana Reis dos Santos. **INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS E MONOCULTIVO DE CAFÉ**. 2021. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Florestais, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2021. Disponível em: <http://www2.uesb.br/ppg/ppgciflor/wp-content/uploads/2022/04/TATIANA-REIS-DOS-SANTOS-BASTOS.pdf> Acesso em: 24 fev. 2025.
- BASTOS, Tatiana Reis dos Santos *et al.* Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **Catena**, [S.L.], v. 230, p. 107270, set. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2023.107270> Acesso em: 24 fev. 2025.
- BENATI, J. A. *et al.* Caracterização da fertilidade de solos cultivados com Nogueira-pecã no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Boletim de pesquisa e desenvolvimento- 355. Embrapa clima temperado. 2021. ISSN 1678-2518. Dezembro/2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1137719/caracterizacao-da-fertilidade-de-solos-cultivados-com-nogueira-pecã-no-rio-grande-do-sul-e-santa-catarina> Acesso em: 24 fev. 2025.
- CAMBARERI, Gustavo *et al.* Contribution of pecan (*Carya illinoensis* [Wangenh.] K. Koch) to Sustainable Development Goal 2 under the dual perspective of carbon storage and human nutrition. **Frontiers In Soil Science**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 1-16, 14 abr. 2023. Frontiers Media SA. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fsoil.2023.1092003> Acesso em: 24 fev. 2025.

CARNEIRO, Roberto Guimarães; FIGUEIREDO, Cícero Célio de; MALAQUIAS, Juaci Vitoria; MENDES, Ieda Carvalho. A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 198, p. 105394, jun. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105394> Acesso em: 24 fev. 2025.

CARVALHO, Paulo César de Faccio *et al.* Integrated crop-livestock-forestry systems as a nature-based solution for sustainable agriculture. **Agroforestry Systems**, [S.L.], v. 98, n. 7, p. 2309-2323, 23 set. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-024-01057-9>.

CASAGRANDA, Danielle Galvan *et al.* Productivity of pecan nut in the Anta Gorda region in Rio Grande do Sul. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 1-10, 10 jan. 2023. Research, Society and Development. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i1.39574> Acesso em: 24 fev. 2025.

CHAER, Guilherme Montandon *et al.* Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 183, p. 104742, mar. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742> Acesso em: 24 fev. 2025.

COSTA, Romario Martins *et al.* 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, p. 103628, jun. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103628> Acesso em: 25 fev. 2025.

DING, Weiting *et al.*, Ground cover management enhances soil extracellular enzyme activities across Chinese orchards. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 372, p. 123425, dez. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123425> Acesso em: 24 fev. 2025.

GUIMARÃES, Maristela Aparecida Dias *et al.* Experiências e perspectivas no uso de frutíferas em sistemas integrados. **Tecnologia e Inovação em Ciências Agrárias e Biológicas Avanços Para A Sociedade Atual**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-1, 21 ago. 2023. Seven Editora. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.56238/tecnolocienagrariabiosoci-042> Acesso em: 25 fev. 2025.

GUIMARÃES, Nathalia de F. *et al.* Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 34-44, 9 jan. 2017. Revista de Ciências Agrárias. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19084/RCA16041> Acesso em: 25 fev. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. Geociências: Recortes Estatísticos de Produção. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html> Acesso em: 25 fev. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - Área plantada, área colhida e produção, por ano da safra e produto das lavouras, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/noz/br> Acesso em 25 fev. 2025.

JIAO, Wenjun; YANG, Xiao; LI, Yuwei. Traditional knowledge's impact on soil and water conservation in mountain agricultural systems: a case study of shexian dryland stone terraced system, china. *Ecological Indicators*, [S.L.], v. 159, p. 111742, fev. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111742> Acesso em: 24 fev. 2025.

JUNIOR, F. B.; MENDES, I. de C. Biomassa microbiana do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 40 p. - (Documento/Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111 ; 205) 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/572256/biomassa-microbiana-do-solo> Acesso em: 25 fev. 2025.

KÖLLN, O. T. (Organizador) *et al.* **Sistemas para produção agropecuária sustentável no norte pioneiro do Paraná.** Campus Cornélio Procopio – PR: Editora UENP, 2023. 376 f. il. cor. ISBN: 978-65-87941-25-7. Disponível em: <https://uenp.edu.br/editora> Acesso em 24 fev. 2025.

KUNITO, Takashi *et al.* Microbial synthesis of arylsulfatase depends on the soluble and adsorbed sulfate concentration in soils. **European Journal Of Soil Biology**, [S.L.], v. 111, p. 103418, jul. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103418> Acesso em: 25 fev. 2025.

LOPES, André Alves de Castro *et al.* Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 77, n. 2, p. 461-472, 25 fev. 2013. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2012.0191> Acesso em: 24 fev. 2025.

MARTINS, C. R. *et al.* Castanhas: as pequenas grandes notáveis. Anuário HF, Campo & Negócios, p. 39-41, 2020. Anuário Campo & Negócios Hortifrúti. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1128677/castanhas-as-pequenas-grandes-notaveis> Acesso em: 24 fev. 2025.

MARTINS, C. R. *et al.* Práticas básicas do plantio à colheita de noz-pecã. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2021. 19 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 225). ODS 2. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/357157298_Praticas_Basicas_do_Plantio_a_Colheita_de_Noz-pecã Acesso em: 24 fev. 2025.

MARTINS, C.R. *et al.* Panorama da produção, processamento e comercialização de noz-pecã no sul do Brasil. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2023. (Embrapa Clima Temperado. Documentos 535). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1158522/panorama-da-producao-processamento-e-comercializacao-de-noz-pecã-no-sul-do-brasil> Acesso em: 10 abr. 2025.

MENDES, Iêda Carvalho *et al.* Limites críticos para indicadores microbianos em Latossolos tropicais na pós-colheita: o conceito de amostra de solo FERTBIO. 139, 85–93, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025> Acesso em: 18 mar. 2025.

MENDES, Ieda Carvalho, *et al.* Soil quality and grain yield: a win-win combination in clayey tropical oxisols. **Geoderma**, [S.L.], v. 388, p. 114880, abr. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114880> Acesso em: 25 fev. 2025.

MESFIN, Shimbahri *et al.* Spatial Variability of Soil Moisture in Newly Implemented Agricultural Bench Terraces in the Ethiopian Plateau. **Water**, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 2134, 14 out. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11102134> Acesso em: 24 fev. 2025.

MGANGA, Kevin Z.; ROLANDO, José; KALU, Subin; KARHU, Kristiina. Microbial soil quality indicators depending on land use and soil type in a semi-arid dryland in Kenya. **European Journal Of Soil Biology**, [S.L.], v. 121, p. 103626, jun. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103626> Acesso em: 25 fev. 2025.

MOEBIUS-CLUNE, BN *et al.* Avaliação abrangente da saúde do solo - a estrutura Cornell, edição 3.2, 2016 Universidade Cornell, Genebra, NY. 134p. Disponível em: <https://soilhealth.cals.cornell.edu/manual/> Acesso em 24 fev. 2025.

MÓL, Paula Chequer Gouveia *et al.* β -glucosidase: an overview on immobilization and some aspects of structure, function, applications and cost. **Process Biochemistry**, [S.L.], v. 130, p. 26-39, jul. 2023. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2023.03.035> Acesso em: 24 fev. 2025.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J.O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. 2.ed. atualizada e ampliada, Lavras: UFLA. 729 p., 2006.

NUNES, MR *et al.* O protocolo de avaliação da saúde do solo e avaliação aplicada ao carbono orgânico do solo. Soil Sci. Soc. Am. J. 85 (4), 2021. 1196–1213. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.20244> Acesso em: 24 fev. 2025.

ORTIZ, Edson; MARTINS, Carlos Roberto; MALGARIM, Marcelo Barbosa; BILHARVA, Maurício Gonçalves. Barton, a variedade mais importante do Brasil. In: Anais do II simpósio sul-americano da noz-pecã. Pelotas- RS. 2019. p.65-68. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1123247/1/artigo-Barton.pdf> Acesso em: 24 fev. 2025.

PEREZ, Kátia Sueli Sivek; RAMOS, Maria Lucrécia Gerosa; MCMANUS, Concepta. Carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com soja sob diferentes sistemas de manejo nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 567-573, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000600008> Acesso em: 25 fev. 2025.

PINZARI, Flavia; TRINCHERA, Alessandra; BENEDETTI, Anna; SEQUI, Paolo. Use of biochemical indices in the mediterranean environment: comparison among soils under different forest vegetation. **Journal Of Microbiological Methods**, [S.L.], v. 36, n. 1-2, p. 21-28, maio 1999. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-7012\(99\)00007-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-7012(99)00007-x) Acesso em: 25 fev. 2025.

POLETTTO, Tales *et al.* Morphological, chemical and genetic analysis of southern Brazilian pecan (*Carya illinoensis*) accessions. **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 261, p. 108863, fev. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108863> Acesso em: 24 fev. 2025.

POLETTTO, Tales; MUNIZ, Marlove Fátima Brião; POLETTTO, Igor; STEFENON, Valdir Marcos. **Nogueira-pecã: identificação e manejo de doenças**. Santa Maria: Ufsm, 2022. 111 p. Disponível em: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9786557160541_A46266211/preview-9786557160541_A46266211.pdf Acesso em: 24 fev. 2025.

REN, Wei *et al.* Changes in the diversity of pecan (*Carya illinoensis*) rhizosphere microbial community with different nitrogen fertilization, a case study in Oklahoma pecan orchard. **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 321, p. 112365, nov. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112365> Acesso em: 24 fev. 2025.

RIBEIRO, Stephanie Reis *et al.* Chemical composition and oxidative stability of eleven pecan cultivars produced in southern Brazil. **Food Research International**, [S.L.], v. 136, p. 109596, out. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109596> Acesso em: 24 fev. 2025.

RODRIGUES, Raquel Nogueira *et al.* Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 52, n. 3, p. 1-12, 2021. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20200532> Acesso em: 24 fev. 2025.

RODRIGUEZ-RAMOS, Jean C. *et al.* Cover crops enhance resource availability for soil microorganisms in a pecan orchard. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 337, p. 108049, out. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2022.108049> Acesso em: 25 fev. 2025.

SANTOS, Darlyng Oliveira. **Tuber aestivum, Tuber floridanum E FÓSFORO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE NOGUEIRA-PECÃ**. 2021. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Agrobiologia, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria Rs, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22641> Acesso em: 24 fev. 2025.

SAIKIA, Rituparna; SHARMA, Sandeep; THIND, Harmit Singh; SINGH, Yadvinder. Tillage and residue management practices affect soil biological indicators in a rice–wheat cropping system in north-western India. **Soil Use And Management**, [S.L.], v. 36, n. 1, p. 157-172, 12 dez. 2019. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12544> Acesso em: 25 fev. 2025.

SCUDIERO, Elia *et al.* A system for concurrent on-the-go soil apparent electrical conductivity and gamma-ray sensing in micro-irrigated orchards. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 235, p. 105899, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2023.105899> Acesso em: 24 fev. 2025.

SHOKUHIFAR, Younes *et al.* Biochar and wheat straw affecting soil chemistry and microbial biomass carbon countrywide. **Biomass Conversion And Biorefinery**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 5407-5417, 1 maio 2021. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-021-01471-4> Acesso em: 25 fev. 2025.

SIEBENEICHLER, Tatiane Jéssica *et al.* Influence of cultivar on quality parameters of pecans produced in Southern Brazil. **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 336, p. 113423, out. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113423> Acesso em: 25 fev. 2025.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. 6 p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 99). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/627577/determinacao-da-respiracao-basal-rbs-e-quociente-metabolico-do-solo-qco2> Acesso em: 24 fev. 2025.

STOTT, D. E. *et al.* Evaluation of β -Glucosidase Activity as a Soil Quality Indicator for the Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 74, n. 1, p. 107-119, jan. 2010. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2009.0029> Acesso em: 25 fev. 2025.

SULZBACHER, Marcelo Aloisio *et al.* Fungos ectomicorrízicos em plantações de noqueira-pecã e o potencial da truficultura no Brasil. **Ciência Florestal**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 975-987, 30 jun. 2019. Universidad Federal de Santa Maria. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509827581> Acesso em: 24 fev. 2025.

TABATABAI, MA. 1994. Enzimas do solo. Em: Weaver, RW, Scott, A., Bottomley, PJ (Eds.), Métodos de Análise de Solo: Propriedades Microbiológicas e Bioquímicas. Soil Science Society of America, Madison, pp. 778–833.

TADESE, Gezahagn; SHIFERAW, Aneteneh. Effect of Bench Terreces on Selected Soil Physico Chemical Properties in Andit Tid Watershed, North Shoa, Ethiopia. **Frontiers**, [S.L.], v. 1, n. 4, p. 8-16, 8 jan. 2024. Science Publishing Group. <http://dx.doi.org/10.11648/j.frontiers.20240401.12> Acesso em: 24 fev. 2025.

TONG, Yinhao *et al.* Enhancing Soil Fertility and Elevating Pecan Fruit Quality through Combined Chemical and Organic Fertilization Practices. **Horticulturae**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 25, 26 dez. 2023. MDPI AG. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010025> Acesso em: 24 fev. 2025.

TORABIAN, Shahram *et al.* Soil microbial biomass influenced by cover crop after fumigation of potato fields. *Science Of The Total Environment*, [S.L.], v. 958, p. 177910, jan. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177910> Acesso em: 25 fev. 2025.

WANG, Haoyu *et al.* Genome-wide identification of KCS gene family in *Carya illinoensis* and their roles under abiotic stress conditions. **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 321, p. 112343, nov. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112343> Acesso em: 24 fev. 2025.

WANG, Xiaoping; MA, Yinshan; ZHANG, Shiting. Soil enzyme activity and stoichiometry indicates that litter quality regulates soil microbial nutrient demand in a Tibetan alpine meadow. **European Journal Of Soil Biology**, [S.L.], v. 123, p. 103686, dez. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103686> Acesso em: 25 fev. 2025.

XU, Wenxian *et al.* Long-term partial substitution of chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizers increased SOC stability by mediating soil C mineralization and enzyme activities in a rubber plantation of Hainan Island, China. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 182, p. 104691, fev. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104691> Acesso em: 25 fev. 2025.

YANG, Jinkang *et al.* Improving soil quality and crop yield of fluvo-aquic soils through long-term organic-inorganic fertilizer combination: promoting microbial community optimization and nutrient utilization. **Environmental Technology & Innovation**, [S.L.], p. 104050, jan. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2025.104050> Acesso em: 25 fev. 2025.

ZERMEÑO-GONZÁLEZ, A. *et al.* Determination of the Water use Efficiency of a Pecan Nut Orchard based on the Irrigation Scheduling and the Evapotranspiration Rate in Northern Mexico. **The Open Biotechnology Journal**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 1-9, 16 ago. 2023. Bentham Science Publishers Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2174/18740707-v17-230810-2023-11> Acesso em: 25 fev. 2025.

ZHENG, Xianqing *et al.* Long-term bioorganic and organic fertilization improved soil quality and multifunctionality under continuous cropping in watermelon. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 359, p. 108721, jan. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2023.108721> Acesso em: 25 fev. 2025

Capítulo 1: Indicadores de qualidade do solo em Unidades de Referência Produtiva de noz-pecã sob diferentes sistemas de manejo

Resumo: A qualidade do solo é fundamental para um cultivo mais eficiente, tornando indispensável avaliar o impacto das práticas de manejo por meio de vários atributos da qualidade do solo. Dessa forma, o estudo objetivou avaliar a relação entre os atributos químicos, físicos e microbiológicos do solo, bem como, os quocientes metabólicos, microbianos e de mineralização do solo em pomares de noqueira-pecã no Estado do Rio Grande do Sul sob diferentes sistemas de manejo. O estudo foi realizado em 15 pomares de noqueira-pecã localizados em 11 municípios do RS. Foram coletadas quatro amostras de solo em cada pomar, na camada de 0-10 cm de profundidade na projeção da copa das plantas. Foram determinados carbono orgânico total (COT), carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal (RB), β -glicosidase (BETA), arilsulfatase (ARIL), granulometria, pH, H+Al, soma de bases, V%, CTC, e conteúdos de P, K Ca, Mg, S, Zn, Cu, B, Mn do solo. Foi aplicada uma análise de componentes principais (PCA) a fim de definir qual(ais) variável(eis) foram mais importantes para a variabilidade dos dados analisados. Uma análise de redundância (RDA) foi aplicada buscando relacionar a influência da variável ou variáveis explicativas para os indicadores biológicos no solo. Também foram analisados os quocientes microbiano (qMic), metabólico (qCO₂), e de mineralização (qM). Os indicadores biológicos COT e RB tiveram maior destaque diante das demais variáveis químicas e físicas. COT e BETA se correlacionam positivamente com a maioria dos macro e micronutrientes e CTC, mostrando sua influência nos processos de ciclagem de nutrientes e fertilidade. Além disso, COT, RB e CBM demonstram ser influenciados pelo tipo de solo e pelas práticas de manejo. Os pomares em solos mais arenosos e com manejo não conservacionista apresentam menor COT, RB e CBM, refletindo em perda de fertilidade e menor dinamismo do solo. Assim como, os maiores valores de quocientes foram em pomares com manejos de plantas de cobertura, sistema agroflorestal e pastejo de animais. Esse aporte de resíduos orgânicos influenciou a maior eficiência dos microrganismos na transformação da matéria orgânica em nutrientes disponíveis no solo.

Palavras-chave: *Carya illinoensis*; manejo do solo; sustentabilidade; Análise multivariada.

1.1 Introdução

Embora a cultura da noqueira-pecã (*Carya illinoensis*) tenha sido implementada no Brasil há mais de 50 anos, somente nos últimos anos têm sido explorada a sua capacidade produtiva, sendo estimulada pela alta demanda no mercado e sua valorização em aspectos de saúde, devido suas propriedades benéficas para os humanos (Ribeiro *et al.*, 2020; Poletto *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2021). Sua expansão se deu principalmente nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina devido suas condições favoráveis para o desenvolvimento da planta (Benati *et al.*, 2021; Siebeneichler *et al.*, 2024). Em 2023 o Rio Grande do Sul foi responsável por 61,5% da produção brasileira de nozes (IBGE, 2023).

Ainda que o interesse de pesquisas envolvendo a noqueira-pecã tenha aumentado, há uma carência de estudos que abordam aspectos de qualidade do solo para esta cultura na região Sul. O estudo de Benati *et al.* (2021) avaliou a fertilidade do solo no RS e SC, acerca das principais limitações químicas e os aspectos que carecem de maior atenção no manejo da calagem e adubação. Demais estudos sobre a noqueira-pecã no Estado abordam aspectos sobre a qualidade das nozes, como a de Poletto *et al.*, (2020) que fizeram uma análise morfológica, química e genética da noz-pecã do sul do Brasil, avaliando a diversidade fenotípica existente na região, até o momento não explorada. Similarmente Ribeiro *et al.* (2020) avaliaram a composição química, caracterização lipídica, composição volátil e estabilidade oxidativa das nozes do RS com intuito de fornecer informações sobre o perfil volátil que caracteriza diferentes cultivares de nozes-pecã cruas. Por outro lado, Siebeneichler *et al.* (2024), avaliaram a influência da cultivar nos parâmetros de qualidade de nozes-pecã produzidas no Sul do Brasil.

