

OZIEL CEREJA NEVES

**CONTRIBUIÇÃO DE SISTEMAS DE CULTIVOS PRÉVIOS AO MILHO NA SAÚDE
DE UM ARGISSOLO SUBTROPICAL**

Botucatu

2026

OZIEL CEREJA NEVES

**CONTRIBUIÇÃO DE SISTEMAS DE CULTIVOS PRÉVIOS AO MILHO NA SAÚDE
DE UM ARGISSOLO SUBTROPICAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientador: João de Andrade Bonetti

Botucatu

2026

N518c	Neves, Oziel Contribuição de sistemas de cultivos prévios ao milho na saúde de um Argissolo subtropical / Oziel Neves. -- Botucatu, 2026 82 p. : il., tabs., fotos, mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: João Bonetti 1. Saúde do solo. 2. Culturas de cobertura. 3. SMAF. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Dados fornecidos pelo autor(a).



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CONTRIBUIÇÃO DE SISTEMAS DE CULTIVOS PRÉVIOS AO MILHO E PROPRIEDADES FÍSICAS E SAÚDE DE UM AGRISSELO

AUTOR: OZIEL CEREJA NEVES

ORIENTADOR: JOÃO DE ANDRADE BONETTI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Agricultura), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOÃO DE ANDRADE BONETTI (Participação Presencial)
Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA



Documento assinado digitalmente
DANIEL PEREIRA PINHEIRO
Data: 25/02/2026 10:31:34-0300
Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

Prof.Dr. DANIEL PEREIRA PINHEIRO (Participação Virtual)
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) / Capanema/PA

Prof. Dr. MOACIR TUZZIN DE MORAES (Participação Presencial)
Departamento de Ciência do Solo / Universidade de São Paulo - Esalq

Botucatu, 23 de fevereiro de 2026.

*Aos meus amados pais (Ozias e Roseli) e avós
(Gregório, Renil e Livaldina),*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde, paz, alegria, forças e capacidade para seguir firme e confiante na caminhada da vida.

Aos meus pais Ozias Ferreira Neves e Roseli Modesto Cereja, pelo apoio incondicional, por acreditarem em mim, por serem minha fonte de inspiração e exemplo de seres humanos batalhadores, sempre me incentivando a ir mais longe. Sem vocês esse sonho não seria possível, por isso, essa conquista também é de vocês.

Aos meus avós maternos Gregório Cereja e Renil Modesto e minha avó paterna Livaldina Ferreira, agradeço pelo amor e carinho que sempre me deram, pelo cuidado com a nossa família, por me incentivarem a estudar e por serem exemplo de vida e de superação.

A todos os membros da família Cereja e da família Neves, que sempre torceram por mim e, através da nossa convivência e comunhão, me inspiraram e incentivaram a ser melhor, como pessoa e como profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João de Andrade Bonetti, pela paciência, profissionalismo e inestimável contribuição com a minha formação.

À minha namorada Jéssica Bezerra, pelo infinito apoio e torcida no desenvolvimento dessa dissertação, assim como, por todo carinho, afeto e paciência comigo, nessa importante etapa da minha vida.

Aos meus colegas de pós-graduação: Olavo, Nadiele, Lucas J., Lucas H., Ana Paula, Erica, Francimalba, Mari C. e Cristiano que através desse período se tornaram amigos com os quais pude contar para tornar essa jornada menos difícil. Sou grato por tudo e desejo tudo de bom para vocês.

Ao grupo de pesquisa Tropical Soil Health: Lucas C., Guilherme G, Guilherme V., Victor H., Maria, Gabriel, Henrique, Douglas V., e Letícia.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Campus Botucatu/SP e ao Programa de pós-graduação em Agronomia (Agricultura) pela oportunidade e suporte no curso de Mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de financiamento 001.

“Até aqui me ajudou o Senhor”.

(1 Samuel 7:12)

RESUMO

O uso de culturas de cobertura pode melhorar a funcionalidade do solo e favorecer a sustentabilidade de sistemas agrícolas. O presente estudo avaliou a contribuição de diferentes culturas de cobertura, conduzidas em sucessão ao milho, sobre a saúde do solo e produtividade de grãos de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob clima subtropical. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos ao acaso, com três repetições e doze tratamentos, compostos por onze espécies de culturas de cobertura e uma área em pousio. Foram avaliados atributos físicos do solo, indicadores químicos e biológicos, produção de biomassa aérea e radicular das culturas de cobertura, comprimento e volume de raízes, produtividade de grãos de milho e o índice de saúde do solo calculado pelo *Soil Management Assessment Framework*. Entre os indicadores isolados, a densidade do solo e a atividade da β -glicosidase foram responsivas às culturas de cobertura, indicando alterações na condição física e na funcionalidade biológica do solo, enquanto os demais atributos não apresentaram sensibilidade no período avaliado. Em contraste, o índice de saúde do solo demonstrou maior capacidade de discriminação entre os sistemas de cultivo, evidenciando que a integração de indicadores permite detectar alterações funcionais não plenamente capturadas pela análise individual dos atributos. As culturas de cobertura diferiram quanto ao desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular, refletindo estratégias funcionais distintas entre as espécies. A produtividade de grãos de milho foi influenciada pelas espécies antecessoras, com maiores rendimentos após *P. glaucum*, *M. pruriens*, *F. esculentum*, *U. brizantha* e *C. spectabilis*, enquanto o pousio apresentou menor desempenho produtivo. Conclui-se que o cultivo de culturas de cobertura pode influenciar atributos do solo e o desempenho agrônômico do milho, sendo a avaliação integrada da saúde do solo uma abordagem mais sensível para interpretar os efeitos do manejo em curto prazo.

Palavras-chave: culturas de cobertura; saúde do solo; SMAF; densidade do solo; β -glicosidase; produtividade do milho.

ABSTRACT

The use of cover crops can improve soil functionality and contribute to the sustainability of agricultural systems. This study evaluated the contribution of different cover crops grown before maize to soil health and maize grain yield in a subtropical Ultisol. The experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications and twelve treatments, consisting of eleven cover crop species and one fallow area. Soil physical attributes, chemical and biological indicators, shoot and root biomass production of cover crops, root length and volume, maize grain yield, and the soil health index calculated using the Soil Management Assessment Framework were evaluated. Among the individual indicators, bulk density and β -glucosidase activity were responsive to cover crops, indicating changes in soil physical condition and biological functionality, whereas the other attributes showed no sensitivity during the evaluation period. In contrast, the soil health index showed greater ability to discriminate among cropping systems, demonstrating that the integration of indicators allows the detection of functional changes that are not fully captured by the individual analysis of soil attributes. Cover crops differed in shoot and root system development, reflecting distinct functional strategies among species. Maize grain yield was influenced by the preceding cover crop species, with higher yields observed after *P. glaucum*, *M. pruriens*, *F. esculentum*, *U. brizantha*, and *C. spectabilis*, whereas fallow showed the lowest productive performance. The study concludes that cover cropping can influence soil attributes and maize agronomic performance, and that integrated soil health assessment is a more sensitive approach for interpreting short-term management effects.