As ações humanas influenciam significativamente os processos que ocorrem no solo, principalmente onde o solo é utilizado para a produção agrícola. No entanto, as características do solo refletem tanto os fatores naturais de formação e clima, quanto às atividades humanas, o que exige estudos e abordagens multivariáveis para compreender a relação entre diferentes atributos do solo.

A qualidade do solo é amplamente definida como “a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra para

sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal” (Doran; Parkin, 2015). Dessa forma, um solo de qualidade abrange tanto a sua capacidade de sustentar o crescimento de plantas quanto seu papel no equilíbrio ecológico.

As propriedades microbiológicas do solo, apesar de serem tão importantes quanto as químicas e físicas, costumam não serem incluídas nas avaliações de rotina de qualidade do solo (Mendes *et al.*, 2019b). A atividade geral dos microrganismos pode ser estimada pela respiração basal (Silva, Azevedo e De-Polli, 2007a). As enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, que participam do ciclo do carbono e do enxofre, respectivamente, atuam na despolimerização de compostos orgânicos (Bastos *et al.*, 2023; Kunito *et al.*, 2022; Tabatabai, 1994). Além disso, a biomassa microbiana funciona como uma reserva dinâmica de nutrientes, contribuindo para o fornecimento e armazenamento de elementos por meio dos processos de imobilização e mineralização (Mganga *et al.*, 2024).

A resposta rápida das populações microbianas do solo às mudanças nas propriedades do solo e no uso da terra, por exemplo, pressionou a comunidade científica a concentrar-se na biomassa e na atividade microbiana como indicadores precisos e sensíveis da aptidão do solo para desempenhar funções ecológicas. Neste sentido, vários estudos utilizaram indicadores biológicos, bem como, os quocientes para avaliar a qualidade do solo, como o quociente metabólico (qCO_2), quociente microbiano ($qMic$) e o quociente de mineralização (qM) que refletem a eficiência dos microrganismos no ciclo dos nutrientes (Antisari *et al.*, 2021; Rocha *et al.*, 2022; Bastos *et al.*, 2023; Costa *et al.*, 2024; Mganga *et al.*, 2024).

Embora a cultura da noqueira-pecã já esteja consolidada no Estado, o cultivo dessa espécie é realizado sob diferentes sistemas de manejo do solo, muitas vezes adaptadas à aparente necessidade do pomar. No entanto, essas práticas nem sempre atendem às reais necessidades da planta, considerando o papel importante que um solo de qualidade desempenha no seu desenvolvimento e nutrição. Dessa forma, torna-se essencial avaliar de forma integrada os atributos do solo, incluindo os atributos microbiológicos, auxiliando na definição do manejo mais adequado, capazes de promover a qualidade do solo e criar condições ideais para o desenvolvimento da cultura.

Assim, o estudo objetivou avaliar a relação entre os atributos químicos, físicos e microbiológicos do solo, bem como, os quocientes metabólicos, microbianos e de mineralização do solo em pomares de nogueira-pecã no Estado do Rio Grande do Sul sob diferentes sistemas de manejo.

2 Material e métodos

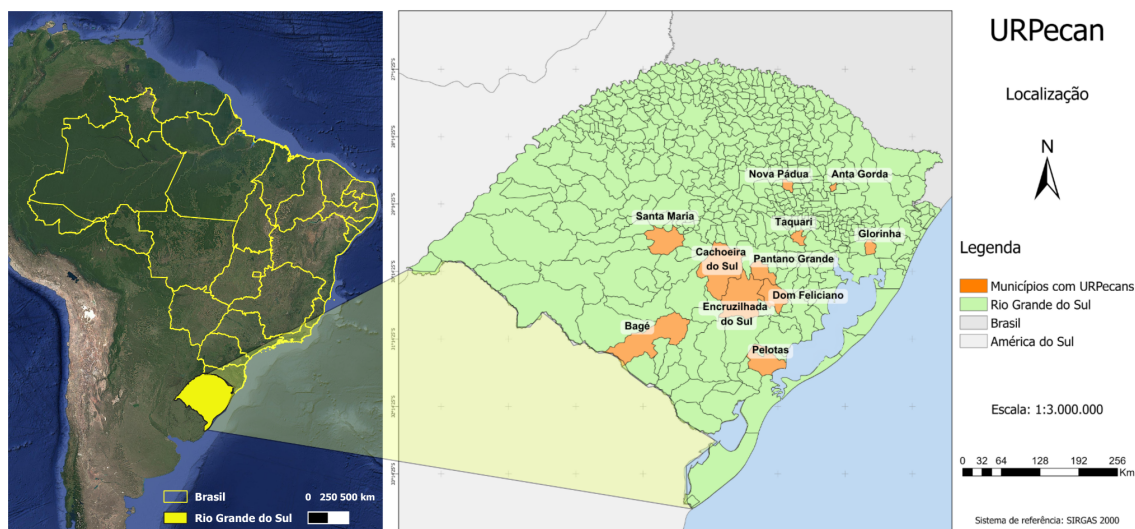
2.1 Áreas de estudo

O estudo foi realizado em 15 pomares de nogueira-pecã localizados em 11 municípios do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), sendo eles: Anta Gorda; Bagé, Cachoeira do Sul, Dom Feliciano; Encruzilhada do Sul; Glorinha; Nova Pádua; Pântano Grande; Pelotas; Santa Maria e Taquari. De acordo com a classificação Köppen, o clima do RS é temperado do tipo subtropical, classificado como Mesotérmico Úmido. As temperaturas apresentam grande variação sazonal, com verões quentes e invernos bastante rigorosos, com a ocorrência de geadas e precipitação eventual de neve. As temperaturas médias variam entre 15° e 18°C, com mínimas de até -10°C e máximas de 40°C. O RS apresenta uma distribuição de precipitação relativamente equilibrada das chuvas ao longo de todo o ano, em decorrência das massas de ar oceânicas que penetram no Estado (Wollmann; Galvani, 2012). O volume de chuvas, no entanto, é diferenciado. Ao sul a precipitação média anual situa-se entre 1.300mm e 1.500mm e, ao norte a média fica entre 1.500mm e 1.900mm, com maior intensidade de chuvas registradas a norte e nordeste do Estado, especialmente na encosta do Planalto (Alvares *et al.*, 2013).

Os pomares foram selecionados com o intuito de representar os diferentes sistemas de manejo no cultivo de nogueira-pecã e são Unidades de Referência Produtiva de noz-pecã (URPecan) no Rio Grande do Sul, com apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e do Instituto Brasileiro de Pecanicultura (IBPecan). Os locais de avaliação foram selecionados considerando a representatividade de cada pomar, no entanto, manteve-se um padrão de uma cultivar que se apresentava em todas propriedades estudadas. Sendo assim, foi analisado o solo somente no talhão com a cultivar Barton. Foi realizado um levantamento de informações do

manejo do solo de cada pomar, de modo a caracterizar cada área de acordo com as práticas adotadas.

Figura 1 - Mapa do Brasil, destacando-se o Estado do Rio Grande do Sul com a localização dos onze municípios com URPecans, onde quinze pomares foram distribuídos e avaliados



Fonte: Autora. QGIS 3.34.11

2.2 Amostragem e análise de solo

A amostragem de solo foi realizada de novembro de 2023 a julho de 2024. As amostras de solo foram coletadas nas linhas de plantio, sob a projeção da copa das árvores na camada superficial do solo (0-10 cm de profundidade). Foram obtidas quatro amostras simples de solo distribuídas no talhão representativo de cada pomar.

As amostras de solo para determinação das enzimas β -glicosidase (BETA), Arilsulfatase (ARIL) e Carbono Orgânico do Solo (COT) foram preparadas de acordo com Mendes *et al.* (2019a), secando-as ao ar em temperatura ambiente por pelo menos duas semanas. Após a secagem, as amostras foram peneiradas na malha de 2 mm. A determinação das enzimas foi realizada conforme Tabatabai (1994) com base na determinação colorimétrica do p-nitrofenol liberado pelas enzimas quando o solo foi incubado com uma solução tamponada de substratos específicos para cada enzima. Duas réplicas analíticas e mais o controle foram usadas para cada amostra. Os valores das atividades enzimáticas foram expressos em μg de p-nitrofenol $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$. A determinação do COT foi realizada conforme método de combustão

descrito por Walkley e Black (1934). O teor de carbono orgânico do solo foi expresso em $g\ kg^{-1}$.

A Respiração Basal do solo (RB) foi determinada com a soma de todas as funções metabólicas nas quais o CO_2 é emitido como resultado da degradação da matéria orgânica, metodologia adaptada de Silva, Azevedo e De-Polli, (2007a). O Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) procedeu-se como descrito por Silva, Azevedo e De-Polli, (2007b). Em associação entre as duas análises obteve-se o quociente metabólico (qCO_2), com a relação entre a RB por unidade de CBM e tempo, de acordo com Silva, Azevedo e De-Polli (2007a). Fórmula para o cálculo do quociente metabólico:

$$(1) qCO_2 (mg\ C - CO_2\ g^{-1}\ C - CBM\ h^{-1}) = \frac{RB\ (mg\ C-CO_2\ kg^{-1}\ solo\ h^{-1})}{CBM\ (mg\ C-CO_2\ kg^{-1}\ solo) \times 10^{-3}}$$

O quociente de mineralização (qM) é determinado a partir da fração do carbono orgânico total mineralizado ao longo do tempo de incubação (30 dias) (Pinzari *et al.*, 1999). Fórmula para o cálculo do quociente de mineralização:

$$(2) \quad qM(\%) = \left(\frac{RB\ acumulada\ (mg\ C-CO_2\ kg^{-1}\ solo)}{COT\ (mg\ kg^{-1}\ solo)} \right) \times 100$$

Com a relação entre o Carbono Orgânico Total por unidade de Carbono da Biomassa Microbiana obteve-se o quociente microbiano ($qMIC$). Fórmula para o cálculo do quociente microbiano:

$$(3) \quad qMIC(\%) = \left(\frac{\frac{CBM\ (mg\ C\ microbiano\ kg^{-1}\ solo)}{COT\ (g\ kg^{-1}\ solo)} \times 1000}{COT\ (g\ kg^{-1}\ solo)} \right) \times 100$$

A análise granulométrica do solo foi realizada conforme descrito por Teixeira *et al.* (2017). Já as análises químicas do solo foram realizadas conforme Tedesco *et al.* (1995).

Os dados das análises químicas, granulométricas e a atividade das enzimas BETA e ARIL são apresentados nos Anexos 1 e 2.

2.3 Levantamento de informações do manejo adotado nos pomares

Os pomares apresentaram variações em suas características incluindo tempo de implementação, solo, relevo, manejo, entre outras. Dessa forma, foi realizado um levantamento de informações sobre o manejo do solo de cada

pomar, de modo a caracterizar cada área de acordo com as práticas adotadas desde a implantação até o momento da amostragem (Quadro 1).

Essas informações são fundamentais, pois permitem compreender de maneira abrangente a interação dos indicadores da qualidade do solo no ambiente e o impacto de uma determinada prática de manejo na qualidade do solo. Além disso, essas informações elucidam com maior clareza as boas práticas de manejo que resultam em benefícios, possibilitando que os agricultores as implementem eficazmente em suas culturas de noz-pecã. Desta forma, o conhecimento gerado contribui não apenas para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, mas também para o aumento da produtividade e a satisfação dos agricultores.

Quadro 1- Informações do manejo adotado nos pomares de nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul - RS

Localização	Características gerais dos pomares
Anta Gorda	Pomar foi implantado a 14 anos (2010) com plantas espaçadas de 10 x 12m em uma área de 15 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas são em superfície e se utilizam defensivos químicos para controle de pragas e doenças. Como cobertura de solo, predominam gramíneas espontâneas perenes que são pastejadas por ovelhas até no máximo 60 dias antes da colheita. O pomar é irrigado.
Bagé	Pomar foi implantado a 1 ano (2023) com plantas espaçadas de 9 x 12m em uma área de 70 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na linha de plantio, por ocasião da implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas foram sempre na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas na linha de plantio é realizado com herbicidas, já nas entrelinhas utiliza-se roçadeira. Observou-se capim annoni e plantas espontâneas nas entrelinhas de plantio. Adota-se o uso de palha no coroamento das plantas. O pomar não é irrigado nem pastejado por animais.
Cachoeira do Sul	Pomar foi implantado a 13 anos (2011) com plantas espaçadas de 8,5 x 8,5m em uma área de 120 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. O pomar também recebe adubações químicas e orgânicas em toda a sua área. O controle de plantas espontâneas é realizado com o uso de herbicidas e roçadas. Como cobertura de solo utiliza-se as culturas da aveia, azevém, ervilhaca e nabo. Nos primeiros anos após a implantação do pomar criou-se ovelhas que pastejavam na copa e nas entrelinhas das plantas. Uma parte do pomar recebe irrigação (Cachoeira do Sul 1) e a outra parte não (Cachoeira do Sul 2).
Dom Feliciano	Pomar foi implantado a 6 anos (2018) com plantas espaçadas de 10 x 10m em uma área de 38 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas são na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas na linha de plantio é realizado com herbicidas, já nas entrelinhas utiliza-se roçadeira. Observou-se grande infestação de capim annoni em todo pomar. O pomar não é irrigado nem pastejado por animais.
Encruzilhada do Sul	Pomar foi implantado a 8 anos (2016) com plantas espaçadas de 8,5 x 8,5m em uma área de 150 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas são na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas na linha de plantio é realizado com herbicidas, já nas entrelinhas utiliza-se roçadeira. Como cobertura de solo utiliza-se plantas de inverno associadas a plantas espontâneas nativas do local. Uma parte do pomar recebe irrigação (Encruzilhada do Sul 1) e a outra parte não (Encruzilhada do Sul 2). O pomar é pastejado por bovinos e ovinos.
Glorinha	Pomar implantado a 8 anos (2016) com plantas espaçadas de 9 x 12m em uma área de 35 hectares. A acidez do solo foi corrigida de forma deficitária com calcário apenas na implantação do pomar. Utiliza-se adubações orgânicas com cama de aviário em todo pomar. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira. A cobertura de solo predominante no inverno e no verão são as gramíneas espontâneas nativas do local. O pomar não é irrigado nem pastejado por animais.

Nova Pádua	Pomar foi implantado a 13 anos (2011) com plantas espaçadas de 7 x 7m em uma área de 5 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas são na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira. A cobertura de solo predominante são as plantas espontâneas nativas do local associadas ao azevém. O pomar é pastejado por ovinos mas não é irrigado.
Pântano Grande	Pomar foi implantado a 13 anos (2011) com plantas espaçadas de 7 x 8m em uma área de 60 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utiliza-se adubações químicas e orgânicas em todo pomar. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira e esporadicamente herbicida na linha de plantio. Utiliza-se plantas de cobertura de solo no inverno. O pomar não é pastejado por animais, porém é irrigado.
Pelotas “1”	Pomar foi implantado a 6 anos (2018) com plantas espaçadas de 10 x 10 m em uma área de 1,5 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utiliza-se adubações orgânicas (cama de aviário) na copa das plantas. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira, capina e uso de palha na copa das plantas. Utiliza-se plantas de cobertura de solo no inverno e no verão. O pomar não é pastejado por animais e não é irrigado.
Pelotas “2”	Pomar foi implantado a 11 anos (2013) dentro de um sistema agroflorestal (SAF) com plantas espaçadas de 10 x 10 m em uma área de 0,36 hectares. Não foi realizada a correção da acidez do solo e nem o uso de adubos químicos e orgânicos na implantação do SAF. O controle de plantas espontâneas foi realizado apenas na entrelinha quando a área foi preparada para a instalação de um experimento com feijão e milho. O pomar não é pastejado por animais e nem irrigado.
Santa Maria “1”	Pomar foi implantado a 13 anos (2011) com plantas espaçadas de 8,5 x 8,5 m em uma área de 12 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utiliza-se adubações químicas e orgânicas na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira. Utiliza-se plantas de cobertura de solo no inverno. O pomar é pastejado por ovinos e é irrigado.
Santa Maria “2”	Pomar foi implantado a 12 anos (2012) com plantas espaçadas de 7 x 7 m em uma área de 115 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utiliza-se adubações químicas e orgânicas em toda área do pomar. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira. Utiliza-se plantas de cobertura de solo no inverno. O pomar não é pastejado por animais, porém é irrigado.
Taquari	Pomar foi implantado a 52 anos (1972) com plantas espaçadas de 10 x 10 m em uma área de 38 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utilizou-se recentemente adubações químicas e orgânicas em toda área do pomar. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira na entrelinha e herbicida na linha de plantio. A cobertura de solo predominante no inverno e no verão são as gramíneas espontâneas nativas do local. O pomar não é pastejado por animais, porém é irrigado.

Fonte: Autora.

2.4 Análises estatísticas

O conjunto de dados ambientais (atributos químicos do solo, granulometria do solo e indicadores biológicos no solo) foi organizado em uma matriz com colunas (variáveis) versus linhas (pomares). Previamente, foram avaliados os requisitos para aplicação de análises paramétricas (normalidade e homocedasticidade) sobre esse conjunto de dados. Em função das diferenças de escala entre cada variável, mencionada anteriormente, a matriz de dados foi padronizada para valores z, obtidos pelo cálculo de cada estimativa subtraída pela média amostral, dividida após pelo desvio-padrão amostral. Essa matriz de dados padronizados foi avaliada com o uso de técnicas multivariadas. Buscando-se a redução de dimensionalidade das 17 variáveis explicativas para apenas duas dimensões (eixos), aplicou-se uma análise de componentes principais (PCA); e para ver a relação entre o subconjunto de variáveis respostas (indicadores biológicos no solo) e o subconjunto de variáveis explicativas (elementos químicos do solo e granulometria do solo), aplicou-se uma análise de redundância (RDA) que é equivalente a uma análises de regressão múltipla (Ayres *et al.*, 2007; Gauch, 1982; McGarigal *et al.*, 2000). Com os resultados da PCA, buscou-se indicar a significância relativa das variáveis explicativas, o que permite uma interpretação sobre qual variável ou quais variáveis foram mais importantes para a variabilidade dos dados analisados. E com a RDA, buscou-se relacionar a influência da variável ou variáveis explicativas para os indicadores biológicos no solo. Para as análises estatísticas foi utilizado o software Past 4.03.

3 Resultados e Discussão

3.1 Variabilidade ambiental e efeitos do manejo sobre os indicadores biológicos do solo

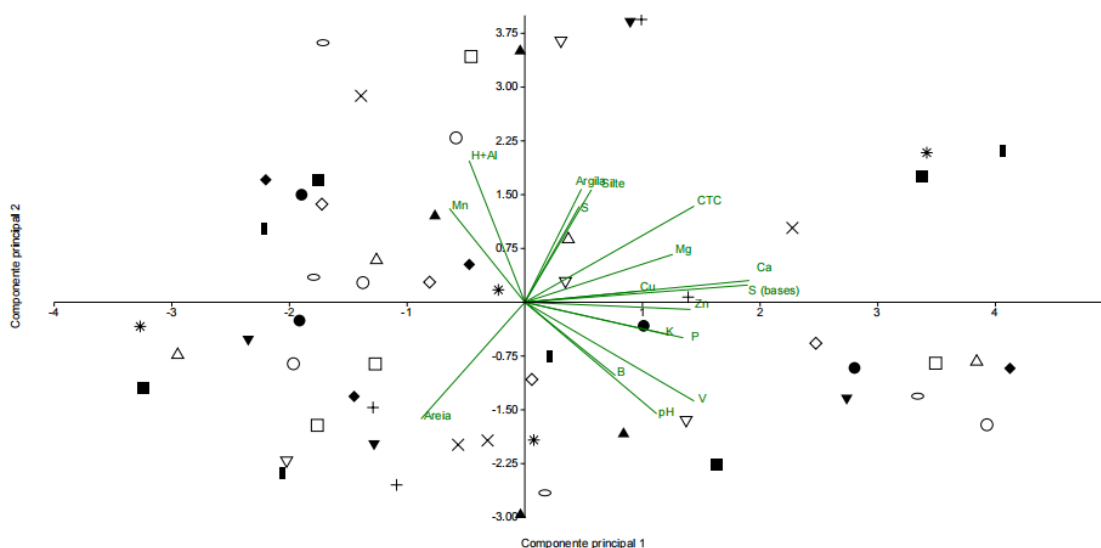
Os dois componentes principais explicaram 59% da variação dos dados físicos e químicos, mensurados em todos os pomares (Figura 2). Dessa forma, pareceu consistente que o tipo de manejo realizado, como correção do pH e aplicação de minerais alcalinos, foi preponderante para o comportamento das variáveis. A maioria dessas variáveis mensuradas apresentou correlações positivas para o primeiro componente principal (eixo 1), sendo que a

concentração de cálcio (0,9) e os índices relacionados com o nível alcalino do solo (CTC e $V = 0,7$, $S \text{ (bases)} = 0,9$) foram os mais importantes (Figura 3). Para o segundo componente principal (eixo 2), a granulometria do solo apresentou as maiores correlações: silte e argila, os mais finos, com correlações positivas ($\sim 0,70$) e areia, distintamente, com correlação negativa ($-0,72$). Outra variável importante para o percentual de explicação do eixo 2 foi a concentração $H+Al$ (0,90).

A textura do solo é algo que segundo Colunga *et al.* (2025) influencia diretamente na sua capacidade de retenção de água, na disponibilidade de nutrientes e no desenvolvimento radicular das plantas, tornando-se portanto uma variável essencial na PCA. Solos mais finos, com alta concentração de silte e argila, tendem a reter mais água e nutrientes, enquanto solos arenosos apresentam maior drenagem e menor retenção hídrica. Além disso, a argila devido a sua estrutura química e alta CTC, favorece a retenção de nutrientes, e os solos arenosos possuem baixa CTC facilitando a lixiviação desses nutrientes (Zhao e Naeth, 2024). A areia apresenta uma relação inversa com as demais variáveis que compõem esse eixo, indicando que pomares com maior proporção de areia tendem a ter mais características diferentes dos pomares com maior teor de silte e argila.

A PCA revelou uma separação entre as 60 amostras, que ficaram bem distribuídas no plano bidimensional (Figura 2). Essa separação sugere diferenças significativas entre as amostras, especialmente em relação às características representadas pelas variáveis que têm maior contribuição nos componentes principais. Indicando que as diferenças entre as amostras estão principalmente associadas ao manejo de correção de pH do solo e granulometria. Esse comportamento pode ser interpretado pela diferença de cada ponto amostral dentro de cada pomar, que representa a variabilidade do manejo de correção do pH dentro do mesmo pomar como também a variação de declividade e demais fatores que influenciam na variação da granulometria. Dessa forma, reforçando a importância dessas variáveis na distinção entre as amostras.

Figura 2 - Diagrama de ordenação resultante da análise de componentes principais (PCA)



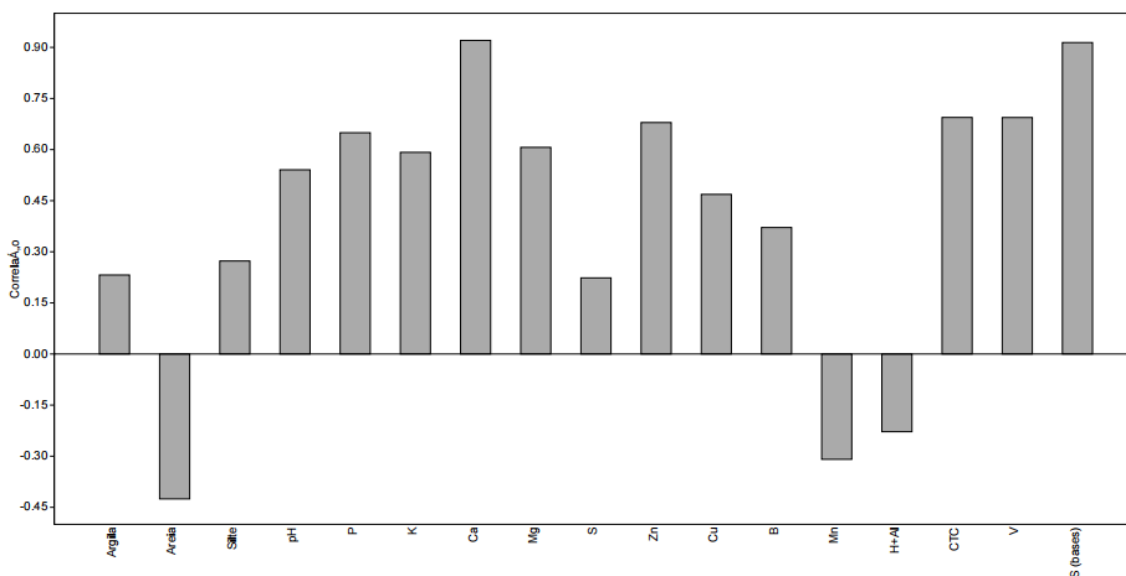
Fonte: Autora. Biplot dos dois primeiros componentes (1 e 2) resultantes da PCA aplicada a matriz de 60 amostras de solo. ● = Anta Gorda; + = Bagé; ◐ = Cachoeira do Sul 1; ○ = Cachoeira do Sul 2; □ = Dom Feliciano; ▲ = Encruzilhada do Sul 1; ▼ = Encruzilhada do Sul 2; ◑ = Glorinha; ◐ = Nova Pádua; ■ = Pantano Grande; X = Pelotas 1; * = Pelotas 2; △ = Santa Maria 1; ▣ = Santa Maria 2; ▽ = Taquari. Composta pelas variáveis: areia, silte argila, pH, H+Al, soma de bases (S bases), saturação por bases (V%), CTC, e conteúdos de P, K Ca, Mg, S, Zn, Cu, B, Mn.

As variáveis que apresentaram correlações positivas com o primeiro componente principal destacam-se aquelas associadas à fertilidade do solo, evidenciando sua influência na qualidade do solo nos pomares de nogueira-pecã (Figura 3). O cálcio (Ca) segundo Benati *et al.* (2021), é essencial para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e contribui significativamente para a fertilidade do solo. No estudo, Benati *et al.* (2021) encontraram valores críticos de cálcio, associados à baixa aplicação de calcário, observados em diversas camadas do solo nos pomares analisados. Resultado este, que está relacionado à aplicação superficial do calcário que é feita geralmente na implantação do pomar. Isso corrobora com o resultado da PCA, onde a alta correlação positiva com Ca com o primeiro componente principal reflete a relevância do Ca para os pomares de nogueira-pecã. Além disso, Casagrande *et al.* (2023) enfatiza a importância de manter valores adequados de saturação por bases e pH (entre 6 e 6,5) em solos de

nogueira-pecã, pois baixos valores de pH resultam em alta concentração de alumínio tóxico (Al), o que prejudica o crescimento radicular.

A CTC também correlacionada positivamente com o primeiro componente, tem um forte impacto na qualidade do solo, ele reflete a capacidade do solo de reter e trocar nutrientes essenciais. Solos com alta CTC geralmente possuem maior fertilidade, pois conseguem armazenar cátions como cálcio, magnésio e potássio, que são cruciais para o crescimento das plantas. Já a soma de Bases (S) e saturação de bases (V%), indicam a proporção de cátions básicos em relação a CTC total. Altos valores de S e V% estão associados a solos menos ácidos e mais férteis, o que favorece o desenvolvimento das raízes e a absorção de nutrientes.

Figura 3 - Nível de correlação de cada variável explicativa para o componente principal 1

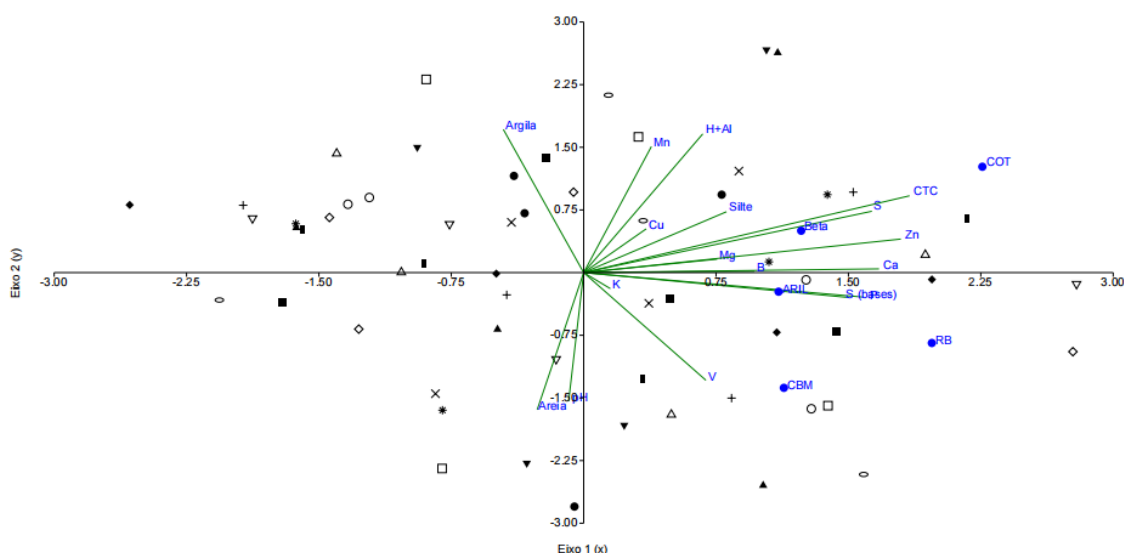


Fonte: Autora. Correlação das variáveis do primeiro componente resultante da PCA. Composta pelas variáveis: areia, silte argila, pH, H+Al, soma de bases (S bases), saturação por bases (V%), CTC, e conteúdos de P, K Ca, Mg, S, Zn, Cu, B, Mn.

Como um resultado complementar, verificou-se a relação dessa matriz de variáveis físicas e químicas com o nível de resposta dos indicadores biológicos do solo (Figura 4). Os dois eixos principais obtidos via uma RDA mostraram uma correlação acumulada de 38% entre a matriz de variáveis físicas e químicas com a matriz de indicadores biológicos do solo. Essa associação obtida por esse modelo foi considerada significativa ($R^2 = 0,49$; $p = 0,001$). Dessa forma, esse resultado sugere que as variáveis físicas e químicas

desempenham um papel importante na explicação das respostas dos indicadores biológicos do solo. Todos os indicadores biológicos apresentaram correlação positiva com o primeiro eixo, particularmente COT (65%) e RB (56%) (Figura 4), coincidindo com o comportamento positivo da maioria das variáveis químicas (indicadores de solos corrigidos por minerais alcalinos) com esse mesmo primeiro eixo. Por exemplo, CTC se associou positivamente com o primeiro eixo com correlação igual a 62%. Para o segundo eixo, a granulometria do solo (areia com correlação de 57%), teor de Mn (50%) e H+Al (55%) foram as variáveis mais importantes (Figura 4).

Figura 4 - Diagrama de ordenação resultante da análise de redundância (RDA)



Fonte: Autora. Biplot da RDA com as variáveis explicativas: areia, silte argila, pH, H+Al, soma de bases (S bases), saturação por bases (V%), CTC, e conteúdos de P, K Ca, Mg, S, Zn, Cu, B, Mn. E variáveis resposta: carbono orgânico total (COT), carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal (RB), β -glicosidase (BETA), arilsulfatase (ARIL). ● = Anta Gorda; + = Bagé; ◊ = Cachoeira do Sul 1; ○ = Cachoeira do Sul 2; □ = Dom Feliciano; ▲ = Encruzilhada do Sul 1; ▼ = Encruzilhada do Sul 2; ○ = Glorinha; ◆ = Nova Pádua; ■ = Pantano Grande; X = Pelotas 1; * = Pelotas 2; △ = Santa Maria 1; ▬ = Santa Maria 2; ▽ = Taquari.

O comportamento positivo de indicadores como COT e a RB com o primeiro eixo reflete a importância que a matéria orgânica e a atividade microbiana têm na qualidade do solo. Esses indicadores estão relacionados a processos essenciais, como a ciclagem de nutrientes e à estabilidade estrutural do solo. Contudo, o trabalho de Costa *et al.* (2024) ao avaliar os manejos de solo em dois sistemas diferentes, plantio direto e integração lavoura-pecuária,

apontou que as variáveis COT e RB não tiveram uma influência significativa na interpretação das variações observadas nos dados. Em vez disso, variáveis como CBM e atividade enzimática destacaram-se como indicadores mais relevantes nesta avaliação. Isso sugere que, dependendo do contexto de estudo, outros indicadores podem oferecer maior precisão na avaliação da qualidade do solo.

A RDA é considerada uma ferramenta capaz de explorar relações entre os conjuntos de variáveis, e bastante utilizada nos estudos de qualidade do solo utilizando variáveis físicas, químicas e biológicas do solo (Costa *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2024; Ishaq *et al.*, 2025; Sui *et al.*, 2025). Segundo Braak (1995), o comprimento do vetor associado a cada variável é proporcional à sua importância para a interpretação da análise, quanto maior o vetor, mais forte a correlação. Vetores apontando na mesma direção indicam uma correlação positiva entre as variáveis, o oposto uma correlação negativa. Vetores ortogonais indicam uma baixa correlação ou ausência de correlação entre as variáveis. Neste sentido, pode-se observar que a maioria dos macro e micronutrientes se correlacionaram positivamente com o COT e BETA, inclusive a variável CTC (Figura 4). Isso sugere que solos com maior teor de matéria orgânica apresentam maior fertilidade.

O COT reflete a quantidade de matéria orgânica presente no solo, sendo uma fonte de nutrientes essenciais, já a BETA atua na degradação de polissacarídeos complexos presentes na matéria orgânica, como a celulose, que libera energia para o crescimento microbiano (Tabatabai, 1994). Essa interação promove a liberação gradual de nutrientes, aumentando sua disponibilidade para as plantas. Além disso, a matéria orgânica contribui para a CTC, pois os compostos orgânicos possuem cargas negativas que ajudam a reter cátions como o Ca, Mg e K, evitando sua lixiviação (Martins, 2018). Assim, solos com altos níveis de COT e atividade enzimática apresentam maior capacidade de armazenar e disponibilizar nutrientes.

Segundo Lemanowics *et al.* (2023), concentrações elevadas de carbono orgânico no solo podem disponibilizar substratos adequados para influenciar a biomassa microbiana, promovendo, conseqüentemente, o aumento na produção de enzimas. Neste sentido, a menor perturbação do solo em sistemas de culturas perenes como o caso da nogueira-pecã, favorece o

crescimento microbiano, pois não há revolvimento do solo que causaria danos às células microbianas. Dessa forma, possibilita a mineralização mais lenta da MO e maiores teores de biomassa microbiana, que regulam a ciclagem dos nutrientes e a manutenção da fertilidade do solo (Bastos *et al.*, 2023; Costa *et al.*, 2024).

Esses resultados corroboram com os observados por Novak *et al.* (2021), ele explica que estes achados demonstram a dinâmica natural do solo, indicando que o conteúdo dos cátions básicos e a reatividade da CTC estão relacionados com o conteúdo de matéria orgânica. Segundo os autores, essa relação é ainda mais dependente da matéria orgânica em solos mais arenosos. Assim também evidenciado neste estudo, pela correlação negativa da areia com as demais variáveis biológicas, possivelmente reflexo do fato de que a maioria das propriedades analisadas apresenta solos bastante arenosos.

Semelhante a PCA, observou-se a dispersão dos pontos amostrais no plano, sem evidenciar uma relação direta com as variáveis (Figura 4). Esperava-se identificar uma conexão clara entre as variáveis e o conjunto de amostras de cada pomar, que possibilitasse avaliar as interações das variáveis diante de um determinado manejo adotado. Essa dispersão pode indicar que os manejos adotados nos diferentes pomares não têm um impacto uniforme sobre as características físicas, químicas e biológicas do solo, ou que os fatores analisados não foram suficientes para capturar as interações esperadas de forma clara. Além disso, os resultados evidenciam que as práticas de manejo dentro do pomar são desuniformes, o que pode gerar desequilíbrios na qualidade geral do solo e comprometer a produtividade do pomar.

3.2 Indicadores biológicos e quocientes metabólicos, microbianos e de mineralização de solos em pomares de noqueira-pecã no Estado do Rio Grande do Sul sob diferentes sistemas de manejo

O teor de COT observado no solo dos pomares avaliados variou entre 9,14 (Dom Feliciano) a 24,81 g kg⁻¹ (Anta Gorda) com média de 16,76 g kg⁻¹ (Tabela 1). O baixo teor de COT do pomar Dom Feliciano pode ser atribuído ao tipo de solo, classificado como Neossolo Litólico com textura Franco arenosa e, ao manejo do solo, caracterizado pelo uso de práticas não conservacionistas. Neste mesmo pomar, observou-se uma grande infestação de capim annoni

(*Eragrostis plana*), o que segundo Guido *et al.* (2019) pode indicar solos ácidos, compactados e com baixa fertilidade. Por outro lado, o alto teor de COT no solo do pomar Anta Gorda deve estar relacionado a uma combinação de fatores, incluindo o tipo de solo (Chernossolo argilúvico de textura argila), o predomínio de plantas de cobertura sobre o solo, o pastejo de animais no pomar, o uso de irrigação, adubações minerais e orgânicas. De modo geral, as práticas conservacionistas criam um ambiente favorável ao acúmulo de carbono no solo, contribuindo para a sua fertilidade, a retenção de água e a mitigação das mudanças climáticas (Delgado *et al.*, 2011).