Keywords: cover crops; soil health; SMAF; bulk density; β -glucosidase, maize yield.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização da área experimental.....	33
Figura 2 – Gráfico climatológico referente ao período de condução do experimento em Botucatu (SP)	35
Figura 3 – Índice de qualidade do solo (IQS) após o cultivo de culturas de cobertura e milho acessado pela ferramenta SMAF referente as camadas de 0,00-0,10 m (A) e 0,10-0,20 m (B).....	53
Figura 4 – Produtividade de grãos de milho (kg ha^{-1}) cultivado após a aplicação das práticas de cobertura de solo.....	55
Figura 5 – Produtividade de biomassa seca da parte aérea das culturas de cobertura (kg ha^{-1})	56
Figura 6 – Produção de biomassa seca das raízes das culturas de cobertura (kg ha^{-1})	57
Figura 7 – Análise da raiz através do WinRhizo.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo antes da implantação do experimento.....	34
Tabela 2 – Descritivos das plantas utilizadas.....	36
Tabela 3 – Classes e códigos utilizados para obtenção do índice de saúde do solo com a ferramenta.....	41
Tabela 4 – Códigos utilizados para obtenção do índice de saúde do solo com a ferramenta SMAF.....	41
Tabela 5 – Valores de densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (Pot) nas camadas 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m, após o cultivo de culturas de cobertura.....	47
Tabela 6 – Valores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio nas camadas 0,0 – 0,1 m e 0,1-0,2 m, após cultivo de culturas de cobertura.....	50
Tabela 7 – Valores de carbono orgânico do solo e atividade da enzima β -glicosidase (BGL), após cultivo de culturas de cobertura	51
Tabela 8 – Resumo da análise de variância para o índice de saúde do solo (IQS) nas camadas 0,00 – 0,10 m; 0,10 – 0,20 m.	52
Tabela 9 – Comprimento e volume de raízes de culturas de cobertura.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos e Hipóteses	23
1.1.2	Hipóteses.....	23
1.1.3	Objetivo geral.....	23
1.1.4	Objetivos específicos	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	Culturas de cobertura	24
2.2	Saúde do solo	25
2.3	Impacto das culturas de cobertura nos atributos do solo	26
2.3.1	Efeitos nos atributos físicos	26
2.3.2	Efeitos nos atributos químicos.....	27
2.3.3	Efeitos nos atributos biológicos.....	28
2.4	Culturas de cobertura em rotação com milho.....	29
2.5	Avaliação integrada da saúde do solo.....	30
2.5.1	Soil Management Assessment Framework (SMAF).....	31
2.5.2	Aplicação do SMAF em sistemas com culturas de cobertura e culturas anuais.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	Condições experimentais.....	33
3.2	Delineamento experimental	36
3.3	Variáveis analisadas	36
3.3.1	Propriedades físicas	36
3.3.1.1	Densidade do solo	37
3.3.1.2	Macroporosidade do solo	37
3.3.1.3	Porosidade total do solo	38
3.3.1.4	Microporosidade do solo	38
3.3.2	Propriedades químicas.....	38
3.3.2.1	Fósforo.....	38
3.3.2.2	pH	39
3.3.2.3	Potássio, Cálcio e Magnésio.....	39
3.3.3	Propriedades biológicas	39
3.3.3.1	Carbono orgânico do solo	39
3.3.3.2	β -glicosidase	40
3.3.4	Determinação dos índices de saúde do solo pelo SMAF	40
3.3.5	Avaliações das culturas de cobertura.....	42
3.3.5.1	Biomassa seca da parte aérea	42
3.3.5.2	Biomassa seca de raiz.....	43
3.3.6	Produtividade de grãos de milho	44
3.4	Análise estatística.....	44
4	RESULTADOS	45
4.1	Atributos físicos do solo	45
4.2	Atributos químicos do solo.....	48
4.3	Atributos biológicos do solo	51
4.4	Saúde do solo acessada pelo índice SMAF.....	52
4.5	Produtividade de grãos de milho	54
4.6	Produtividade de biomassa seca da parte aérea das culturas de cobertura	56
4.7	Avaliações radiculares	57

4.7.1	Biomassa seca radicular das culturas de cobertura.....	57
4.7.2	Comprimento e volume de raízes	58
5	DISCUSSÃO	61
5.1	Atributos do solo após o cultivo de culturas de cobertura	61
5.2	Saúde do solo acessada pelo índice SMAF	63
5.3	Produção de biomassa e desenvolvimento radicular das culturas de cobertura.....	65
5.4	Produtividade de grãos de milho.....	68
6	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A intensificação dos sistemas agrícolas nas últimas décadas tem sido acompanhada por crescentes preocupações relacionadas à degradação do solo em regiões tropicais, onde elevada temperatura, umidade, ciclos intensos de umedecimento e secagem e manejo mecanizado frequente tornam o solo suscetível à degradação estrutural (Hamza; Anderson, 2005; Lal, 2015; Zhang *et al.*, 2024).

Entre os principais impactos associados a esse processo, destacam-se o aumento da densidade do solo, a redução da macroporosidade, a limitação ao crescimento radicular e a diminuição da funcionalidade do sistema solo–planta, com reflexos diretos na sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Apoorva; Kundlas, 2024).

Nesse contexto, o uso de culturas de cobertura tem sido amplamente reconhecido como uma das principais estratégias para a mitigação da degradação do solo e para a promoção de sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis (García-González *et al.*, 2018). As culturas de cobertura atuam por meio de múltiplos mecanismos, incluindo a proteção física da superfície do solo, o aporte de resíduos vegetais, o estímulo à atividade biológica e a modificação da estrutura física por meio do crescimento radicular.

Além dos efeitos físicos, as culturas de cobertura influenciam de forma integrada os atributos químicos e biológicos do solo. O aporte de resíduos vegetais contribui para o aumento do carbono orgânico do solo, enquanto a diversidade de exsudatos radiculares estimula a biomassa microbiana e a atividade enzimática, elementos centrais para a ciclagem de nutrientes e para a manutenção da saúde do solo (Quintarelli *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2024).

Esses processos reforçam a interdependência entre atributos físicos, químicos e biológicos, evidenciando que a avaliação isolada de propriedades do solo pode ser insuficiente para compreender plenamente os efeitos das práticas de manejo (Karlen *et al.*, 1997). O conceito de saúde do solo emerge nesse cenário como uma abordagem integradora, definida como a capacidade do solo de funcionar como um sistema vivo, sustentando a produtividade biológica, a qualidade ambiental e a saúde dos ecossistemas ao longo do tempo (Doran & Zeiss, 2000; Lehmann *et al.*, 2020).

A mensuração da saúde do solo permanece um desafio científico, especialmente em ambientes agrícolas tropicais, caracterizados por elevada variabilidade espacial e temporal (Crow *et al.*, 2023). Para superar essa limitação,

diversas metodologias têm sido testadas com o objetivo de sintetizar múltiplos indicadores em índices interpretáveis de saúde do solo, como o *Soil Health Assessment Protocol and Evaluation* (SHAPE) (Nunes *et al.*, 2021), *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) (Andrews; Karlen; Cambardella, 2004). O SMAF destaca-se por sua robustez conceitual e aplicabilidade em sistemas agrícolas diversificados, integrando indicadores físicos, químicos e biológicos por meio de funções de pontuação padronizadas, ajustadas às condições edafoclimáticas e ao uso do solo, gerando índices que refletem a funcionalidade do sistema solo sob diferentes práticas de manejo (Andrews; Karlen; Cambardella, 2004; Cherubin; Tormena; Karlen, 2017).

Apesar do crescente número de estudos que avaliam os efeitos de culturas de cobertura sobre atributos individuais do solo (Blanco-Canqui; Ruis, 2020; Finney; Buyer; Kaye, 2017; Haruna; Nkongolo, 2019; Hudek *et al.*, 2022; Weerasekara *et al.*, 2017), ainda são limitadas as investigações que integram um amplo conjunto de espécies de culturas de cobertura, avaliadas sob as mesmas condições edafoclimáticas, e que utilizam abordagens integradas de saúde do solo, especialmente em sistemas tropicais conduzidos em rotação com milho.

Além disso, os efeitos das culturas de cobertura sobre a estrutura do solo tendem a apresentar forte dependência temporal, variando entre períodos imediatamente após o cultivo das coberturas e após a sucessão com culturas comerciais, como o milho (Haruna *et al.*, 2023; Hubbard *et al.*, 2013; Koudahe *et al.*, 2022).

Nesse contexto, torna-se fundamental avaliar, de forma integrada e temporal, os efeitos de diferentes espécies de culturas de cobertura em rotação com culturas de grãos, como o milho, sobre a saúde do solo como um todo. Essa abordagem permite compreender não apenas os efeitos imediatos das culturas de cobertura, mas também a persistência dessas alterações após o cultivo da cultura subsequente, fornecendo subsídios científicos para o aprimoramento de estratégias de manejo do solo em sistemas agrícolas tropicais.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes culturas de cobertura, conduzidas em sucessão com o milho, sobre a saúde do solo, acessada por meio do *Soil Management Assessment Framework*, em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

1.2 Objetivos e hipóteses

1.2.1 Hipóteses

- I) O cultivo de culturas de cobertura promove melhorias nos atributos físicos e no índice de saúde do solo em curto período, especialmente nas camadas superficiais;
- II) O cultivo de gramíneas em curto período favorece a melhoria da qualidade física do solo, em função do elevado desenvolvimento do sistema radicular e da produção de biomassa;
- III) A maior produção de biomassa de parte aérea e radicular das culturas de cobertura contribui para o aumento da produtividade do milho, em função das melhorias nos atributos físicos e biológicos do solo.

1.2.2 Objetivo geral

Avaliar a contribuição em curto prazo do cultivo de culturas de cobertura sobre a saúde do solo, bem como a produtividade de grãos de milho, em um Argissolo Vermelho-Amarelo em clima subtropical.

1.2.3 Objetivos específicos

- I) Avaliar os efeitos em curto prazo de cultivo de culturas de cobertura sobre os atributos físicos do solo, incluindo densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total;
- II) Avaliar o efeito de diferentes culturas de cobertura sobre propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, e gerar índices de saúde do solo por meio do Soil Management Assessment Framework (SMAF) permitindo a abordagem integrada dos dados;
- III) Quantificar a produção de biomassa seca da parte aérea e radicular, bem como determinar o comprimento e volume de raízes das culturas de cobertura;
- IV) Determinar o efeito das culturas de cobertura na produtividade de grãos de milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Culturas de cobertura

Culturas de cobertura são espécies vegetais utilizadas com o propósito inicial de fornecer proteção ao solo contra os processos erosivos e de perdas dos nutrientes por lixiviação e escoamento superficial, podendo ser gramíneas, leguminosas ou de outras espécies, desde que produzam biomassa em quantidade adequada para proteção do solo e persistam por determinado período sob a superfície do solo (Reeves 1994).

Nesse sentido, diferente de outras espécies vegetais, as culturas de cobertura não são essencialmente cultivadas com objetivo do consumo humano, sendo destinadas principalmente a: proteção contra a erosão, aumento da retenção de água, disponibiliza nutrientes, favorece o incremento de matéria orgânica no solo, entre outros, que resultam em sua participação imprescindível para a eficiência de sistemas de manejo de solo conservacionistas como o sistema plantio direto (SPD) (Dabney; Delgado; Reeves, 2001).

As culturas de cobertura podem ser divididas em quatro classes principais; i) gramíneas (por exemplo, azevém e cereais); ii) leguminosas (por exemplo, alfafa, ervilhaca e trevos); iii) não-leguminosas (por exemplo, espinafre e canola) e; iv) as brássicas (por exemplo, mostarda, rabanete e nabo (Rivière, Béthinger e Bergez, 2022).

No Brasil, algumas gramíneas como milheto, sorgo e braquiárias são amplamente estudados como culturas de cobertura. Entre as leguminosas, destacam-se as espécies de crotalária (*Crotalaria spp.*), mucuna-preta (*Mucuna pruriens*) e feijão-guandu (*Cajanus cajan*) (Andrade *et al.*, 2017; Carvalho *et al.*, 2022; São Miguel *et al.*, 2018; Sodré Filho *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2014).

Geralmente, espécies de gramíneas tem maior densidade e comprimento de raízes e maior relação C:N em seus resíduos em comparação a leguminosas, o que pode favorecer a permanência de cobertura no solo (Aita; Giacomini, 2003; Borkert *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2017). Por outro lado, as leguminosas apresentam raízes com diâmetros maiores e com melhor penetração no solo, favorecendo a criação de macroporos e a geração de espaços para o crescimento de raízes subsequentes (Kidd *et al.*, 2016).

Nesse sentido, estratégias de manejo que integrem espécies com diferentes grupos funcionais, como gramíneas e leguminosas, têm sido amplamente recomendadas, uma vez que combinam mecanismos complementares de atuação no solo, como elevada produção de biomassa, aporte de carbono, fixação biológica de nitrogênio e estímulo à atividade biológica (Chen; Weil, 2011; Crème *et al.*, 2016). Entretanto, grande parte dos estudos concentra-se em um número restrito de espécies nos ambientes estudados ou em combinações simplificadas, o que limita a compreensão dos efeitos de sistemas com maior diversidade de culturas de cobertura.

Assim, a avaliação simultânea de múltiplas espécies de culturas de cobertura, conduzidas sob as mesmas condições edafoclimáticas e de manejo, torna-se essencial para identificar diferenças funcionais entre espécies, bem como seu potencial individual e comparativo na melhoria das propriedades do solo e da saúde do solo como um todo. Essa abordagem é particularmente relevante em sistemas agrícolas tropicais, nos quais a resposta das culturas de cobertura pode variar amplamente em função do clima, do solo e do sistema de produção.