Em relação a CBM, destacam-se os pomares Nova Pádua e Glorinha, com médias de 884,46 e 914,09 mg C microbiano kg⁻¹ solo, respectivamente. Os maiores teores de CBM nesses pomares, podem ser explicados por dois fatores: 1) Nova Pádua é um pomar que recebe adubações químicas e orgânicas na linha de plantio e, Glorinha recebe adubações orgânicas em toda área do pomar; 2) São pomares onde a cobertura vegetal predominante, tanto no inverno como no verão, contempla diversas espécies de gramíneas espontâneas nativas da região. Nesse sentido, avaliando o efeito de sistemas orgânicos e convencionais utilizados para o cultivo de noqueira-pecã sobre a diversidade microbiana do solo, Cabrera-Rodrigues *et al.* (2020) demonstraram que o conteúdo de CBM em solos cultivados com essa noqueira-pecã aumenta a partir do estabelecimento da cobertura vegetal de longo prazo. Na outra ponta da tabela, os baixos teores de CBM nos pomares Dom Feliciano (307,20 mg C microbiano kg⁻¹ solo) e Pantano Grande (396,86 mg C microbiano kg⁻¹ solo), são diretamente relacionados com os menores valores de COT (9,14 e 10,99 g kg⁻¹ respectivamente). Além disso, são pomares instalados em solos bastante arenosos (76,2% e 62,9% de areia), ou seja, solos que tendem a apresentar maior perda de C, o que foi explicado por Lal *et al.* (2007) em função da maior tendência à lixiviação, menor agregação das partículas do solo e baixa atividade das argilas.

Os maiores valores de RB foram observados nos pomares Anta Gorda e Nova Pádua (1,07 e 1,01 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹, respectivamente). O aumento da RB pode ser um dos primeiros indicadores de estresse microbiano causado por distúrbios no solo, isso resulta na perda de carbono na forma de CO₂, pois a energia que seria utilizada para o crescimento e a reprodução é

redirecionada para a manutenção celular (Kolln *et al.*, 2023). Os maiores valores de RB nesses pomares, podem estar relacionados às altas quantidades de biomassa microbiana e maior atividade metabólica no solo. A maior RB sugere uma ciclagem mais ativa de nutrientes no solo, favorecida pela diversidade de plantas que contribuem com diferentes tipos de resíduos orgânicos e exsudatos radiculares.

Os valores de qCO_2 encontrados neste estudo podem ser considerados baixos, não apresentando resultados que demonstram sinal de estresse ou intensa atividade metabólica (Ashraf; Waqas; Rahman, 2022). Porém, há diferenças entre os pomares, com o maior valor no pomar de Anta Gorda ($1,56 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C-CBM h}^{-1}$) sugerindo que, apesar de RB ser maior e a biomassa microbiana ser elevada, a microbiota do solo está utilizando mais carbono para sua manutenção. Este resultado pode ser atribuído ao manejo do solo, onde a fonte de MO é oriunda dos dejetos dos animais e pela cobertura do solo com gramíneas perenes que é pastejada. Diante disso, os microrganismos estão "gastando" mais carbono, desviando sua energia do crescimento para manutenção celular, para manter suas funções metabólicas, que resulta no qCO_2 mais alto indicando que o sistema ainda está em processo de estabilização ou que as condições no solo são mais dinâmicas (Ashraf, Waqas; Rahman, 2022; Spohn; Chodak, 2015). No pomar Dom Feliciano, o qCO_2 mais baixo ($0,44 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C-CBM h}^{-1}$) indica maior eficiência no uso do carbono pela microbiota, com menos carbono sendo gasto para a respiração relativa à biomassa microbiana (Ashraf; Waqas; Rahman, 2022). Embora isso possa parecer positivo em termos de eficiência metabólica, também pode ser um sinal de menor dinamismo no solo, o que pode limitar a capacidade do sistema de responder a estresses ambientais ou à necessidade de ciclar nutrientes.

O maior percentual de $qMIC$ no pomar de Nova Pádua (4,62%) indica que o carbono presente no solo não é apenas armazenado, mas ativamente utilizado pelos microrganismos, o que resulta em uma dinâmica mais sustentável e resiliente a longo prazo. Isso é crucial para a manutenção da fertilidade do solo, redução da dependência de insumos externos e aumento da capacidade de sequestro de carbono, aspectos essenciais para a mitigação das mudanças climáticas (Torralba *et al.*, 2016).

A ausência de valores de referência para o quociente de mineralização (qM) deve-se à sua sensibilidade a variações ambientais, tipos de solo e práticas de manejo. Ele reflete a atividade biológica específica de cada solo, sendo útil para comparações relativas dentro de um ambiente. Neste sentido, ao compararmos os resultados de qM de pomares instalados na mesma região e no mesmo tipo de solo (Ex. Pelotas 1 e 2; Cachoeira do Sul 1 e 2; Encruzilhada do Sul 1 e 2) podemos observar que, o qM de Pelotas 2 > Pelotas 1; o qM de Cachoeira do Sul 2 > Cachoeira do Sul 1 e o qM de Encruzilhada do Sul 1 > Encruzilhada do Sul 2. Essas diferenças podem ser atribuídas a fatores como a diversidade de manejo entre cada sistema, ou seja, o pomar Pelotas 2, apresenta maior biodiversidade em função da combinação de diferentes espécies de plantas, que resulta em uma maior diversidade de resíduos orgânicos no solo (Bilharva *et al.*, 2021), fornecendo uma fonte contínua de nutrientes para os microrganismos do solo e promovendo uma atividade microbiana mais intensa e eficiente. O pomar Cachoeira do Sul 2, mesmo não sendo irrigado, localizava-se em uma área mais baixa em relação ao pomar Cachoeira do Sul 1, ou seja, uma área de maior acúmulo de resíduos. Já o pomar Encruzilhada do Sul 1, por ser irrigado, é capaz de criar condições mais favoráveis para a vida no solo em relação pomar Encruzilhada do Sul 2, o que aumenta a eficiência dos microrganismos do solo na transformação da matéria orgânica do solo em nutrientes disponíveis para as plantas. Um alto valor de qM pode significar perdas no sistema, em função da alta mineralização dos nutrientes e, segundo Rutigliano *et al.* (2023), a cobertura do solo está intimamente ligada com as perdas de carbono do solo (altos valores de qM). Portanto, é de se esperar que o principal fator que levou aos maiores valores de qM foi o manejo do solo.

Tabela 1 - Carbono orgânico total (COT), Carbono da biomassa microbiana (CBM), Respiração basal (RB), Quociente metabólico (qCO_2), Quociente microbiano ($qMIC$) e Quociente de mineralização (qM) do solo em pomares de noqueira-pecã localizados em diferentes regiões do RS

Pomares	COT	CBM	RB	qCO_2	$qMIC$	qM
	(g kg ⁻¹ solo)	(mg C microbiano kg ⁻¹ solo)	(mg C-CO ₂ kg ⁻¹ solo h ⁻¹)	(mg C-CO ₂ g ⁻¹ C-CBM h ⁻¹)	(%)	(%)
Anta Gorda	24,81 (± 1,37)	689,01 (± 73,65)	1,07 (± 0,34)	1,56 (± 0,54)	2,79 (± 0,42)	4,28 (± 1,23)
Bagé	21,05 (± 3,17)	629,63 (± 68,08)	0,32 (± 0,14)	0,51 (± 0,19)	3,01 (± 0,21)	1,55 (± 0,62)
Cachoeira do Sul 1	18,08 (± 3,53)	492,02 (± 69,59)	0,49 (± 0,18)	0,97 (± 0,25)	2,74 (± 0,17)	2,63 (± 0,56)
Cachoeira do Sul 2	12,35 (± 0,99)	447,95 (± 52,87)	0,34 (± 0,07)	0,75 (± 0,07)	3,63 (± 0,35)	2,75 (± 0,52)
Dom Feliciano	9,14 (± 0,99)	307,20 (± 33,61)	0,14 (± 0,04)	0,44 (± 0,12)	3,39 (± 1,01)	1,47 (± 0,48)
Encruzilhada do Sul 1	17,71 (± 3,14)	567,45 (± 83,15)	0,73 (± 0,61)	1,21 (± 0,85)	3,28 (± 0,75)	4,26 (± 3,61)
Encruzilhada do Sul 2	15,90 (± 4,41)	458,96 (± 50,37)	0,47 (± 0,13)	1,04 (± 0,35)	3,12 (± 1,13)	3,15 (± 1,28)
Glorinha	21,41 (± 2,19)	914,09 (± 67,07)	0,54 (± 0,06)	0,59 (± 0,03)	4,28 (± 0,13)	2,54 (± 0,09)
Nova Pádua	20,61 (± 8,35)	884,46 (± 164,76)	1,01 (± 0,46)	1,10 (± 0,31)	4,62 (± 1,21)	5,04 (± 1,85)
Pântano Grande	10,99 (± 1,41)	396,86 (± 41,47)	0,25 (± 0,05)	0,63 (± 0,15)	3,63 (± 0,24)	2,28 (± 0,57)
Pelotas 1	17,62 (± 1,67)	600,89 (± 33,84)	0,48 (± 0,14)	0,80 (± 0,28)	3,45 (± 0,50)	2,69 (± 0,67)
Pelotas 2	17,82 (± 3,46)	631,83 (± 40,80)	0,63 (± 0,16)	1,01 (± 0,29)	3,66 (± 0,85)	3,55 (± 0,57)
Santa Maria 1	15,36 (± 2,40)	428,62 (± 99,08)	0,38 (± 0,08)	0,92 (± 0,23)	2,82 (± 0,66)	2,48 (± 0,31)
Santa Maria 2	11,67 (± 2,12)	426,76 (± 43,94)	0,46 (± 0,09)	1,09 (± 0,25)	3,70 (± 0,40)	4,02 (± 0,93)
Taguari	16,94 (± 7,07)	653,93 (± 91,32)	0,62 (± 0,18)	0,94 (± 0,19)	4,19 (± 1,11)	3,80 (± 0,48)

Fonte: Autora. ± entre parênteses indica o desvio padrão da média.

Conclusões

Os resultados evidenciam que as variáveis físicas, químicas e biológicas do solo são fundamentais para avaliar a qualidade do solo, sobretudo em pomares de noqueira-pecã. O manejo do solo de correção do pH mostrou-se decisivo, especialmente com variáveis associadas à fertilidade, como Ca, CTC e saturação de bases. Além disso, os resultados mostraram que há uma variabilidade do manejo dentro do pomar, o que pode gerar desequilíbrios na qualidade geral do solo e comprometer a produtividade, ressaltando a importância de um controle mais uniforme.

Os indicadores biológicos COT e RB tiveram maior destaque diante das demais variáveis químicas e físicas. No mesmo sentido, COT e BETA se correlacionam positivamente com a maioria dos macro e micronutrientes e CTC, mostrando sua influência nos processos de ciclagem de nutrientes e fertilidade.

Além disso, COT, RB e CBM demonstram ser influenciados pelo tipo de solo e pelas práticas de manejo. Pomares com manejo conservacionista e solos argilosos, como Anta Gorda, demonstram maior acúmulo de carbono e atividade microbiana, promovendo maior acúmulo de carbono e resiliência ambiental. Por outro lado, pomares em solos mais arenosos e com manejo não conservacionista, como Dom Feliciano, apresentam menor COT, RB e CBM, refletindo em perda de fertilidade e menor dinamismo do solo.

Referências

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507> Acesso em: 15 abr. 2025.

ANTISARI, Livia Vittori *et al.* Soil Biochemical Indicators and Biological Fertility in Agricultural Soils: a case study from northern Italy. **Minerals**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 219, 20 fev. 2021. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/min11020219> Acesso em: 24 fev. 2025.

ASHRAF, M. N.; WAQAS, M. A.; RAHMAN, S. Microbial Metabolic Quotient is a Dynamic Indicator of Soil Health: trends, implications and perspectives (review). **Eurasian Soil Science**, [S.L.], v. 55, n. 12, p. 1794-1803, dez. 2022. Pleiades Publishing Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1134/S1064229322700119> Acesso em: 24 fev. 2025.

AYRES M., AYRES JR. M., AYRES D.L., SANTOS A.S. 2007. BioEstat 5.0 – Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas. Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. MCT-CNPq, Belém. 364p.

BASTOS, Tatiana Reis dos Santos *et al.* Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **Catena**, [S.L.], v. 230, p. 107270, set. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2023.107270> Acesso em: 24 fev. 2025.

BENATI, J. A. *et al.* Caracterização da fertilidade de solos cultivados com Nogueira-pecã no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Boletim de pesquisa e desenvolvimento- 355. Embrapa clima temperado. 2021. ISSN 1678-2518. Dezembro/2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1137719/caracterizacao-da-fertilidade-de-solos-cultivados-com-nogueira-pecã-no-rio-grande-do-sul-e-santa-catarina> Acesso em: 24 fev. 2025.

BILHARVA, Maurício Gonçalves *et al.* Nogueira-pecã em sistema agroflorestal. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 1-11, 4 jun. 2021. Research, Society and Development. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15637> Acesso em: 14 abr. 2025.

BRAAK, C. J. F. Ter. Ordination. **Data Analysis In Community And Landscape Ecology**, [S.L.], p. 91-173, 2 mar. 1995. Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/cbo9780511525575.007> Acesso em: 11 abr. 2025.

CABRERA-RODRÍGUEZ, Alejandra *et al.* Effect of Organic and Conventional Systems Used to Grow Pecan Trees on Diversity of Soil Microbiota. **Diversity**, [S.L.], v. 12, n. 11, p. 436, 19 nov. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/d12110436> Acesso em: 15 abr. 2025.

CASAGRANDA, Danielle Galvan *et al.* Productivity of pecan nut in the Anta Gorda region in Rio Grande do Sul. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 1-10, 10 jan. 2023. Research, Society and Development. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i1.39574> Acesso em: 24 fev. 2025.

CHEN, Jianyu *et al.* Soil quality assessment of oak forests invaded by moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) in the northern subtropics. **Global Ecology And Conservation**, [S.L.], v. 51, p. 1-15, jun. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02945> Acesso em: 14 abr. 2025.

COLUNGA, Samantha L.; WAHAB, Leila; CABO, Alejandro Fierro; PEREIRA, Engil. Carbon sequestration through conservation tillage in sandy soils of arid and semi-arid climates: a meta-analysis. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 245, p. 106310, jan. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2024.106310> Acesso em: 17 mar. 2025.

COSTA, Romario Martins *et al.* 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, p. 103628, jun.

2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103628> Acesso em: 25 fev. 2025.

DELGADO, J. A. *et al.* Conservation Practices to Mitigate and Adapt to Climate Change. **Journal of Soil and Water Conservation**. 66:(4):118A-129A. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2489/jswc.66.4.118A> Acesso em: 07 Abr. 2025.

DORAN, John W.; PARKIN, Timothy B.. Defining and Assessing Soil Quality. **Sssa Special Publications**, [S.L.], p. 1-21, 26 out. 2015. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1> Acesso em: 24 mar. 2025.

GAUCH H.G. JR. 1982. Multivariate analysis in community ecology. Cambridge University Press, Cambridge. 298p.

GUIDO, A. *et al.* Competitive effects and responses of the invasive grass *Eragrostis plana* in Río de la Plata grasslands. *Austral Ecology*. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/AEC.12822> Acesso em: 07 Abr. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - Área plantada, área colhida e produção, por ano da safra e produto das lavouras, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/noz/br> Acesso em 25 fev. 2025.

ISHAQ, Hafiz Khuzama *et al.* Soil quality under rotational and conventional grazing in Mediterranean areas at desertification risk. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 373, p. 123822, jan. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123822> Acesso em: 14 abr. 2025.

KÖLLN, O. T. (Organizador) *et al.* **Sistemas para produção agropecuária sustentável no norte pioneiro do Paraná**. Campus Cornélio Procopio – PR: Editora UENP, 2023. 376 f. il. cor. ISBN: 978-65-87941-25-7. Disponível em: <https://uenp.edu.br/editora> Acesso em 24 fev. 2025.

KUNITO, Takashi *et al.* Microbial synthesis of arylsulfatase depends on the soluble and adsorbed sulfate concentration in soils. **European Journal Of Soil Biology**, [S.L.], v. 111, p. 103418, jul. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103418> Acesso em: 25 fev. 2025.

LAL, R. Carbon management in agricultural soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 12, n. 2, p. 303-322, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11027-006-9036-7> Acesso em: 14 abr. 2025.

LEMANOWICZ, Joanna *et al.* The Effect of Enzyme Activity on Carbon Sequestration and the Cycle of Available Macro- (P, K, Mg) and Microelements (Zn, Cu) in Phaeozems. **Agriculture**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 172, 10 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13010172> Acesso em: 11 abr. 2025.

MARTINS, C. R. *et al.* Práticas básicas do plantio à colheita de noz-pecã. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2021. 19 p. (Embrapa Clima Temperado.

Circular Técnica, 225). ODS 2. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/357157298> *Práticas Básicas do Plantio a Colheita de Noz-peca* Acesso em: 24 fev. 2025.

MARTINS, Caroline Cândida. **BIOCHAR, COMPOSTO ORGÂNICO E POTÁSSIO NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E LIXIVIAÇÃO DE NUTRIENTES EM ESPODOSSOLO E NO CULTIVO DE MUCUNA PRETA E MORINGA**. 2018. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Produção Vegetal, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – Rj, 2018.

MENDES, Iêda Carvalho *et al.* 2019a. Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. *Tópicos Ci. Solo* 10, 1–64.

MENDES, Iêda Carvalho *et al.* Limites críticos para indicadores microbianos em Latossolos tropicais na pós-colheita: o conceito de amostra de solo FERTBIO. 139, 85–93, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025> Acesso em: 18 mar. 2025.

MCGARIGAL K., CUSHMAN S., STAFFORD S. 2000. *Multivariate statistics for wildlife and ecology research*. Springer-Verlag, New York. 283p.

MGANGA, Kevin Z.; ROLANDO, José; KALU, Subin; KARHU, Kristiina. Microbial soil quality indicators depending on land use and soil type in a semi-arid dryland in Kenya. **European Journal Of Soil Biology**, [S.L.], v. 121, p. 103626, jun. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103626> Acesso em: 25 fev. 2025.

NOVAK, Elaine *et al.*. Composição química do solo em diferentes condições ambientais. **Ciência Florestal**, [S.L.], v. 31, n. 3, p. 1063-1085, 6 set. 2021. Universidad Federal de Santa Maria. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509828995> Acesso em: 14 abr. 2025.

PINZARI, Flavia; TRINCHERA, Alessandra; BENEDETTI, Anna; SEQUI, Paolo. Use of biochemical indices in the mediterranean environment: comparison among soils under different forest vegetation. **Journal Of Microbiological Methods**, [S.L.], v. 36, n. 1-2, p. 21-28, maio 1999. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-7012\(99\)00007-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-7012(99)00007-x) Acesso em: 25 fev. 2025.

POLETO, Tales *et al.* Morphological, chemical and genetic analysis of southern Brazilian pecan (*Carya illinoensis*) accessions. **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 261, p. 108863, fev. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108863> Acesso em: 24 fev. 2025.

RIBEIRO, Stephanie Reis *et al.* Chemical composition and oxidative stability of eleven pecan cultivars produced in southern Brazil. **Food Research International**, [S.L.], v. 136, p. 109596, out. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109596> Acesso em: 23 mar. 2025.

ROCHA, Ana Flávia Brandão *et al.* Indicadores de Qualidade do Solo em Sistemas Agroecológicos no Cerrado Mineiro. **Sociedade & Natureza**, [S.L.], v. 34, n. 1, p. 1-14, 16 fev. 2022. EDUFU - Editora da Universidade Federal de

Uberlândia. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/sn-v34-2022-62940>. Acesso em: 25 mar. 2025.

RUTIGLIANO, F.A. *et al.* Microbial, physical and chemical indicators together reveal soil health changes related to land cover types in the southern European sites under desertification risk. **Pedobiologia**, [S.L.], v. 99-100, p. 150894, set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2023.150894> Acesso em: 25 mar. 2025.

SIEBENEICHLER, Tatiane Jéssica *et al.* Influence of cultivar on quality parameters of pecans produced in Southern Brazil. **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 336, p. 113423, out. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113423> Acesso em: 25 fev. 2025.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). **Seropédica: Embrapa Agrobiologia**, 2007a. 6 p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 99). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/627577/determinacao-da-respiracao-basal-rbs-e-quociente-metabolico-do-solo-qco2> Acesso em: 25 mar. 2025.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C) **Seropédica: Embrapa Agrobiologia**, 2007b. 6 p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 98). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/625010/determinacao-do-carbono-da-biomassa-microbiana-do-solo-bms-c> Acesso em: 25 mar. 2025.

SPOHN, Marie; CHODAK, Marcin. Microbial respiration per unit biomass increases with carbon-to-nutrient ratios in forest soils. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 81, p. 128-133, fev. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.008> Acesso em: 14 abr. 2025.

SUI, Xin *et al.* Contrasting seasonal effects of legume and grass cover crops as living mulch on the soil microbial community and nutrient metabolic limitations. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 380, p. 109374, mar. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2024.109374> Acesso em: 17 mar. 2025.

TABATABAI, MA. 1994. Enzimas do solo. Em: Weaver, RW, Scott, A., Bottomley, PJ (Eds.), Métodos de Análise de Solo: Propriedades Microbiológicas e Bioquímicas. Soil Science Society of America, Madison, pp. 778–833.

TEDESCO J. M. *et al.* Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5). Disponível em: https://rolas.cnpt.embrapa.br/arquivos/manual_rolas.pdf Acesso em: 25 mar. 2025.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* Densidade do solo. In: TEIXEIRA, P. C. *et al.* Manual de Métodos de Análise de Solo. 3ª Edição Revisada e Ampliada. Brasília, DF: EMBRAPA, Capítulo 7, p. 65-75. 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209> Acesso em: 17 mar. 2017.

TORRALBA, Mario *et al.* Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 230, p. 150-161, ago. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002> Acesso em: 14 abr. 2025.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 29-38, jan. 1934. Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003> Acesso em: 17 mar. 2025.

WOLLMANN, Cássio Arthur; GALVANI, Emerson. CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA REGIONAL DO RIO GRANDE DO SUL: dos estudos estáticos ao entendimento da gênese. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.L.], v. 11, p. 87-103, 31 dez. 2012. ABCLima (Brazilian Association of Climatology). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v11i0.28586> Acesso em: 15 abr. 2025.

ZHAO, Yihan; NAETH, M Anne. Synergistic effects of coal waste derived humic substances and inorganic fertilizer as soil amendments for barley in sandy soil. *Heliyon*, [S.L.], v. 10, n. 8, p. 1-7, abr. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29620> Acesso em: 4 mar. 2025.

Capítulo 2: Avaliação da saúde do solo no sistema de produção de noz-pecã no Sul do Brasil

Resumo: A atividade das enzimas β -glicosidase (BETA) e arilsulfatase (ARIL), o teor de carbono orgânico do solo (COT) e o rendimento acumulado das culturas agrícolas estão sendo usados para avaliar a saúde do solo e recomendar práticas de manejo para essas e outras culturas agrícolas. No entanto, devido a lacunas nas análises de solo e planta, essa tecnologia ainda não está acessível para a cultura da noqueira-pecã, o que faz com que novas alternativas de análise e interpretação sejam desenvolvidas. Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar a combinação da abordagem da Avaliação Abrangente da Saúde do solo (CASH) de Cornell e o modelo de quatro quadrantes (4QM) como ferramentas de avaliação da saúde do solo para sistemas de produção de noz-pecã do Estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Além disso, avaliou-se o impacto do manejo dos pomares de noqueira-pecã na saúde do solo. Foram avaliadas as enzimas BETA e ARIL e o COT em 15 pomares de noqueira-pecã distribuídos pelo RS. O solo de cada pomar foi coletado na camada de 0-10 cm de profundidade na projeção da copa das plantas. A integração entre o CASH e o 4QM se mostrou eficiente para compreender a dinâmica envolvida no sistema produtivo da noz-pecã, permitindo distinguir os diferentes sistemas com base no manejo adotado, o que está diretamente relacionado com a saúde do solo. Os pomares orgânicos, o de manejo agroflorestal e os que utilizam plantas de cobertura, sobretudo, demonstraram maior saúde do solo, evidenciado por altos níveis de COT e atividade enzimática. Além disso, a análise apontou solos doentes e em adoecimento que necessitam de maior atenção e revisão dos métodos de manejo do solo. Esse cenário reforça a importância de estudos da saúde do solo na noqueira-pecã e a necessidade de ampliar essa análise para outras culturas no Estado do RS.

Palavras-chave: Atividade enzimática do solo; *Carya illinoensis*; Carbono orgânico total; manejo do solo; sustentabilidade; saúde do solo.

1 Introdução

A noqueira-pecã (*Carya illinoensis*), originária dos EUA e México, é uma espécie arbórea cultivada em vários países do mundo. Foi introduzida no Brasil na década de 1870 em áreas subtropicais das regiões Sudeste e Sul do país (Poletto *et al.*, 2020; Alba *et al.*, 2021). Com o aumento do cultivo da noqueira-pecã no Brasil, principalmente no Estado do Rio Grande do Sul (RS), há um crescente interesse em avaliar manejos que possibilitem maiores produtividades de forma sustentável (Rodriguez-Ramos *et al.*, 2022; Siebeneichler *et al.*, 2024).

De modo geral, a maior produtividade das culturas é associada a solos saudáveis. No entanto, é comum pensar que a alta produtividade depende de doses elevadas de fertilizantes e pesticidas, o que pode prejudicar, a longo prazo, a sustentabilidade desses agroecossistemas. Além disso, ações que potencializam as perdas de matéria orgânica do solo (MOS), como por exemplo, a ausência de cobertura do solo e revolvimento excessivo do solo, podem levar à redução de nutrientes essenciais comprometendo a fertilidade do solo, e principalmente afetando a saúde do solo (Ding *et al.*, 2024; Sui *et al.*, 2025). De acordo com Mendes *et al.* (2021), a saúde do solo abrange tanto a capacidade do solo de sustentar o crescimento de plantas quanto seu papel no equilíbrio ecológico, indo além da produção agrícola. Destacando sua importância no funcionamento global dos ecossistemas, incluindo benefícios como o armazenamento de água, o sequestro de carbono e a mitigação de gases de efeito estufa. Dessa forma, muitas pesquisas têm focado na avaliação da atividade das enzimas do solo arilsulfatase e β -glicosidase em diversas culturas, devido ao interesse surgido pelo uso bem sucedido dessas enzimas, sobretudo, em áreas de cultivo anuais (Mendes *et al.*, 2018b, 2019b, 2021; Chaer *et al.*, 2023; Carneiro *et al.*, 2024).

A arilsulfatase (ARIL) e a β -glicosidase (BETA) são enzimas importantes nos ciclos biogeoquímicos do solo e são sensíveis a mudanças no manejo do solo, agindo como bons indicadores da qualidade do solo (Sobucki *et al.*, 2024). A ARIL é uma importante enzima que controla a mineralização do enxofre proveniente de fontes orgânicas, pois atua no éster sulfato quebrando a ligação enxofre-oxigênio e produzindo sulfato (SO_4^{2-}) que é utilizado no metabolismo microbiano e uma parte estará disponível na solução do solo para

absorção pelas plantas (Kunito *et al.*, 2022). Ela pode ser uma enzima intracelular ou extracelular produzida por plantas, animais e microrganismos (Tabatabai, 1994). Já a BETA é uma enzima extracelular relacionada ao ciclo do carbono, que atua no processo final da degradação da celulose, liberando glicose para crescimento microbiano (Mól *et al.*, 2023). Diante disso, a avaliação das enzimas intracelulares e extracelulares fornece informações valiosas sobre a liberação de nutrientes no solo pela degradação de resíduos orgânicos e atividade microbiana, além de atuar como indicador sensível de mudanças nas condições do solo. Por isso, essas enzimas estão sendo estudadas para avaliar e apoiar decisões na gestão do solo (Chaer *et al.*, 2023).

A partir da análise das duas enzimas, são construídas estruturas interpretativas para avaliação da saúde do solo que estabelecem níveis de referência (baixo, médio e alto), estabelecendo limites para funções de pontuação padronizadas (Mendes *et al.*, 2018a). Os primeiros estudos que abordaram essa interpretação, basearam-se no princípio de calibração de nutrientes do solo (Lopes *et al.*, 2013), aplicando modelos de regressão linear, utilizando as enzimas, carbono orgânico do solo (COT) e uma função de rendimento cumulativo.

O rendimento das culturas tem sido usado como calibração em função dos indicadores biológicos, e mostrado ser vantajoso por refletir resultados econômicos que proporcionam a satisfação do agricultor, além de servir como bom indicador de sustentabilidade agrícola e de solos bem manejados a longo prazo (Pawlowski *et al.*, 2024). No entanto, em situações onde a obtenção do rendimento da cultura é inacessível, torna-se imprescindível desenvolver novas estratégias para interpretar a saúde do solo nesses sistemas, com o intuito de pontuar indicadores que não dependam do rendimento da cultura (Carneiro *et al.*, 2024).

Diversas metodologias foram propostas para a interpretação de indicadores de saúde e qualidade do solo. A Avaliação Abrangente da Saúde do Solo (em inglês, Comprehensive Assessment of Soil Health - CASH), desenvolvida pela Universidade Cornell (Moebius-Clune *et al.*, 2016), teve sua origem na adaptação das medições de saúde do solo com base no trabalho de Andrews, Karlen e Cambardella (2004). Este trabalho também resultou na

criação da Estrutura de Avaliação do Manejo do Solo (em inglês, Soil Management Assessment Framework - SMAF) (Stott *et al.*, 2010) e do Protocolo de Avaliação da Saúde do Solo (em inglês, Soil Health Assessment Protocol and Evaluation - SHAPE) (Nunes *et al.*, 2021). No Brasil, o modelo de quatro quadrantes (4QM) foi introduzido por Chaer *et al.* (2023) e permite a separação de grupos de amostras em quatro categorias: solos saudáveis (quadrante 1), solos passando por degradação biológica (quadrante 2), solos não saudáveis (quadrante 3) e solos passando por processos regenerativos (quadrante 4). O 4QM integra a relação do COT com a atividade média das enzimas ARIL e BETA por unidade de COT.

Em busca de sustentabilidade na cadeia produtiva, os pecanicultores estão cada vez mais interessados em utilizar as informações das enzimas do solo para avaliar a saúde do solo e estabelecer práticas de gestão mais sustentáveis e produtivas. No entanto, a relação entre a atividade dessas enzimas e o sistema de cultivo da noqueira-pecã permanece pouco compreendida. Consequentemente, surge uma importante demanda por pesquisas que avaliem a saúde do solo em sistemas de cultivo de noqueira-pecã no Brasil, devido à falta de estudos publicados relacionados a esse tema e pela necessidade de informações acerca do manejo ideal desta cultura, visto que as práticas de manejo dos pomares variam entre as regiões. No entanto, na ausência de dados do acompanhamento do rendimento cumulativo do pomar, torna-se complexa a calibração dos indicadores de saúde do solo (Carneiro *et al.*, 2024).

Neste estudo, avaliou-se a combinação da abordagem CASH (Moebius-Clune *et al.*, 2016) e do 4QM (Chaer *et al.*, 2023) como uma ferramenta de avaliação da saúde do solo para sistemas de produção de nozes no RS. Além disso, este estudo objetivou avaliar o impacto do manejo dos pomares de noqueira-pecã na saúde do solo.

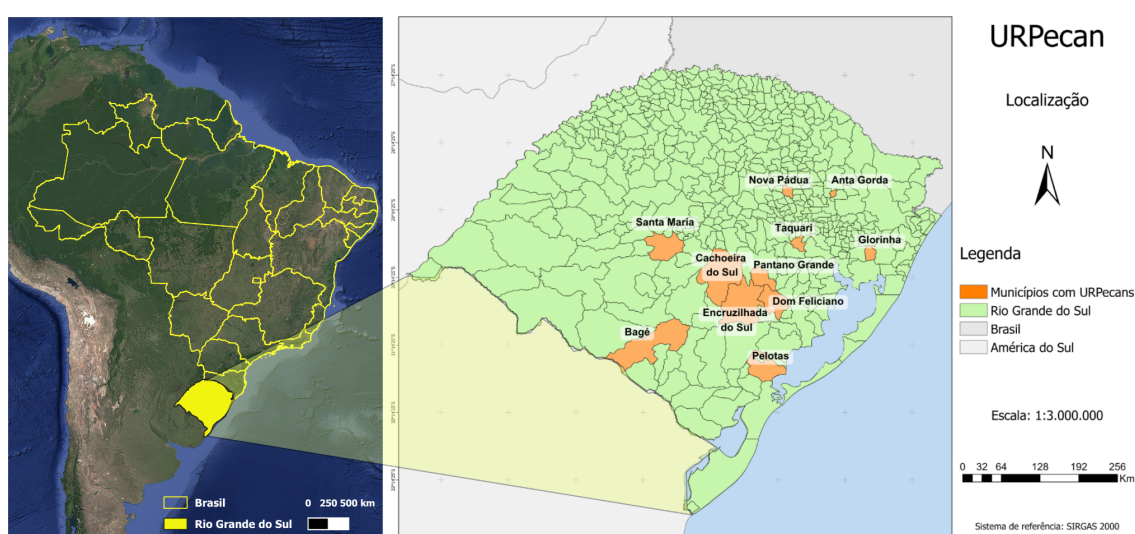
2 Material e Métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em 15 pomares de noqueira-pecã localizados em 11 municípios do RS (Figura 1), sendo eles: Anta Gorda; Bagé, Cachoeira do Sul, Dom Feliciano; Encruzilhada do Sul; Glorinha; Nova Pádua; Pântano

Grande; Pelotas; Santa Maria e Taquari. De acordo com a classificação Köppen, o clima do RS é temperado do tipo subtropical, classificado como Mesotérmico Úmido. As temperaturas apresentam grande variação sazonal, com verões quentes e invernos bastante rigorosos, com a ocorrência de geadas e precipitação eventual de neve. As temperaturas médias variam entre 15° e 18°C, com mínimas de até -10°C e máximas de 40°C. O RS apresenta uma distribuição de precipitação relativamente equilibrada das chuvas ao longo de todo o ano, em decorrência das massas de ar oceânicas que penetram no Estado (Wollmann; Galvani, 2012). O volume de chuvas, no entanto, é diferenciado. Ao sul a precipitação média anual situa-se entre 1.300 mm e 1.600 mm e, ao norte a média fica entre 1.600 mm e 1.900 mm, com maior intensidade de chuvas registradas a norte e nordeste do estado, especialmente na encosta do Planalto (Alvares *et al.*, 2013).

Figura 1 - Mapa do Brasil, destacando-se o Estado do RS com a localização dos onze municípios com URPecans, onde quinze pomares foram distribuídos e avaliados



Fonte: Autora. QGIS 3.34.11.

Os pomares foram selecionados com o intuito de representar os diferentes sistemas de manejo no cultivo de noqueira-pecã e são Unidades de Referência Produtiva de noz-pecã (URPecan) no RS, com o apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e do Instituto Brasileiro de Pecanicultura (IBPecan). Os locais de avaliação foram selecionados considerando a representatividade de cada pomar, no entanto, manteve-se um padrão de uma cultivar que se apresentava em todas propriedades estudadas.

Sendo assim, foi analisado o solo somente nos talhões com a cultivar Barton. Também foi realizado um levantamento de informações do manejo do solo de cada pomar, de modo a caracterizar cada área de acordo com as práticas adotadas.

2.2 Amostragem e análise do solo

A amostragem de solo foi conduzida de novembro de 2023 a julho de 2024. As amostras de solo foram coletadas nas linhas de plantio, sob a projeção da copa das árvores na camada superficial do solo (0-10 cm de profundidade). Foram obtidas quatro amostras simples de solo distribuídas no talhão representativo de cada pomar.