2.2 Saúde do solo

A saúde do solo retrata a capacidade do solo de funcionar, dentro do uso da terra e limites do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter qualidade ambiental e promover material vegetal e saúde humana (Doran; Parkin, 2015).

À medida que continuamos a lidar com mudanças climáticas e eventos extremos, regenerar a saúde e o funcionamento adequado do solo se torna uma demanda mundial. Os benefícios estão relacionados a redução dos custos de investimento em insumos e aumento da capacidade do solo de manter ou aumentar a produtividade, além de contribuir para promover serviços ecossistêmicos no setor agrícola (Stott; Moebius-Clune, 2017).

Dessa forma, manter o solo saudável é uma parte essencial para manutenção da segurança alimentar e sustentabilidade agrícola. Após o uso de estratégias de promoção a saúde do solo, um grande desafio é medir a saúde do solo. Vários métodos estão disponíveis (e.g., SMAF, SHAPE, CASH), mas a perícia de interpretar as métricas em regiões e ecossistemas agrícolas diversos continua sendo um desafio no estudo de saúde do solo (Deel; Moore; Manter, 2024).

As práticas comuns de gestão para manutenção da saúde do solo incluem o aumento da diversidade de plantas e animais, redução na perturbação do solo, presença contínua de crescimento de raízes de plantas no solo e aumento da cobertura do solo (Karlen *et al.*, 2021). Nesse sentido, culturas de cobertura têm sido amplamente estudadas como um meio para melhorar a saúde do solo através de incrementos nos atributos químicos, físicos e biológicos (Rice *et al.*, 2024).

2.3 Impacto das culturas de cobertura nos atributos do solo

2.3.1 Efeitos nos atributos físicos

O crescimento radicular das culturas de cobertura exerce papel central na melhoria dos atributos físicos do solo, refletindo-se diretamente em variáveis como densidade do solo e porosidade. Por meio do processo conhecido como *bio-drilling*, raízes finas e fibrosas penetram camadas adensadas, promovendo a formação de canais contínuos ao longo do perfil do solo. Após a senescência e decomposição dessas raízes, esses canais permanecem como bioporos, contribuindo para a redução da densidade do solo e para a melhoria da organização estrutural (Chen; Weil, 2011; Chen; Weil; Hill, 2014; Cresswell; Kirkegaard, 1995; Haruna *et al.*, 2017).

Em sistemas manejados com culturas de cobertura, as melhorias nos atributos físicos do solo tendem a ser mais duradouras quando comparadas a intervenções mecânicas, como a escarificação, cujos efeitos são geralmente imediatos, porém temporários. O uso contínuo de culturas de cobertura favorece a estabilização da estrutura do solo ao longo do tempo, refletindo em menores valores de densidade e em alterações positivas na distribuição do espaço poroso, inclusive em camadas subsuperficiais do perfil (Calonego *et al.*, 2017).

A formação de bioporos está diretamente associada ao aumento da macroporosidade, variável fundamental para a aeração do solo e para o fluxo de água. Esses macroporos atuam como vias preferenciais para o crescimento radicular de culturas subsequentes, influenciando positivamente a exploração do perfil do solo.

Por outro lado, o aporte de resíduos vegetais oriundos da biomassa das culturas de cobertura contribui para o aumento do teor de matéria orgânica, favorecendo a agregação das partículas do solo e o incremento da microporosidade,

atributo relacionado à retenção de água (Błażewicz-Woźniak & Konopiński, 2013; Cercioglu *et al.*, 2018; Stirzaker *et al.*, 1996).

Dessa forma, as alterações promovidas pelas culturas de cobertura nos atributos físicos do solo, expressas por mudanças na densidade e porosidade do solo, constituem importantes indicadores da qualidade física e da saúde do solo, fornecendo suporte teórico para a avaliação integrada desses atributos em sistemas agrícolas manejados de forma conservacionista.

2.3.2 Efeitos nos atributos químicos

As culturas de cobertura apresentam elevado potencial para melhorar os atributos químicos do solo, principalmente por meio do aporte de nutrientes oriundos de sua biomassa e da fixação biológica de nitrogênio (FBN), realizada sobretudo por espécies leguminosas. Esses mecanismos contribuem para o aumento da fertilidade do solo, podendo reduzir a dependência de fertilizantes minerais e favorecer a saúde do solo em sistemas agrícolas sustentáveis (Cordeiro; Echer; Araujo, 2021; Karasawa, 2024).

Durante o processo de decomposição da biomassa produzida pelas culturas de cobertura, nutrientes como nitrogênio, fósforo, cálcio e magnésio, previamente assimilados nos tecidos vegetais, são gradualmente devolvidos ao solo, incrementando sua disponibilidade para as culturas subsequentes (Crusciol *et al.*, 2015).

Outro mecanismo relevante de influência das culturas de cobertura sobre os atributos químicos do solo é a fixação biológica de nitrogênio, processo característico de leguminosas que estabelecem simbiose com bactérias fixadoras, como aquelas do gênero *Rhizobium* (Peoples *et al.*, 2009). O nitrogênio atmosférico, anteriormente indisponível às plantas, é incorporado à biomassa vegetal e posteriormente disponibilizado ao solo durante sua decomposição. Conforme destacado por Sanchez *et al.* (2019), esse aporte pode compensar, ao menos parcialmente, a aplicação de fertilizantes nitrogenados, resultando em benefícios econômicos e ambientais.

Adicionalmente, as culturas de cobertura contribuem para a manutenção da fertilidade do solo ao promoverem maior proteção da superfície, reduzindo as perdas de solo por erosão. Como consequência, ocorre menor perda de nutrientes tanto pelo

escoamento superficial quanto pela lixiviação, favorecendo a conservação dos elementos químicos no sistema solo-planta (Baets *et al.*, 2011).

Nesse contexto, o uso de culturas de cobertura tem sido reconhecido como uma prática agrônômica promissora e sustentável para a melhoria da saúde do solo e do desempenho das culturas agrícolas. No entanto, apesar dos avanços, o conjunto de interações entre culturas de cobertura, atributos químicos do solo e estado nutricional das culturas ainda é complexo e permanece insuficientemente explorado, especialmente em sistemas com maior diversidade de espécies (Scavo *et al.*, 2022).

2.3.3 Efeitos nos atributos biológicos

A presença de culturas de cobertura promove alterações significativas nos atributos biológicos do solo, uma vez que o aporte contínuo de resíduos vegetais e exsudatos radiculares constitui a principal fonte de energia e carbono para a biota edáfica (Crotty & Stoate, 2019; Finney *et al.*, 2017). Microrganismos decompositores, como bactérias e fungos, beneficiam-se diretamente da matéria orgânica fornecida pelas culturas de cobertura e, em contrapartida, atuam na decomposição da matéria orgânica e na mineralização de nutrientes, tornando-os disponíveis para as culturas subsequentes (Daryanto *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2006).