As amostras de solo para determinação das enzimas β -glicosidase (BETA), Arilsulfatase (ARIL) e do Carbono Orgânico Total do Solo (COT) foram preparadas de acordo com Mendes *et al.* (2019a), secando-as ao ar em temperatura ambiente por pelo menos duas semanas e peneiradas na malha de 2 mm.. A determinação das enzimas foi realizada conforme Tabatabai (1994) com base na determinação colorimétrica do *p*-nitrofenol liberado pelas enzimas quando o solo foi incubado com uma solução tamponada de substratos específicos para cada enzima. Duas réplicas analíticas e mais o controle foram usadas para cada amostra. Os valores das atividades enzimáticas são expressos em μg de *p*-nitrofenol g de solo⁻¹ hora⁻¹. A determinação do COT foi realizada conforme método de combustão descrito por Walkley e Black (1934), em triplicata mais o controle. O teor de COT foi expresso em g kg^{-1} solo. A análise granulométrica do solo procedeu-se conforme descrito por Teixeira *et al.* (2017). A classificação do solo foi realizada conforme Santos *et al.* (2018). As principais análises químicas foram realizadas conforme Tedesco *et al.* (1995) e são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1- Caracterização química e granulométrica da camada 0,00 - 0,10 m do solo de pomares de noqueira-pecã localizados em diferentes regiões do RS

Pomares	pH	MO (%)	P (mg dm ⁻³)	K (mg dm ⁻³)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Textura	Classificação do solo
Anta Gorda	6,54	4,39	428,65	528,23	47,6	36,9	15,5	Argila	Chernossolo Argilúvico
Bagé	6,49	3,48	10,75	82,45	25,1	28,6	46,3	Franco argilo arenoso	Argissolo Vermelho
Cachoeira do Sul 1	6,36	2,89	72,20	276,83	18,5	28,8	52,7	Franco arenoso	Argissolo Vermelho
Cachoeira do Sul 2	6,07	2,05	37,50	134,33	16	13,4	70,6	Franco arenoso	Argissolo Vermelho
Dom Feliciano	5,42	1,57	22,63	58,13	9,8	14,1	76,2	Franco arenoso	Neossolo Litólico
Encruzilhada do Sul 1	6,31	3,11	45,65	411,58	14,2	16,2	69,7	Franco arenoso	Luvissolo Háplico
Encruzilhada do Sul 2	6,51	2,64	32,23	204,83	13,7	20,5	65,8	Franco arenoso	Luvissolo Háplico
Glorinha	5,21	3,7	9,13	108,85	24,6	25,4	50	Franco argilo arenoso	Argissolo Vermelho
Nova Pádua	6,23	3,18	64,13	250,23	22,3	32,0	45,7	Franco	Chernossolo Argilúvico
Pântano Grande	5,85	1,6	29,45	140,60	14,5	22,6	62,9	Franco arenoso	Planossolo Háplico
Pelotas 1	5,77	3,09	148,38	113,18	19,5	23,8	56,7	Franco arenoso	Neossolo Litólico
Pelotas 2	5,42	3,13	9,68	94,95	15,5	21,9	62,6	Franco arenoso	Neossolo Litólico
Santa Maria 1	6,42	2,65	115,55	192,03	15,1	20,2	64,7	Franco arenoso	Argissolo Vermelho
Santa Maria 2	5,97	2,11	23,53	96,45	9,8	13,7	76,5	Franco arenoso	Argissolo Bruno - Acinzentado
Taquari	6,38	3,33	75,05	348,60	26,4	37,5	36,1	Franco	Argissolo Vermelho

Fonte : Autora. O valor das variáveis para cada pomar corresponde a média das quatro amostras analisadas de cada pomar.

2.3 Atividade enzimática específica média (ASEA)

Para normalizar a atividade enzimática à quantidade de carbono orgânico total do solo, cada enzima (BETA e ARIL) foi dividida pelo carbono orgânico total do solo, resultando em atividade BETA específica (S-BETA) (Eq. 1) e atividade ARIL específica (S-ARIL) (Eq. 2) (Carneiro *et al.*, 2024).

$$(1) \quad S - BETA = \frac{BETA}{SOC}$$

$$(2) \quad S - ARIL = \frac{ARIL}{SOC}$$

A ASEA foi calculada como a média de S-BETA e S-ARIL (Eq. 3).

$$(3) \quad ASEA = \frac{S-BETA + S-ARIL}{2}$$

A ASEA foi expressa em g p-nitrofenol kg⁻¹ COT h⁻¹.

2.4 Levantamento de informações do manejo anotado nos pomares

Os pomares apresentaram variações em suas características incluindo tempo de implantação, solo, relevo, manejo, entre outras. Dessa forma, foi realizado um levantamento de informações sobre o manejo do solo de cada pomar, de modo a caracterizar cada área de acordo com as práticas adotadas desde a implantação até o momento da amostragem (Quadro 1).

Quadro 1 - Informações do manejo adotado nos pomares de nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul - RS

Localização	Características gerais dos pomares
Anta Gorda	Pomar foi implantado a 14 anos (2010) com plantas espaçadas de 10 x 12m em uma área de 15 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas são em superfície e se utilizam defensivos químicos para controle de pragas e doenças. Como cobertura de solo, predominam gramíneas espontâneas perenes que são pastejadas por ovelhas até no máximo 60 dias antes da colheita. O pomar é irrigado.
Bagé	Pomar foi implantado a 1 ano (2023) com plantas espaçadas de 9 x 12m em uma área de 70 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na linha de plantio, por ocasião da implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas foram sempre na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas na linha de plantio é realizado com herbicidas, já nas entrelinhas utiliza-se roçadeira. Observou-se capimannoni e plantas espontâneas nas entrelinhas de plantio. Adota-se o uso de palha no coroamento das plantas. O pomar não é irrigado nem pastejado por animais.
Cachoeira do Sul	Pomar foi implantado a 13 anos (2011) com plantas espaçadas de 8,5 x 8,5m em uma área de 120 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. O pomar também recebe adubações químicas e orgânicas em toda a sua área. O controle de plantas espontâneas é realizado com o uso de herbicidas e roçadas. Como cobertura de solo utiliza-se as culturas da aveia, azevém, ervilhaca e nabo. Nos primeiros anos após a implantação do pomar criou-se ovelhas que pastejavam na copa e nas entrelinhas das plantas. Uma parte do pomar recebe irrigação (Cachoeira do Sul 1) e a outra parte não (Cachoeira do Sul 2).
Dom Feliciano	Pomar foi implantado a 6 anos (2018) com plantas espaçadas de 10 x 10m em uma área de 38 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas são na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas na linha de plantio é realizado com herbicidas, já nas entrelinhas utiliza-se roçadeira. Observou-se grande infestação de capimannoni em todo pomar. O pomar não é irrigado nem pastejado por animais.
Encruzilhada do Sul	Pomar foi implantado a 8 anos (2016) com plantas espaçadas de 8,5 x 8,5m em uma área de 150 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas são na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas na linha de plantio é realizado com herbicidas, já nas entrelinhas utiliza-se roçadeira. Como cobertura de solo utiliza-se plantas de inverno associadas a plantas espontâneas nativas do local. Uma parte do pomar recebe irrigação (Encruzilhada do Sul 1) e a outra parte não (Encruzilhada do Sul 2). O pomar é pastejado por bovinos e ovinos.
Glorinha	Pomar implantado a 8 anos (2016) com plantas espaçadas de 9 x 12m em uma área de 35 hectares. A acidez do solo foi corrigida de forma deficitária com calcário apenas na implantação do pomar. Utiliza-se adubações orgânicas com cama de aviário em todo pomar. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira. A cobertura de solo predominante no inverno e no verão são as gramíneas espontâneas nativas do local. O pomar não é irrigado nem pastejado por animais.

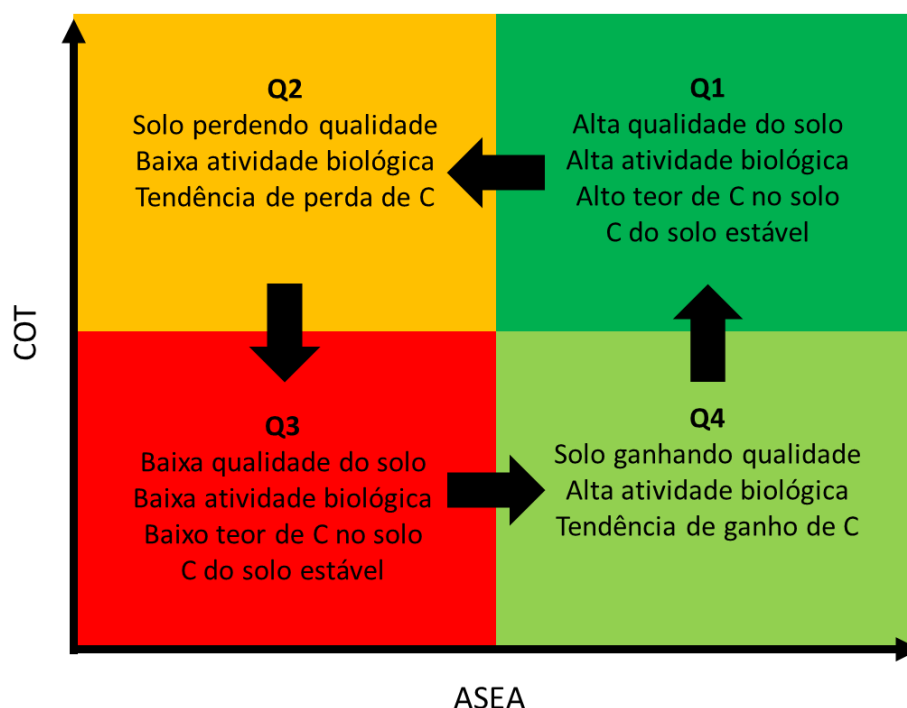
Nova Pádua	Pomar foi implantado a 13 anos (2011) com plantas espaçadas de 7 x 7m em uma área de 5 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. As adubações químicas e orgânicas são na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira. A cobertura de solo predominante são as plantas espontâneas nativas do local associadas ao azevém. O pomar é pastejado por ovinos mas não é irrigado.
Pântano Grande	Pomar foi implantado a 13 anos (2011) com plantas espaçadas de 7 x 8m em uma área de 60 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utiliza-se adubações químicas e orgânicas em todo pomar. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira e esporadicamente herbicida na linha de plantio. Utiliza-se plantas de cobertura de solo no inverno. O pomar não é pastejado por animais, porém é irrigado.
Pelotas “1”	Pomar foi implantado a 6 anos (2018) com plantas espaçadas de 10 x 10 m em uma área de 1,5 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utiliza-se adubações orgânicas (cama de aviário) na copa das plantas. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira, capina e uso de palha na copa das plantas. Utiliza-se plantas de cobertura de solo no inverno e no verão. O pomar não é pastejado por animais e não é irrigado.
Pelotas “2”	Pomar foi implantado a 11 anos (2013) dentro de um sistema agroflorestal (SAF) com plantas espaçadas de 10 x 10 m em uma área de 0,36 hectares. Não foi realizada a correção da acidez do solo e nem o uso de adubos químicos e orgânicos na implantação do SAF. O controle de plantas espontâneas foi realizado apenas na entrelinha quando a área foi preparada para a instalação de um experimento com feijão e milho. O pomar não é pastejado por animais e nem irrigado.
Santa Maria “1”	Pomar foi implantado a 13 anos (2011) com plantas espaçadas de 8,5 x 8,5 m em uma área de 12 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utiliza-se adubações químicas e orgânicas na linha de plantio. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira. Utiliza-se plantas de cobertura de solo no inverno. O pomar é pastejado por ovinos e é irrigado.
Santa Maria “2”	Pomar foi implantado a 12 anos (2012) com plantas espaçadas de 7 x 7 m em uma área de 115 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utiliza-se adubações químicas e orgânicas em toda área do pomar. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira. Utiliza-se plantas de cobertura de solo no inverno. O pomar não é pastejado por animais, porém é irrigado.
Taquari	Pomar foi implantado a 52 anos (1972) com plantas espaçadas de 10 x 10 m em uma área de 38 hectares. A acidez do solo foi corrigida com calcário na implantação do pomar. Utilizou-se recentemente adubações químicas e orgânicas em toda área do pomar. O controle de plantas espontâneas é realizado utilizando roçadeira na entrelinha e herbicida na linha de plantio. A cobertura de solo predominante no inverno e no verão são as gramíneas espontâneas nativas do local. O pomar não é pastejado por animais, porém é irrigado.

2.5 Estratégias de avaliação da saúde do solo combinando CASH e 4QM

Devido à dificuldade de obtenção de dados de rendimento de cultura nas URPecans, em virtude de alguns pomares serem novos e ainda não produzirem nozes, foi necessário aplicar outra estratégia para interpretar a saúde do solo, com o intuito de pontuar indicadores que não dependam do rendimento da cultura. O primeiro passo foi desenvolver histogramas mostrando a distribuição de COT e da ASEA proposto por Moebius-Clune *et al.* (2016). A média e o desvio padrão foram usados para calcular as distribuições normais cumulativas (CND) para COT e ASEA. O CND representa funções de pontuação, pois fornecem para cada parâmetro pontuações em uma escala que varia de 0 a 100 (Moebius-Clune *et al.*, 2016). Dessa forma, com base no CND, foi possível definir valores de pontuação iguais a 50 como níveis críticos para COT e ASEA. A pontuação de 50% foi proposta por Chaer *et al.* (2023) e representa os valores mínimos aceitáveis de COT e ASEA. Valores abaixo desses limites seriam uma forte indicação de agroecossistemas de solo comprometidos tanto da perspectiva econômica quanto da saúde do solo.

Dessa forma, os pomares foram analisados utilizando a visualização gráfica dos quatro quadrantes, plotando o ASEA no eixo x e o COT no eixo y (Chaer *et al.*, 2023) (Figura 2). Os limiares COT e ASEA obtidos usando uma abordagem CASH foram usados para dividir o gráfico de dispersão ASEA vs. COT em quatro quadrantes. Os quadrantes 1 (alto COT/alta ASEA) e 3 (baixo COT/baixa ASEA) representam padrões estáveis de solos de alta e baixa qualidade (solos saudáveis e não saudáveis), respectivamente. Os quadrantes 2 e 4 (baixa ASEA/alto COT) e 4 (alta ASEA/ baixo COT) representam padrões de transição ou solos passando por degradação biológica (perda de C) e processos regenerativos (ganho de C), respectivamente.

Figura 2 - Modelo de quatro quadrantes (4QM)



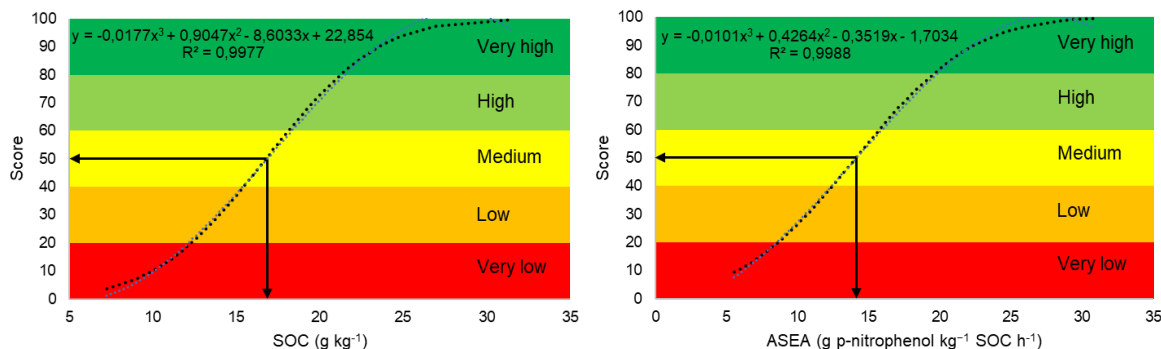
Fonte: Adaptado de Chaer *et al.*, (2023). Representação esquemática do modelo de quatro quadrantes para avaliar tendências de C usando a atividade enzimática específica média (ASEA) vs. carbono orgânico do solo (COT).

3 Resultados e Discussão

3.1 Avaliações de saúde do solo em pomares de nogueira-pecã combinando CASH e 4QM

Para avaliar a saúde do solo foi necessário combinar o modelo CASH e o 4QM. Nesse sentido, realizou-se a padronização dos dados de COT e ASEA a partir da derivação de pontuações interpretativas construindo histogramas individuais e funções de distribuição normal cumulativa (CND) usando valores de média e desvio padrão para COT e ASEA (Figura 3). Os limites estabelecidos para COT ($16,84 \text{ g kg}^{-1} \text{ solo}$) e ASEA ($14,14 \text{ g p-nitrophenol kg}^{-1} \text{ COT h}^{-1}$) foram equivalentes a uma pontuação de 50, definida como os valores mínimos aceitáveis de COT e ASEA, definindo os quatro quadrantes no gráfico de dispersão (Figura 3).

Figura 3 - Distribuição normal cumulativa (CND) para pontuação de carbono orgânico total do solo e atividade enzimática específica média (ASEA) em solos cultivados com noqueira-pecã localizados em diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul - RS



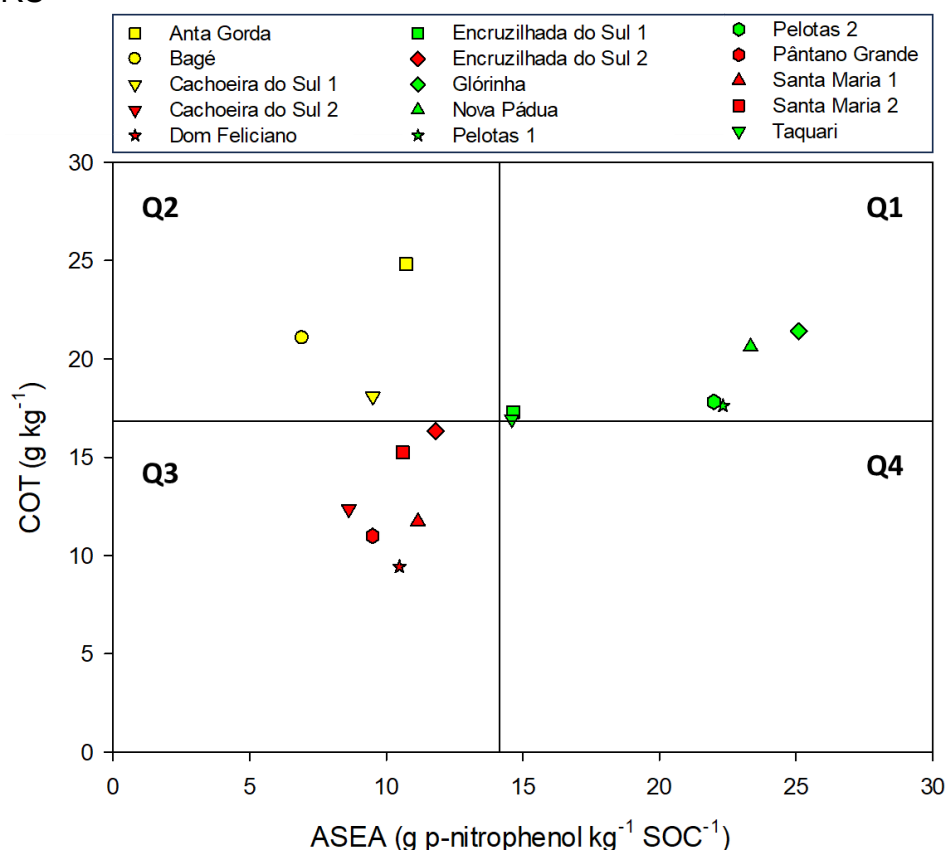
Fonte: Autora.

A distribuição dos pomares analisados no gráfico de 4QM é ilustrada tanto na figura 4 como na tabela 2. Os quadrantes 1 (alto COT/alta ASEA) e 3 (baixo COT/ baixa ASEA) representam padrões estáveis de solos saudáveis e não saudáveis, respectivamente. Os quadrantes 2 e 4 representam padrões de transição, adoecendo e em regeneração, respectivamente.

Como os pomares analisados neste estudo apresentaram muitas características distintas entre elas, não foi surpreendente que elas estivessem distribuídas em 3 quadrantes. No entanto, cabe ressaltar a ausência de pomares no Q4, que é um quadrante de transição (baixo COT/alto ASEA), que representa solos em regeneração. O Q4 indica que o solo está ganhando qualidade, apresentando alta atividade biológica e tendência de ganho de carbono. Dessa forma, o 4QM nos mostra que nenhum dos pomares analisados está em processo de regeneração do solo.

As informações de manejo adotadas nos pomares foram fundamentais, pois permitiram compreender de maneira abrangente a interação dos indicadores da qualidade do solo no ambiente e o impacto de uma determinada prática de manejo na qualidade e saúde do solo. Além disso, essas informações elucidam com maior clareza as boas práticas de manejo que resultam em benefícios, possibilitando que os agricultores as implementem eficazmente em suas culturas de noz-pecã. Desta forma, o conhecimento gerado contribui não apenas para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, mas também para o aumento da produtividade e a satisfação dos agricultores.

Figura 4 - Diagrama de dispersão entre carbono orgânico total do solo (COT) e atividade enzimática específica média (ASEA) de 15 pomares de nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul - RS



Fonte: Autora.

À exceção do pomar Pelotas 2 que não recebe adubação, todos os pomares usam fertilizantes químicos e/ou orgânicos. Dos seis pomares enquadrados no Q1, três deles, Pelotas 1 e Glorinha (adubados com fertilizantes orgânicos) e Pelotas 2 (instalado dentro de um SAF) são caracterizados por terem solos saudáveis e estáveis, com alto teor de COT e alta atividade enzimática. Estes resultados podem ser atribuídos ao uso de adubos orgânicos, bem como à auto-sustentabilidade do pomar instalado dentro do SAF, que se beneficia da diversidade de resíduos das culturas.

Consequentemente, além de aumentarem o teor de matéria orgânica, os adubos orgânicos têm vários nutrientes necessários para os vegetais e comunidades microbianas que regulam o ciclo do carbono. Resultados satisfatórios também foram encontrados em estudos envolvendo adubação orgânica na qualidade do solo e atividade enzimática (Wang *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2025). Dessa forma, Liu *et al.* (2024) avaliaram a

substituição total de fertilizantes químicos por fertilizantes orgânicos e descobriram que essa troca melhorou a qualidade do solo, aumentando os níveis de nutrientes do solo, promovendo assim a biomassa e a abundância microbiana, acelerando as reações bioquímicas do solo promovendo a liberação de enzimas extracelulares. Semelhante ao resultado de Wang *et al.* (2021), que constataram que a utilização do esterco aumentou as frações de carbono e nitrogênio do solo e a atividade enzimática.

Tabela 2- Distribuição dos pomares nos quatro quadrantes (Q1, Q2, Q3 e Q4)

Pomares	Quadrantes			
	Q1 ^a	Q2 ^b	Q3 ^c	Q4 ^d
Glórinha	x			
Nova Pádua	x			
Pelotas 1	x			
Pelotas 2	x			
Encruzilhada do Sul 1	x			
Taquari	x			
Anta Gorda		x		
Bagé		x		
Cachoeira do Sul 1		x		
Encruzilhada do Sul 2			x	
Santa Maria 1			x	
Santa Maria 2			x	
Cachoeira do Sul 2			x	
Pântano Grande			x	
Dom Feliciano			x	

Fonte: Autora. ^aPomar saudável; ^bPomar ficando doente; ^cPomar não saudável; ^dPomar em recuperação.

A noqueira-pecã integrada ao SAF leva a sistemas agroalimentares sustentáveis, com ganhos globais em COT e riqueza e diversidade nutricional (Cambareri *et al.*, 2023). Neste sentido, melhorias na qualidade do solo na cultura da noqueira-pecã em SAFs também foram constatadas em outros estudos, como o de Wang *et al.* (2022) do centro-leste da China, que descobriram que a atividade enzimática do cultivo de noz-pecã foi significativamente maior em SAF do que em monocultivo, bem como melhorou as propriedades físicas e químicas do solo. Ainda destacaram que a atividade das enzimas da superfície do solo está intimamente relacionada à distribuição de C, N e P do solo, confirmando o papel fundamental das enzimas do solo no ciclo dos nutrientes no ambiente.

No Q1 também se encontram os pomares de Nova Pádua, Encruzilhada do Sul 1 e Taquari, pomares bem distintos entre si, tanto em relevo, área do pomar, espaçamento entre as plantas, idade e manejo adotado. Considerando que, Taquari é o pomar mais antigo avaliado, com mais de 50 anos de idade, os autores Ding *et al.* (2024) e Slade e Wells (2022) destacam que a qualidade do solo melhora com a idade do pomar, devido ao acúmulo de biomassa vegetal que é devolvida ao solo a cada ano. Isso deve-se provavelmente, ao acúmulo de folhas e cascas das nozes que secam e caem no chão, trazendo uma quantidade considerável de material vegetal de volta ao solo, contribuindo para o aumento dos níveis de matéria orgânica observados em pomares de noqueira-pecã (Sial *et al.*, 2022). Segundo Slade e Wells (2022), o cultivo da noqueira-pecã pode ser utilizado como uma forma de melhorar a qualidade do solo de áreas anteriormente usadas para sistemas convencionais de cultivo em linha, e com isso, pode melhorar o solo ao longo do tempo. Além disso, os autores destacaram que o clima quente e úmido do sudeste dos Estados Unidos, favorece a decomposição da matéria orgânica, semelhante ao clima das áreas avaliadas neste estudo, onde, o Estado do Rio Grande do Sul apresenta clima temperado do tipo subtropical, classificado como Mesotérmico Úmido.

Ao contrário de Taquari e Encruzilhada do Sul, que possuem colinas e montes, o pomar de Nova Pádua situa-se em um relevo serrano, caracterizado por um solo bastante pedregoso, onde foram construídos patamares para viabilizar a implantação do pomar. Estes patamares são essencialmente

degraus largos escavados nas encostas das serras, que ajudam a reduzir a velocidade do escoamento da água da chuva, minimizando a erosão do solo (Tadese; Shiferaw, 2024). É uma técnica sustentável que proporciona mais acessibilidade para o manejo das nogueiras e é eficaz para a conservação do solo. Apesar do estresse gerado com a escavação que pode ser prejudicial para a estrutura do solo, foi observado em alguns estudos que essa técnica ajuda a manter a umidade no solo (Mesfin *et al.*, 2019; Tadese; Shiferaw, 2024; Jiao; Yang; Li, 2024). Além disso, o solo extremamente pedregoso presenciado no momento da coleta é algo que, segundo Pérez (1998), ajuda a manter a umidade do solo, reduzindo as perdas por evaporação, devido a interrupção da capilaridade pelas partículas grossas (pedras), que impedem o fluxo de água para a superfície (Borges *et al.*, 2014; Taye *et al.*, 2024).

A umidade adequada do solo promove condições favoráveis ao crescimento e atividade dos microrganismos. Dessa forma, as reações enzimáticas hidrolíticas ocorrem no meio aquoso, ou seja, realizam a hidrólise de ligações químicas usando água. Por isso, as enzimas BETA e ARIL são consideradas sensíveis à umidade do solo (Sobucki *et al.*, 2021). Neste sentido, a alta atividade enzimática e alto teor de MOS encontrados no pomar de Nova Pádua podem ser atribuídos a essa capacidade de retenção de umidade por meio do sistema de cultivo em patamares e a quantidade expressiva de rochas no solo, que auxilia no desenvolvimento das nogueiras como também das plantas espontâneas e o azevém cultivado para o pastejo das ovelhas. Bem como, explica a presença do pomar irrigado de encruzilhada do sul 1 no quadrante 1.

Cabe ressaltar que, apesar do pomar de Taquari e Encruzilhada do Sul 1 encontrarem-se no primeiro quadrante, eles estão muito próximos ao valor limite do Q1 com Q4 e o centro dos quadrantes, (COT: 16,9 kg⁻¹ solo; ASEA: 14,6 g p-nitrophenol kg⁻¹ COT h⁻¹) e (COT: 17,3 g kg⁻¹ solo; 14,6 g p-nitrophenol kg⁻¹ COT h⁻¹) respectivamente, o que indica uma região de transição pois o limite para COT é 16,84 g kg⁻¹ solo (eixo Y) e para ASEA é 14,14 g p-nitrophenol kg⁻¹ COT h⁻¹ (eixo X). O pomar de Taquari possivelmente pode estar em transição devido à ausência de um manejo adequado do solo, como o uso de plantas de cobertura que poderiam contribuir para o aumento de matéria orgânica e estimular a atividade enzimática do solo. Contudo,

recentemente passou a ser realizada a adubação orgânica no local, uma prática que, ao longo do tempo contribui para a melhoria da saúde do solo (Liu *et al.*, 2024). Já o pomar de Encruzilhada do Sul 1, apresenta um solo franco arenoso, que têm inerentemente uma baixa capacidade de formar agregados devido ao seu baixo teor de argila, restringindo sua capacidade de armazenar carbono do solo (Colunga *et al.*, 2025). Dessa forma, levando o solo à tendência a perda de carbono. Sabe-se que, quanto menores os teores de argila e de matéria orgânica, mais reduzida é a atividade biológica do solo. Porém, quando manejados adequadamente, garantindo elevado aporte de biomassa e evitando as perdas por erosão, solos arenosos com teores de matéria orgânica na camada de 0-10 cm superiores a 15 g kg⁻¹ (1,5%) podem apresentar níveis de atividade biológica comparáveis aos de solos argilosos (Mendes *et al.*, 2018a).

Observa-se que, todos os pomares que estão enquadrados no Q3 apresentam solo franco arenoso, com percentual médio de argila de 13,9%, silte 18,7% e areia 67,4%, o que atribui-se a essa restrição de armazenamento de carbono no solo franco arenoso, consequentemente tornando-os solos “doentes”. De acordo com Zhao e Naeth (2024), solos com alto teor de areia são suscetíveis à perda de nutrientes devido à sua baixa capacidade de retenção de cátions. Portanto, o uso de fertilizantes inorgânicos apresenta benefícios limitados, tornando o aumento da matéria orgânica do solo e a saúde do solo ainda mais importantes.

De acordo com Chaer *et al.* (2023), sob condições tropicais, os padrões estáveis observados em Q3 geralmente ocorrem em situações onde o mesmo uso e manejo do solo são praticados por mais de cinco anos em uma determinada área. Solos com estas características tendem a apresentar perda da resiliência (baixa capacidade de se recuperar de algum dano ou resistir ao estresse hídrico) e do potencial produtivo das culturas, especialmente em condição de estiagem.

Os pomares localizados em Encruzilhada do Sul e Cachoeira do Sul incluem áreas irrigadas e não irrigadas. As áreas não irrigadas (Encruzilhada do Sul 2 e Cachoeira do Sul 2) ficaram alocadas no Q3, enquanto as áreas irrigadas (Cachoeira do Sul 1 e Encruzilhada do Sul 1) foram plotadas no Q2 e Q1, respectivamente. Esses resultados indicam que a irrigação contribui para a

melhoria da qualidade do solo, não apenas mitigando os impactos de possíveis déficits hídricos, mas também criando condições que promovam a saúde do solo. Embora o Q2 represente solos em processo de degradação, onde o manejo já impactou a atividade enzimática e posteriormente reduzirá a MO, a irrigação pode estar reduzindo a velocidade da degradação do solo. Pois essa condição favorece a decomposição da matéria orgânica, contribuindo diretamente para formação de agregados e aumento do carbono orgânico do solo, mas é inegável que o solo está em processo de degradação, a menos que as boas práticas sejam intensificadas. Contudo, é importante atentar-se a alguns aspectos sobre a irrigação, conforme destacado por Zermeño-González *et al.* (2023) é essencial considerar diversos fatores específicos do pomar, como as taxas de evapotranspiração, o estágio de crescimento das plantas, as variações climáticas diárias e o teor de água no solo. Esses aspectos são cruciais para aumentar a eficiência no uso da água e evitar possíveis perdas na produção decorrentes de má drenagem no solo dos pomares de noz-pecã.

O Q2 indica que o solo está perdendo qualidade, resultando em baixa atividade biológica e tendência à perda de carbono no solo. No entanto, os pomares de Anta Gorda e Bagé presentes neste quadrante, possuem alta quantidade de COT ($24,8 \text{ g kg}^{-1}$ solo e $21,1 \text{ g kg}^{-1}$ solo respectivamente), que pode ser atribuído ao alto teor de argila nesses solos. A forte adsorção da matéria orgânica do solo (MOS) aos minerais protege-a da biodegradação por microrganismos, melhorando a agregação e a estrutura física do solo, reduzindo a mineralização. Solos de textura fina retém mais carbono, nitrogênio e água, promovendo melhores condições para as plantas, além de aumentar a biomassa e a atividade microbiana, em comparação com solos de textura grossa. Neste sentido, estudo de Mganga *et al.* (2024) indicou que solos com maior proporção de areia sugerem que a MOS é degradada mais rapidamente. Contudo, apesar da menor velocidade de biodegradação da MOS em função do alto teor de argila desses solos, o uso contínuo e persistente de práticas de manejo inadequadas resultará, ao longo do tempo, na perda de matéria orgânica, conforme indicado pela baixa ASEA.

Solos que estão adoecendo perdem atividade biológica, comprometendo assim a decomposição da MOS e resultando em menor retenção de carbono e nutrientes no solo. Porém, a mudança no teor de COT ocorre de forma mais

gradual se comparado às enzimas. Essa tendência à perda de carbono indicada pela presença destes pomares no Q2 possivelmente se deve pelo fato de Bagé ser um pomar “jovem”, recentemente implantado, com a deficiência de estrutura física do solo e com práticas de manejo do solo ainda não estabelecidas, como por exemplo o cultivo de plantas de cobertura, que promoveria maior adição de matéria orgânica. Semelhante ao caso do pomar de Anta Gorda, que também carece de manejo de plantas de cobertura, porém neste pomar a coleta da amostra do solo foi realizada após a chuva que atingiu fortemente essa região em maio de 2024, e pode ter influenciado a resultados de baixa atividade enzimática. No entanto, mostra a resiliência do solo em conservar o COT mesmo em situações extremas como esta, que degradou tanto o solo em algumas regiões do Estado do Rio Grande do Sul.

De acordo com Chaer *et al.* (2023), o modelo de quatro quadrantes é uma maneira simples de avaliar tendências de C no solo, baseando-se nas suposições de que a atividade específica média de BETA e ARIL (ASEA) muda mais rapidamente do que COT em resposta a mudanças nas práticas de manejo do solo, o que pôde ser observados nos resultados deste estudo. E somente com um longo período sem mudanças significativas no uso do solo as duas variáveis atingem um equilíbrio. A identificação deste momento pode servir como um alerta precoce para a degradação do COT e da qualidade do solo, permitindo a implementação de medidas, como práticas de conservação do solo e reposição de nutrientes, para mitigar a redução do COT. Em solos degradados (com baixo ASEA e baixo COT) no Q3, a adoção de melhores práticas de manejo resultará inicialmente em um aumento na ASEA, promovendo a transição para o Q4. Essa condição sugere antecipadamente que o solo está em um caminho de recuperação do COT, eventualmente levando à transição de Q4 para Q1 a longo prazo (Chaer *et al.*, 2023).

A avaliação de saúde do solo baseadas em ASEA e COT, utilizando a combinação de abordagens CASH e 4QM, revelaram tendências de deterioração e melhoria na saúde do solo em pomares de nogueira-pecã. Esses resultados evidenciam que, embora muitos pomares adotem boas práticas de manejo do solo, como o uso de plantas de cobertura, adubação e irrigação, é importante considerar outros aspectos, como o tipo de solo, a idade do pomar e fatores climáticos que podem interferir nos resultados relacionados

à saúde do solo. Além disso, é importante ressaltar que não há informações do histórico de manejo das áreas, apenas o manejo atual e esta análise permite acessar a memória do solo que nos dá um indicativo do histórico de uso e manejo do solo, permitindo assim, identificar diferenças biológicas que podem impactar a produtividade e a sustentabilidade do pomar.

Apesar disso, esse estudo mostrou que a adoção de boas práticas de manejo como plantas de cobertura, adubação orgânica, diversificação de plantas e também irrigação, trazem benefícios ao solo. Contudo, é importante considerar as particularidades de cada local, como por exemplo a utilização de patamares em regiões serranas, que se mostram fundamentais para conservação do solo. Essas práticas, aliadas a um manejo adaptado às condições específicas de cada região, contribuem para manutenção da qualidade e funcionalidade do solo a longo prazo. Assim como, a prática da adubação, onde os pomares orgânicos com aplicação de cama de aviário tanto na projeção da copa das plantas como em todo pomar, levou a melhorias na saúde do solo. Isso porque, a utilização deste insumo e adoção de práticas comuns em sistemas orgânicos, como as culturas de cobertura, controle biológico de pragas e doenças, biofertilizantes e bactérias promotoras de crescimento, têm o potencial de aumentar a atividade biológica e promover a saúde do solo, bem como, a manutenção ou o aumento da fertilidade a longo prazo.

É evidente a necessidade de estudos relacionados à saúde do solo em pomares de nogueira-pecã, assim como a necessidade de aprimoramento por parte dos agricultores na avaliação deste fator tão importante e na aplicação de técnicas para torná-lo saudável. Vale destacar que, das 15 áreas avaliadas, apenas 6 foram classificadas como saudáveis, sendo que 2 delas se encontram quase na linha de transição. Esse cenário demonstra que é possível produzir de forma sustentável, sem comprometer a funcionalidade ecológica do solo adotando práticas que promovam a conservação da vida no solo. Contudo, também ressalta-se a urgência de implementação de técnicas eficazes de manejo em muitas áreas.

Dessa forma, estes resultados são importantes tanto para a comunidade científica quanto para os agricultores. No primeiro caso, os pesquisadores podem direcionar suas pesquisas para a avaliação de ARIL, BETA e COT em

outras condições (por exemplo, tipos de solo e sistemas agrícolas) no Brasil e no mundo. A metodologia utilizada neste estudo para definir os limites críticos das propriedades microbiológicas pode ser implementada em outras condições. Por sua vez, os agricultores poderão incorporar análises microbianas e enzimáticas em sua avaliação do solo e, assim, corrigir o manejo e adotar práticas mais sustentáveis, incluindo cultivo de plantas de cobertura, adubação orgânica, diversificação de plantas e irrigação.