O cultivo de culturas de cobertura está associado ao aumento da biomassa microbiana do solo e à maior diversidade microbiana, especialmente em sistemas com maior diversidade de espécies (Kim *et al.*, 2020). As culturas de cobertura, através da variedade de resíduos vegetais e de exsudatos radiculares, com diferentes composições químicas, favorecem nichos ecológicos distintos. Isso estimula o desenvolvimento de grupos funcionais distintos (*e.g.*, bactérias e fungos), com a promoção de associações simbióticas benéficas, como as micorrizas arbusculares. Essas micorrizas ampliam a absorção de nutrientes pouco móveis, especialmente fósforo, e contribuem para a agregação do solo (Almeida *et al.*, 2018; García-González *et al.*, 2016; King & Hofmockel, 2017). Essas interações biológicas reforçam a conexão entre os atributos biológicos, químicos e físicos, que compõe a saúde do solo. Outro efeito relevante das culturas de cobertura refere-se ao aumento da atividade enzimática do solo, considerada um indicador sensível da atividade microbiana e da ciclagem de nutrientes (Brennan & Acosta-Martinez, 2019; Chavarría *et al.*, 2016).

Enzimas como β -glucosidase, fosfatase e urease desempenham papéis centrais nos ciclos do carbono, fósforo e nitrogênio, respectivamente. O fornecimento de maior quantidade e diversidade de substratos orgânicos pelas culturas de cobertura intensifica a atividade dessas enzimas, refletindo maior eficiência nos processos de decomposição e mineralização (Tyler, 2020).

Nesse contexto, os efeitos das culturas de cobertura sobre os atributos biológicos do solo extrapolam o simples aumento da atividade microbiana, influenciando de forma integrada a biomassa, a diversidade, a atividade enzimática e as interações biológicas no solo. Esses processos constituem componentes-chave da saúde do solo e fornecem base conceitual para a utilização de indicadores biológicos em avaliações integradas, como aquelas propostas por *frameworks* de qualidade e saúde do solo.

2.4 Culturas de cobertura em sucessão com milho

Por melhorarem a qualidade do solo, através dos efeitos nos atributos químicos, físicos e biológicos, as culturas de cobertura apresentam potencial de influenciar positivamente a produtividade de culturas subsequentes, como o milho (Dabney; Delgado; Reeves, 2001; Ding *et al.*, 2006; Maughan *et al.*, 2009; Steenwerth; Belina, 2008).

Crusciol *et al.* (2015) em seu trabalho com *Urochloa brizantha* (Hochst. Ex A. Rich.) R.D. Webster) reforçou que o cultivo e incorporação de culturas de cobertura melhoram a fertilidade do solo de áreas de produção de grãos, resultando em plantas de milho, aveia-branca e soja com maiores concentrações de macronutrientes nas folhas e maiores rendimentos de grãos em comparação com áreas em monocultivo.

Paye *et al.* (2022) estudando o mix de culturas de cobertura e rotação com milho em áreas irrigadas de semiárido obteve resultados que destacam um incremento de até 26% no rendimento de milho silagem após o cultivo de culturas de cobertura, além de seus efeitos positivos na conservação da água do solo (14 a 29%) em comparação ao cultivo convencional.

As culturas de cobertura apresentam capacidade de mitigar os efeitos das mudanças climáticas e melhorar a conservação do solo em áreas de produção de grãos. Os resultados obtidos por Li *et al.* (2021) demonstram que o uso de culturas de cobertura em sistema de rotação milho-soja favorece a diminuição de perdas de água

do solo por evaporação e melhoram a eficiência do uso de água do sistema, sendo uma estratégia eficiente para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, principalmente por minimizar a variação sobre temperatura e de precipitação pluvial.

Por outro lado, Deines *et al.* (2023) destaca que a utilização de culturas de cobertura pode resultar em perdas de produtividade de culturas como milho, com perda média de 5,5% de produtividade da cultura em áreas onde as culturas de cobertura foram utilizadas por 3 anos ou mais em comparação a campos onde não foram utilizadas culturas de cobertura, nos EUA.

O cultivo de culturas de cobertura leguminosas não resulta em perdas significativas de produtividade, enquanto a utilização de culturas de cobertura não-leguminosas pode resultar em perda de 3 a 3,9% de produtividade na cultura do milho, devido a imobilização do N e competição por água, que pode ser agravado em função da terminação tardia das culturas de cobertura pré-plantio do milho (Qin *et al.*, 2021).

Rice *et al.* (2024) ressaltam que apesar dos impactos notáveis das culturas de cobertura na saúde do solo, os efeitos em culturas subsequentes ainda são inconsistentes na literatura.

Dessa forma, é necessário que sejam realizadas mais investigações referentes ao incremento de produtividade em culturas subsequentes promovidos pela utilização de culturas de cobertura, com enfoque no cultivo de milho.

2.5 Avaliação integrada da saúde do solo

A saúde do solo é um conceito multidimensional que envolve a interação entre atributos físicos, químicos e biológicos, refletindo a capacidade do solo de funcionar como um sistema vivo, sustentando a produtividade vegetal, a qualidade ambiental e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas ao longo do tempo (Karlen *et al.*, 2001).

Nesse contexto, a avaliação isolada de atributos do solo, embora essencial, pode não capturar adequadamente a complexidade das respostas do solo às práticas de manejo. Assim, torna-se necessária a utilização de abordagens integrativas, capazes de sintetizar múltiplos indicadores em métricas que representem de forma mais abrangente o funcionamento do sistema solo (Andrews *et al.*, 2004).

Frameworks de avaliação integrada da saúde do solo permitem transformar dados analíticos individuais em índices interpretáveis, facilitando a comparação entre sistemas de manejo, tratamentos e períodos de avaliação.

Essas abordagens são particularmente relevantes em estudos envolvendo culturas de cobertura, cujos efeitos ocorrem de forma simultânea e interdependente sobre diferentes atributos do solo, muitas vezes com respostas graduais ao longo do tempo (Basche *et al.*, 2016; Quintarelli *et al.*, 2022).

2.5.1 Soil Management Assessment Framework (SMAF)

O *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) é um dos principais modelos integrativos desenvolvidos para avaliar a saúde do solo em sistemas agrícolas. Proposto inicialmente por Karlen *et al.* (2001) e posteriormente aprimorado por Andrews, Karlen e Cambardella (2004), o SMAF baseia-se na seleção de indicadores físicos, químicos e biológicos, que são interpretados por meio de funções de pontuação padronizadas, gerando índices variando de 0 a 1, nos quais valores mais elevados indicam melhor condição de saúde do solo.

O *framework* considera que a interpretação de um atributo do solo deve levar em conta o contexto edafoclimático e o uso do solo, reconhecendo que valores ótimos podem variar entre regiões e sistemas de manejo. Dessa forma, o SMAF incorpora informações como textura do solo, profundidade amostrada, cultura agrícola e práticas de manejo, conferindo maior robustez à avaliação (Andrews *et al.*, 2002; Andrews *et al.*, 2004).

Os indicadores físicos comumente utilizados no SMAF incluem densidade do solo, porosidade e estabilidade de agregados, os quais estão associados à estrutura do solo, à aeração e à dinâmica da água. No componente químico, são frequentemente considerados atributos como pH, fósforo disponível e teor de potássio (Andrews *et al.*, 2004). Já os indicadores biológicos incluem, entre outros, o carbono da biomassa microbiana, carbono orgânico e a atividade enzimática, refletindo a dinâmica da matéria orgânica e da ciclagem de nutrientes (Andrews *et al.*, 2004; Cherubin *et al.*, 2016).

Uma das principais vantagens do SMAF é sua capacidade de integrar múltiplos atributos em um índice único de saúde do solo, sem substituir a análise individual dos indicadores. Conforme destacado por Karlen *et al.* (2001), o *framework* não visa simplificar excessivamente a complexidade do solo, mas sim fornecer uma ferramenta que auxilie na interpretação conjunta dos dados e na tomada de decisão relacionada ao manejo do solo.

2.5.2 Aplicação do SMAF em sistemas com culturas de cobertura e culturas anuais

A aplicação do SMAF em sistemas agrícolas manejados com culturas de cobertura tem demonstrado elevado potencial para captar os efeitos integrados dessas culturas sobre a saúde do solo. Diversos estudos indicam que o uso de culturas de cobertura promove incrementos nos índices de saúde do solo calculados pelo SMAF, especialmente em função de melhorias nos atributos físicos e biológicos, como redução da densidade do solo, aumento da porosidade, incremento do carbono orgânico e maior atividade microbiana (Luz *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2020)

Em sistemas conservacionistas, a inclusão de culturas de cobertura tem sido associada a aumentos consistentes nos escores relacionados ao carbono do solo, indicador-chave no SMAF, devido ao maior aporte de resíduos vegetais e à intensificação da ciclagem de carbono (Cherubin *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2023). Esses efeitos são frequentemente mais pronunciados quando há diversidade de espécies, especialmente pela combinação de gramíneas e leguminosas, que apresentam estratégias funcionais complementares (Fageria *et al.*, 2005).

Além disso, o SMAF tem se mostrado sensível para detectar diferenças entre sistemas de manejo ao longo do tempo, permitindo avaliar a trajetória da saúde do solo em resposta ao uso contínuo de culturas de cobertura. Essa característica é particularmente relevante em experimentos de médio e longo prazo, nos quais os efeitos das culturas de cobertura se manifestam de forma gradual e cumulativa (Amorim *et al.*, 2020).

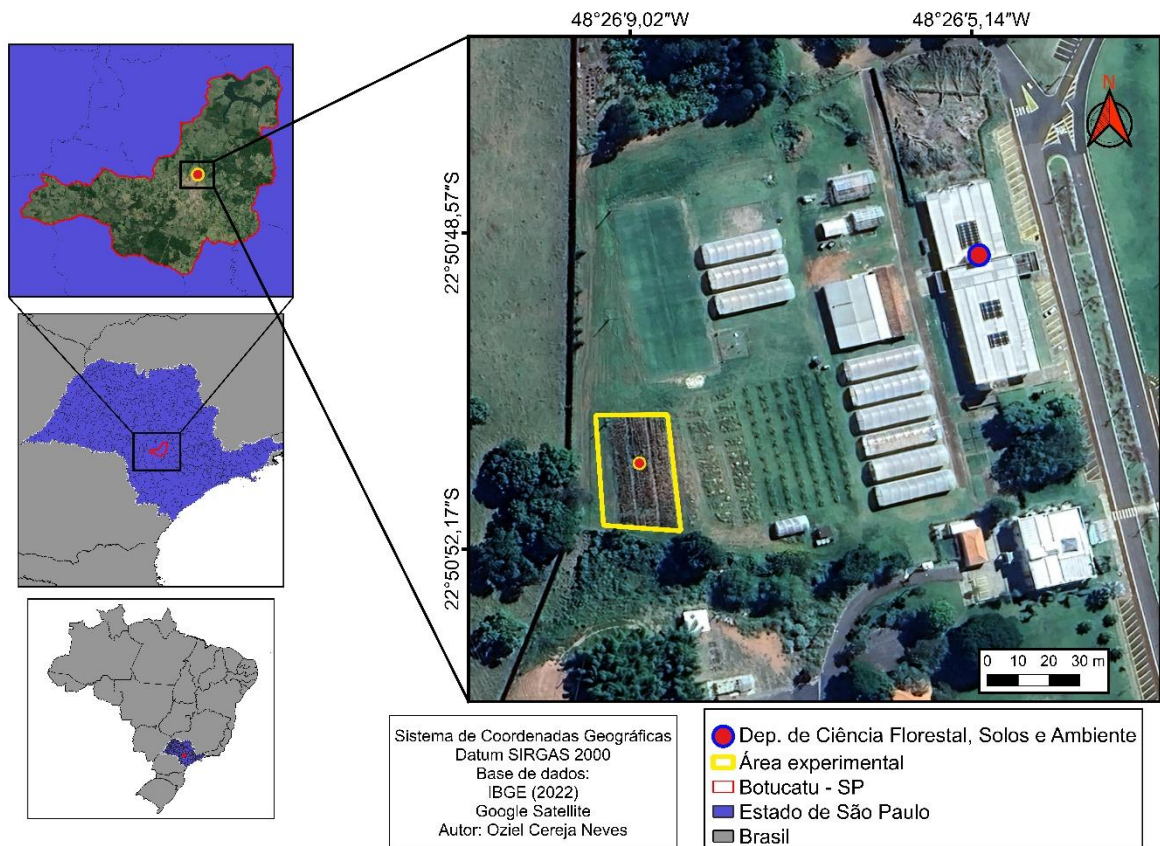
No contexto de sistemas agrícolas tropicais e subtropicais, a aplicação do SMAF contribui para a compreensão integrada dos impactos das culturas de cobertura sobre o solo, auxiliando na identificação de práticas que promovam maior sustentabilidade dos sistemas produtivos (Luz *et al.*, 2019). Assim, o uso do SMAF em estudos envolvendo culturas de cobertura representa uma abordagem robusta para avaliar a saúde do solo, fornecendo subsídios científicos para o aprimoramento das estratégias de manejo do solo (Cherubin *et al.*, 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições experimentais

O experimento foi conduzido em área experimental localizada em Botucatu, São Paulo (22°50' S; 48°26' W) (Figura 1), sob clima do tipo Aw (verões quentes e úmidos e invernos secos e mais frios) de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 20,5 °C e precipitação pluvial anual média de 1660 mm.

Figura 1 – Mapa de localização da área experimental.



Fonte: o autor.

O solo da área está classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo, apresentando textura franco arenoso (Santos *et al.*, 2025) e relevo plano. O histórico da área inclui experimentação com hortaliças até 2020 e posteriormente a área foi subsolada e arada para o cultivo de milho na safra 2019/20. Posteriormente a área foi mantida em pousio, com controle mecânico (gradagem superficial) da vegetação espontânea até 2023.