Conclusões

A integração entre CASH e o 4QM se mostrou eficiente para compreender a dinâmica envolvida no sistema produtivo da noz-pecã, permitindo distinguir os diferentes sistemas com base no manejo adotado, o que está diretamente relacionado com a saúde do solo. Essa combinação também foi fundamental para avaliar as tendências de ganho ou perda de carbono orgânico no solo.

Os pomares orgânicos, o de manejo agroflorestal e os que utilizam plantas de cobertura, sobretudo, demonstraram maior saúde do solo, evidenciado por altos níveis de COT e atividade enzimática. Além disso, a análise apontou solos doentes e em processo de degradação que necessitam de maior atenção e revisão das práticas de manejo do solo. Esse cenário reforça a importância de estudos da saúde do solo nos cultivos de noqueira-pecã e a necessidade de ampliar essa análise para outras culturas no Estado do Rio Grande do Sul.

Referências

ALBA, José Maria Filippini; WREGGE, Marcos Silveira; ALMEIDA, Ivan Rodrigues de; MARTINS, Carlos Roberto. INDICADORES DE SOLO E CLIMA PARA O CULTIVO DE NOGUEIRA-PECÃ NO SUL DO BRASIL: base para zoneamento edafoclimático. **A Face Transdisciplinar das Ciências Agrárias**, [S.L.], p. 31-42, 10 ago. 2021. Atena Editora. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.9172110085> Acesso em: 17 mar. 2025.

ALVARES, Clayton Alcarde *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507> Acesso em: 15 abr. 2025.

ANDREWS, Susan S.; KARLEN, Douglas L.; CAMBARDELLA, Cynthia A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 68, n. 6, p. 1945-1962, nov. 2004. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.1945> Acesso em: 17 mar. 2025.

BORGES, Tatyana Keyty de Souza *et al.* Effect of conservation practices on soil moisture and maize (*Zea mays* L.) cropping in the semi-arid northeast of Brazil. **Brazilian Journal of Soil Science**, [S.L.], v. 38, n. 6, p. 1862-1873, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832014000600021> Acesso em: 17 mar. 2025.

CAMBARERI, Gustavo *et al.* Contribution of pecan (*Carya illinoensis* [Wangenh.] K. Koch) to Sustainable Development Goal 2 under the dual perspective of carbon storage and human nutrition. **Frontiers In Soil Science**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 1-16, 14 abr. 2023. Frontiers Media SA. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fsoil.2023.1092003> Acesso em: 17 mar. 2025.

CARNEIRO, Roberto Guimarães; FIGUEIREDO, Cícero Célio de; MALAQUIAS, Juaci Vitoria; MENDES, Ieda Carvalho. A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 198, p. 105394, jun. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105394> Acesso em: 24 fev. 2025.

CHAER, Guilherme Montandon *et al.* Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 183, p. 104742, mar. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742> Acesso em: 17 mar. 2025.

COLUNGA, Samantha L.; WAHAB, Leila; CABO, Alejandro Fierro; PEREIRA, Engil. Carbon sequestration through conservation tillage in sandy soils of arid and semi-arid climates: a meta-analysis. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 245, p. 106310, jan. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2024.106310> Acesso em: 17 mar. 2025.

DING, Weiting *et al.* Ground cover management enhances soil extracellular enzyme activities across Chinese orchards. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 372, p. 123425, dez. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123425> Acesso em: 17 mar. 2025.

JIAO, Wenjun; YANG, Xiao; LI, Yuwei. Traditional knowledge's impact on soil and water conservation in mountain agricultural systems: a case study of shexian dryland stone terraced system, china. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 159, p. 111742, fev. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111742> Acesso em: 17 mar. 2025.

KUNITO, Takashi *et al.* Microbial synthesis of arylsulfatase depends on the soluble and adsorbed sulfate concentration in soils. **European Journal Of Soil Biology**, [S.L.], v. 111, p. 103418, jul. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103418> Acesso em: 17 mar. 2025.

LIU, Yan *et al.* Manure replacement of chemical fertilizers can improve soil quality in the wheat-maize system. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 200, p. 105453, ago. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105453> Acesso em: 17 mar. 2025.

LOPES, André Alves de Castro *et al.* Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 77, n. 2, p. 461-472, 25 fev. 2013. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2012.0191> Acesso em: 17 mar. 2025.

MENDES, I.C., SOUSA, D.M.G., REIS JUNIOR, F.B., LOPES, A.A. Bioanálise do solo: Como interpretar a saúde do solo. Planaltina: Embrapa Cerrados; 2018a. (Circular técnica 38).

MENDES, Iêda Carvalho *et al.* Soil health assessment and maintenance in Central and South-Central Brazil. **Burleigh Dodds Series In Agricultural Science**, [S.L.], p. 379-416, 6 ago. 2018b. Burleigh Dodds Science Publishing. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19103/as.2017.0033.35> Acesso em: 18 mar. 2025.

MENDES, Iêda Carvalho, *et al* 2019a. Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. *Tópicos Ci. Solo* 10, 1–64.

MENDES, Iêda Carvalho *et al.* Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**. 139, 85–93, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025> Acesso em: 18 mar. 2025.

MENDES, Iêda Carvalho *et al.* Soil quality and grain yield: a win*win combination in clayey tropical oxisols. **Geoderma**, [S.L.], v. 388, p. 114880, abr. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114880> Acesso em: 18 mar. 2025.

MESFIN, Shimbahri *et al.* Spatial Variability of Soil Moisture in Newly Implemented Agricultural Bench Terraces in the Ethiopian Plateau. **Water**, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 2134, 14 out. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11102134> Acesso em: 17 mar. 2025.

MGANGA, Kevin Z.; ROLANDO, José; KALU, Subin; KARHU, Kristiina. Microbial soil quality indicators depending on land use and soil type in a semi-arid dryland in Kenya. **European Journal Of Soil Biology**, [S.L.], v. 121, p. 103626, jun. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103626> Acesso em: 17 mar. 2025.

MOEBIUS-CLUNE, BN *et al.* Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edição 3.2, Cornell University, Genebra, NY. 134p. Disponível em: <https://soilhealth.cals.cornell.edu/manual/> Acesso em 17 mar. 2025.

MÓL, Paula Chequer Gouveia *et al.* β -glucosidase: an overview on immobilization and some aspects of structure, function, applications and cost. **Process Biochemistry**, [S.L.], v. 130, p. 26-39, jul. 2023. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2023.03.035> Acesso em: 17 mar. 2025.

NUNES, MR *et al.* O protocolo de avaliação da saúde do solo e avaliação aplicada ao carbono orgânico do solo. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 85 (4), 2021. 1196–1213. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.20244> Acesso em: 17 mar. 2025.

PAWLOWSKI, Estéfany *et al.* Relationships between yield, enzymatic activity, and chemical properties across different soil layers and phenological stages of grapevines in southern Brazil. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 204, p. 105732, dez. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105732> Acesso em: 17 mar. 2025.

PÉREZ, Francisco L. Conservation of soil moisture by different stone covers on alpine talus slopes (Lassen, California). **Catena**, [S.L.], v. 33, n. 3-4, p. 155-177, nov. 1998. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0341-8162\(98\)00091-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0341-8162(98)00091-5) Acesso em: 17 mar. 2025.

POLETO, Tales *et al.* Morphological, chemical and genetic analysis of southern Brazilian pecan (*Carya illinoensis*) accessions. **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 261, p. 108863, fev. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108863> Acesso em: 17 mar. 2025.

RODRIGUEZ-RAMOS, Jean C. *et al.* Cover crops enhance resource availability for soil microorganisms in a pecan orchard. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 337, p. 108049, out. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2022.108049> Acesso em: 17 mar. 2025.

SANTOS, H. G. dos. *et al.* 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos> Acesso em: 17 mar. 2025.

SIALL, Tanveer Ali *et al.* Addition of walnut shells biochar to alkaline arable soil caused contradictory effects on CO₂ and N₂O emissions, nutrients availability, and enzymes activity. **Chemosphere**, [S.L.], v. 293, p. 133476, abr. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133476> Acesso em: 17 mar. 2025.

SIEBENEICHLER, Tatiane Jéssica *et al.* Influence of cultivar on quality parameters of pecans produced in Southern Brazil. **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 336, p. 113423, out. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113423> Acesso em: 17 mar. 2025.

SLADE, Hunter; WELLS, Lenny. Soil Quality Enhancement with Orchard Age in Pecan Orchards of the Southeastern U.S. Coastal Plain. **Hortscience**, [S.L.], v. 57, n. 9, p. 1099-1105, set. 2022. American Society for Horticultural Science. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21273/hortsci16685-22> Acesso em: 17 mar. 2025.

SOBUCKI, Lisiane *et al.* Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. **Brazilian Journal of Soil Science**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 1-18, out. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbcs20210109> Acesso em: 17 mar. 2025.

SOBUCKI, Lisiane *et al.* Critical limits for microbiological properties and soil quality in a subtropical Acrisol in southern Brazil. **Geoderma Regional**, [S.L.], v. 38, p. 1-10, set. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00832> Acesso em: 17 mar. 2025.

STOTT, D. E. *et al.* Evaluation of β -Glucosidase Activity as a Soil Quality Indicator for the Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 74, n. 1, p. 107-119, jan. 2010. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2009.0029> Acesso em: 17 mar. 2025.

SUI, Xin *et al.* Contrasting seasonal effects of legume and grass cover crops as living mulch on the soil microbial community and nutrient metabolic limitations. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 380, p. 109374, mar. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2024.109374> Acesso em: 17 mar. 2025.

TABATABAI, MA. 1994. Soil enzymes. Microbiological and Biochemical Properties- SSSA Book Series, no. 5. **Soil Science Society of America**. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Methods of Soil Analysis, Part 2. p. 778-833.

TADESE, Gezahagn; SHIFERAW, Aneteneh. Effect of Bench Terraces on Selected Soil Physico Chemical Properties in Andit Tid Watershed, North Shoa, Ethiopia. **Frontiers**, [S.L.], v. 1, n. 4, p. 8-16, 8 jan. 2024. Science Publishing Group. <http://dx.doi.org/10.11648/j.frontiers.20240401.12> Acesso em: 17 mar. 2025.

TAYE, Gebeyehu *et al.* Impact of soil and water conservation structures on the spatial variability of topsoil moisture content and crop productivity in semi-arid Ethiopia. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 238, p. 105998, maio 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2023.105998> Acesso em: 17 mar. 2025.

TEDESCO J. M. *et al.* Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5). Disponível em: https://rolas.cnpt.embrapa.br/arquivos/manual_rolas.pdf Acesso em: 25 mar. 2025.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* Densidade do solo. In: TEIXEIRA, P. C. *et al.* Manual de Métodos de Análise de Solo. 3ª Edição Revisada e Ampliada. Brasília, DF: EMBRAPA, Capítulo 7, p. 65-75. 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209> Acesso em: 17 mar. 2017.

WANG, Jun *et al.* Responses of soil bacterial community and enzyme activity to organic matter components under long-term fertilization on the Loess Plateau of China. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 166, p. 103992, out. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103992> Acesso em: 17 mar. 2025.

WANG, Zhaocheng *et al.* Pecan agroforestry systems improve soil quality by stimulating enzyme activity. **PeerJ**, [S.L.], v. 10, p. 1-19, 4 jan. 2022. PeerJ. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.12663> Acesso em: 17 mar. 2025.

WALKLEY, A. e BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 29-38, jan. 1934. Ovid

Technologies (Wolters Kluwer Health). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003> Acesso em: 17 mar. 2025.

WOLLMANN, Cássio Arthur; GALVANI, Emerson. CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA REGIONAL DO RIO GRANDE DO SUL: dos estudos estáticos ao entendimento da gênese. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.L.], v. 11, p. 87-103, 31 dez. 2012. ABClima (Brazilian Association of Climatology). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v11i0.28586> Acesso em: 15 abr. 2025.

XU, Yinan *et al.* Organic fertilizer substitution increased soil organic carbon through the association of microbial necromass C with iron oxides. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 248, p. 106402, Maio 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2024.106402> Acesso em: 17 mar. 2025.

ZHAO, Yihan; NAETH, M Anne. Synergistic effects of coal waste derived humic substances and inorganic fertilizer as soil amendments for barley in sandy soil. **Heliyon**, [S.L.], v. 10, n. 8, p. 1-7, abr. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29620> Acesso em: 4 mar. 2025.

ZERMEÑO-GONZÁLEZ, A. *et al.* Determination of the Water use Efficiency of a Pecan Nut Orchard based on the Irrigation Scheduling and the Evapotranspiration Rate in Northern Mexico. **The Open Biotechnology Journal**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 1-9, 16 ago. 2023. Bentham Science Publishers Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2174/18740707-v17-230810-2023-11> Acesso em: 20 mar. 2025.

Considerações finais

A integração das metodologias CASH e 4QM foi eficiente para avaliar a saúde do solo nos pomares. Sistemas orgânicos, agroflorestais e com plantas de cobertura mostraram maior saúde do solo, confirmando a segunda hipótese do estudo. Além disso, a análise apontou solos em processo de degradação que requerem revisão nas práticas de manejo.

As análises multivariadas mostraram que há uma variabilidade do manejo dentro de cada pomar, o que prejudicou a verificação da primeira hipótese. O manejo de correção do pH mostrou-se importante, especialmente com variáveis associadas à fertilidade, como Ca, CTC e saturação de bases. Os indicadores biológicos COT e RB tiveram maior destaque diante das demais variáveis químicas e físicas. COT e BETA se correlacionam positivamente com a maioria dos macro e micronutrientes e CTC, mostrando sua influência nos processos de ciclagem de nutrientes e fertilidade.

Além disso, COT, RB e CBM demonstram ser influenciados pelo tipo de solo e pelas práticas de manejo. Pomares em solos mais arenosos e com manejo não conservacionista, apresentam menor COT, RB e CBM, refletindo em perda de fertilidade e menor dinamismo do solo. Assim como, os maiores valores de quocientes foram em pomares com manejos de plantas de cobertura, sistema agroflorestal e pastejo de animais, sendo esse aporte de resíduos orgânicos que influenciou a maior eficiência dos microrganismos na transformação da matéria orgânica em nutrientes disponíveis no solo.

Anexo 1: Caracterização química da camada 0,00 - 0,10 m do solo de pomares de noqueira-pecã localizados em diferentes regiões do RS

Pomares	pH	MO (%)	P (mg dm ⁻³)	K (mg dm ⁻³)	Ca cmol _c .dm ⁻³	Mg cmol _c .dm ⁻³	S mg.dm ⁻³	Zn mg.dm ⁻³	Cu mg.dm ⁻³	Mn mg.dm ⁻³	B mg.dm ⁻³	H+Al cmol _c .dm ⁻³	CTC cmol _c .dm ⁻³	Soma de bases cmol _c .dm ⁻³	Saturação de bases (V%)
Anta Gorda	6,54	4,39	428,65	528,23	15,24	12,39	24,68	141,43	15,94	19,50	1,31	3,10	32,00	28,90	89,15
Bagé	6,49	3,48	10,75	82,45	21,01	8,90	13,03	5,85	1,06	18,00	0,70	2,63	32,78	30,13	92,28
Cachoeira do Sul 1	6,36	2,89	72,20	276,83	9,58	3,32	11,23	19,18	2,04	22,75	0,82	2,73	16,33	13,60	83,00
Cachoeira do Sul 2	6,07	2,05	37,50	134,33	6,20	2,62	7,65	9,11	0,91	12,75	0,69	2,88	12,03	9,18	76,50
Dom Feliciano	5,42	1,57	22,63	58,13	3,41	1,01	6,13	2,06	0,70	25,75	0,46	3,40	7,95	4,55	57,88
Encruzilhada do Sul 1	6,31	3,11	45,65	411,58	6,91	2,42	10,85	7,84	0,58	22,25	0,87	2,43	12,80	10,35	81,53
Encruzilhada do Sul 2	6,51	2,64	32,23	204,83	7,27	2,49	9,33	6,75	0,47	14,75	1,01	1,75	12,03	10,28	85,45
Glorinha	5,21	3,7	9,13	108,85	4,27	3,18	17,83	7,79	2,99	34,50	0,61	6,80	14,55	7,75	53,38
Nova Pádua	6,23	3,18	64,13	250,23	14,32	5,87	9,25	71,41	40,39	28,00	0,77	2,60	23,43	20,83	88,40
Pântano Grande	5,85	1,6	29,45	140,60	4,89	2,10	10,15	8,15	3,88	60,00	0,63	2,93	10,30	7,35	70,60
Pelotas 1	5,77	3,09	148,38	113,18	6,64	2,41	9,53	3,62	3,35	13,50	0,60	3,38	12,68	9,35	73,55
Pelotas 2	5,42	3,13	9,68	94,95	5,34	2,00	9,88	3,34	1,77	48,25	0,61	4,90	12,50	7,55	59,98
Santa Maria 1	6,42	2,65	115,55	192,03	9,29	2,57	8,86	12,31	2,40	11,75	0,66	2,30	14,65	12,35	84,13
Santa Maria 2	5,97	2,11	23,53	96,45	5,08	2,84	8,50	14,94	1,81	33,00	0,71	2,75	10,93	8,15	74,80
Taquari	6,38	3,33	75,05	348,60	15,51	4,10	13,18	22,53	2,85	10,25	0,76	2,58	23,10	20,50	88,85

Fonte: Autora. O valor das variáveis para cada pomar corresponde a média das quatro amostras analisadas de cada pomar.

Anexo 2: Caracterização granulométrica e enzimática da camada 0,00 - 0,10 m do solo de pomares de nogueira-pecã localizados em diferentes regiões do RS

Pomares	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	β -glicosidase (μg de p-nitrofenol g de solo ⁻¹ hora ⁻¹)	Arilsulfatase (μg de p-nitrofenol g de solo ⁻¹ hora ⁻¹)
Anta Gorda	47,6	36,9	15,5	129,07	398,98
Bagé	25,1	28,6	46,3	79,42	214,54
Cachoeira do Sul 1	18,5	28,8	52,7	97,67	257,43
Cachoeira do Sul 2	16	13,4	70,6	75,13	137,57
Dom Feliciano	9,8	14,1	76,2	44,43	144,96
Encruzilhada do Sul 1	14,2	16,2	69,7	140,16	352,54
Encruzilhada do Sul 2	13,7	20,5	65,8	105,94	255,88
Glorinha	24,6	25,4	50	95,42	980,56
Nova Pádua	22,3	32,0	45,7	177,53	766,08
Pântano Grande	14,5	22,6	62,9	70,24	139,47
Pelotas 1	19,5	23,8	56,7	143,59	644,92
Pelotas 2	15,5	21,9	62,6	113,47	647,94
Santa Maria 1	15,1	20,2	64,7	85,18	170,95
Santa Maria 2	9,8	13,7	76,5	121,48	196,75
Taquari	26,4	37,5	36,1	77,76	406,77

Fonte: Autora. O valor das variáveis para cada pomar corresponde a média das quatro amostras analisadas de cada pomar.