Antes da instalação do experimento, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas na camada de 0,00 – 0,20 m, para caracterização dos atributos químicos e físicos iniciais do solo (Tabela 1), servindo de base para o planejamento da instalação do experimento no campo.

Tabela 1 - Caracterização química e física do solo na camada 0,0 – 0,2 m antes da implantação do experimento.

Propriedades químicas do solo								
pH	M.O.	P _{resina}	H+Al	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	CTC
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³					
5,25	10,92	53,7	18,33	0,99	25,15	6,48	32,62	50,95
Propriedades físicas do solo								
Ds	Mac	Pot	Areia	Silte	Argila			
g cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³			%				
1,36	0,12	0,43	78,2	3,2	18,6			

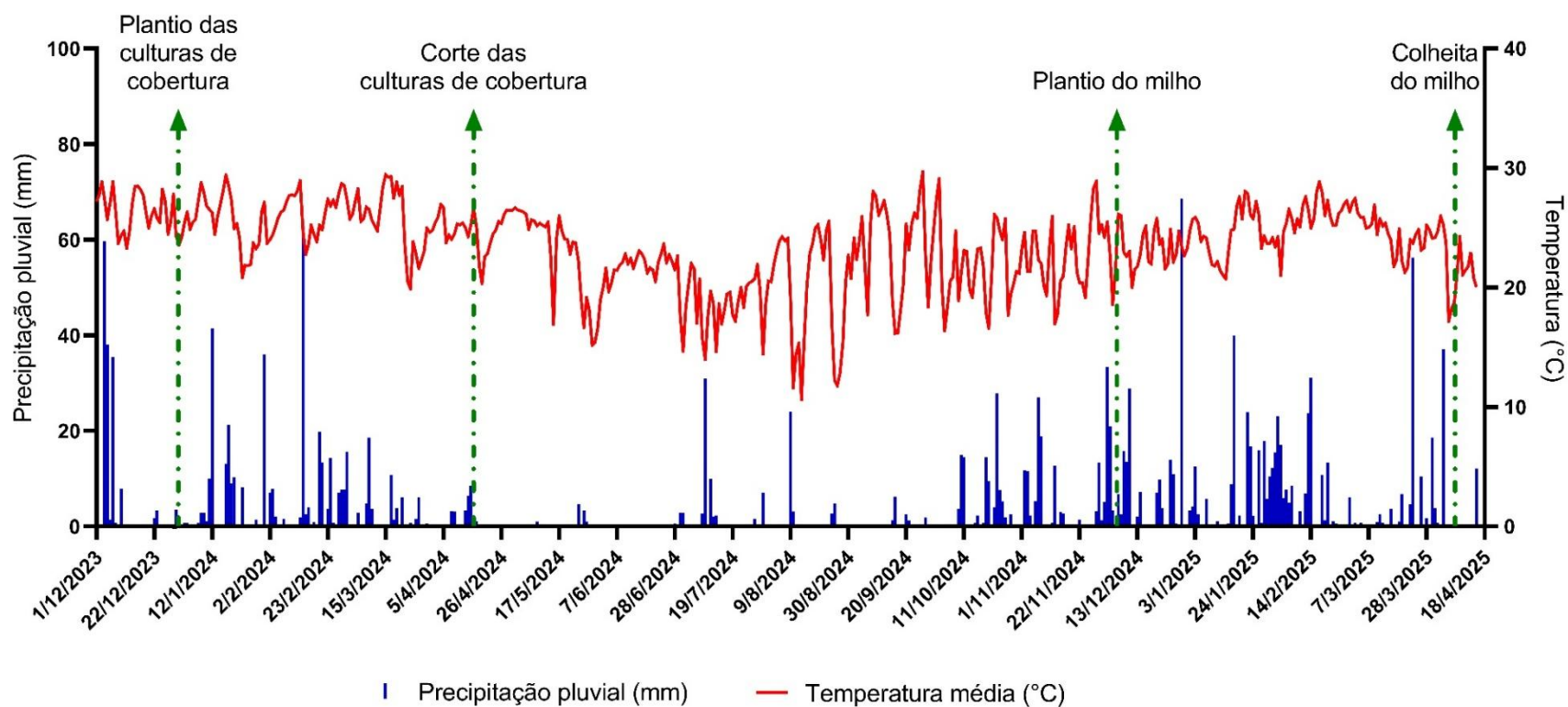
M.O.: matéria orgânica; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; Pot: porosidade total; Mac: macroporosidade; DS: densidade do solo.

Fonte: o autor.

As culturas de cobertura foram semeadas de forma manual no espaçamento de 0,25 m entrelinhas, com a população de plantas definidas conforme Cherubin (2022) no dia 04/01/2024 e conduzidas até a semeadura do milho ou a senescência das plantas. As amostragens de biomassa ocorreram no florescimento, com cortes iniciando em 07/03/2024 e finalizando em 17/04/2024. Essa variação na época de corte ocorreu em função da diversidade de plantas e seus respectivos ciclos.

O plantio do milho foi feito de forma mecanizada, com sementes do híbrido Biomatrix 818 Pro, e população de aproximadamente 60.000 plantas por hectare. O milho foi semeado em 05/12/2024 e posteriormente colhido em 01/04/2025. A adubação foi realizada de acordo com a recomendação do Boletim 100 para o estado de São Paulo (Cantarella, 2022).

Figura 2 - Gráfico climatológico referente ao período de condução do experimento em Botucatu, SP.



Fonte: o autor.

3.2 Delineamento experimental

Para avaliação do efeito dos efeitos de sistemas de cultivos prévios ao milho, o experimento foi conduzido em delineamento em blocos ao acaso (DBC), com três repetições. As parcelas foram constituídas por doze (12) tratamentos, correspondentes a onze espécies de culturas de cobertura e uma área de pousio composta de vegetação espontânea (Tabela 2). Cada unidade experimental foi representada por uma parcela de 5 x 3 m (15 m²), totalizando 540 m² de área experimental (Figura 1).

Tabela 2 - Descritivos das plantas utilizadas.

Nome científico	Nome popular	Família	População (plantas ha ⁻¹)
Culturas de cobertura			
<i>Cajanus cajan</i>	Feijão-guandu	Fabaceae	~1.920.000
<i>Crotalaria juncea</i>	Crotalária-juncea	Fabaceae	~520.000
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	Crotalária-ochroleuca	Fabaceae	~800.000
<i>Crotalaria spectabilis</i>	Crotalária-spectabilis	Fabaceae	~480.000
<i>Fagopyrum esculentum</i>	Trigo-sarraceno	Polygonaceae	~2.480.000
<i>Lablab purpureus</i>	Lab-lab / Feijão-lablab	Fabaceae	~44.000
<i>Mucuna pruriens</i>	Mucuna-preta	Fabaceae	~240.000
<i>Pennisetum glaucum</i>	Milheto	Poaceae	~4.800.000
<i>Raphanus sativus</i>	Nabo forrageiro	Brassicaceae	~960.000
<i>Sorghum bicolor</i>	Sorgo	Poaceae	~480.000
<i>Urochloa brizantha</i>	Braquiária	Poaceae	~4.608.000
Cultivo em rotação			
<i>Zea mays</i>	Milho	Poaceae	60.000

Fonte: o autor.

3.3 Variáveis analisadas

3.3.1 Propriedades físicas

Para determinação das propriedades físicas do solo, amostras indeformadas foram coletadas utilizando-se trado Uhland e cilindros metálicos com dimensões de 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro, aproximadamente 100 cm³ de volume, nas

profundidades de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m. As propriedades avaliadas foram densidade do solo (D_s), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (Pot).

3.3.1.1 Densidade do solo

A densidade do solo foi determinada pela relação massa/volume (Eq. 1):

$$D_s = \frac{M_{seco}}{V_{anel}}, \quad \text{Eq.1}$$

Em que:

D_s é densidade do solo, em g cm^{-3} ;

M_{seco} a massa de solo seco a 105°C , em g;

V_{anel} : volume do anel metálico, em cm^3 .

3.3.1.2 Macroporosidade do solo

A macroporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão, utilizando coluna de água de 60 cm de altura, equivalente à tensão de aproximadamente 6 kPa (Teixeira *et al.*, 2017). Após saturação das amostras por 24 h, estas foram submetidas à tensão de 6 kPa, condição na qual a água retida nos macroporos é drenada. Assim, a macroporosidade foi calculada pela diferença entre a massa da amostra saturada e a massa da amostra após equilíbrio à tensão de 6 kPa, dividida pelo volume total da amostra (Eq.2).

Como a diferença entre as massas corresponde à massa de água drenada dos macroporos, e considerando-se a densidade da água igual a 1 g cm^{-3} , essa massa é numericamente equivalente ao volume de água drenado, em cm^3 . Dessa forma, ao dividir o volume de água drenado pelo volume do cilindro volumétrico, obtém-se a macroporosidade em base volumétrica, expressa em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

$$Mac = \frac{M_{sat} - M_{6kpa}}{V_{anel}}, \quad \text{Eq.2}$$

Em que:

Mac é a macroporosidade do solo, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

M_{sat} é a massa da amostra saturada com água por 24 h, em g;

M_{6kpa} é a massa da amostra após equilíbrio à tensão de 6 kPa, em g.

3.3.1.3 Porosidade total do solo

A porosidade total do solo foi determinada a partir da diferença entre a massa da amostra saturada com água e a massa da amostra seca em estufa, dividida pelo volume total da amostra (Eq. 3) (Teixeira *et al.*, 2017).

Como a diferença entre M_{sat} e M_{seco} corresponde à massa de água contida nos poros da amostra saturada, e considerando-se a densidade da água igual a 1 g cm^{-3} , essa massa é numericamente equivalente ao volume de poros preenchidos por água, em cm^3 . Assim, ao dividir esse volume pelo volume total da amostra, obtém-se a porosidade total em base volumétrica, expressa em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

$$Pot = \frac{M_{sat} - M_{seco}}{V_{anel}}, \quad \text{Eq. 3}$$

em que Pot é a porosidade total do solo, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

3.3.1.4 Microporosidade do solo

A microporosidade do solo foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a macroporosidade (Eq. 4) (Teixeira *et al.*, 2017).

$$Mic = Pot - Mac \quad \text{Eq. 4}$$

Em que:

Mic é a microporosidade do solo, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

Pot é a porosidade total do solo, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

Mac é a macroporosidade do solo, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

3.3.2 Propriedades químicas

3.3.2.1 Fósforo

A concentração de fósforo foi extraída por troca iônica em uma mistura solo:resina:água (1:1:10, v/v) e avaliada pela formação do complexo fosfo-azul de molibdênio em meio sulfúrico, utilizando ácido ascórbico como agente redutor, e determinada por espectrofotometria (comprimento de onda: 725 nm), de acordo Raij *et al* (2001). Os resultados foram expressos em mg dm^{-3} de P.

3.3.2.2 pH

O pH do solo foi determinado em suspensão solo:solução de cloreto de cálcio (CaCl_2), conforme metodologia descrita por Raij *et al.* (2001). Para essa determinação, amostras de solo foram misturadas com solução de CaCl_2 em concentração padronizada, na proporção 1:2,5 (solo:solução). A suspensão foi homogeneizada e mantida em repouso por período uma (1) hora para estabilização. As leituras de pH foram realizadas com pHmetro equipado com eletrodo de vidro, previamente calibrado com soluções tampão padrão.

3.3.2.3 Potássio, Cálcio e Magnésio

As concentrações de potássio, cálcio e magnésio trocáveis no solo foram extraídas por troca iônica, utilizando mistura solo:resina:água na proporção 1:1:10 (v/v), conforme metodologia descrita por Raij *et al.* (2001). Após a extração, o potássio foi determinado por fotometria de chama, enquanto cálcio e magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Os resultados foram expressos em mmolc dm^{-3} de K, Ca e Mg.

3.3.3 Propriedades biológicas

3.3.3.1 Carbono orgânico do solo

A determinação do carbono orgânico do solo foi realizada pelo método de oxidação química via dicromato de potássio em meio ácido (Teixeira *et al.*, 2017). Para isso, 1 cm^3 de solo (TFSA) foram pesados e transferidos para erlenmeyer, aos quais foram adicionados 10 mL de solução de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) e 20 mL de ácido sulfúrico concentrado, promovendo a oxidação parcial do carbono orgânico presente na amostra.

Após o período de reação, a suspensão foi diluída com água destilada e o excesso de dicromato não reagido foi quantificado por titulação com solução padrão, utilizando indicador apropriado. O teor de carbono orgânico foi calculado por diferença, com base no consumo do agente oxidante, e os resultados foram expressos em g kg^{-1} de carbono orgânico.

3.3.3.2 β -glicosidase

A atividade enzimática foi determinada ao final do ciclo experimental, após a consolidação do sistema das práticas de cobertura do solo em rotação com milho, na camada de 0,00 a 0,10 m, como sugerido por Balota *et al.* (2013) para a avaliação do efeito de práticas de manejo do solo sobre a atividade enzimática.

A determinação da atividade β -glicosidase no solo foi obtida por determinação colorimétrica da atividade do *p*-nitrofenol, de acordo com a metodologia descrita por Tabatabai (1994) e Silveira *et al.* (2022).

Desse modo, foram pesadas 1,0 g de solo, acondicionadas em tubo de ensaio (2 repetições e 1 branco), em seguida, adicionados 4 mL de tampão de acetato 0,5 mol L⁻¹ e 1 mL de solução de substrato *p*-nitrofenil- β -D-glicosídeo 0,05 mol L⁻¹. Na sequência as amostras foram incubadas por uma hora (a 37 °C). Após esse período, foram adicionados 1 mL de CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹ e 4 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹, sendo posteriormente agitadas por 5 segundos, em agitador do tipo vortex. Ao final, as amostras foram filtradas (filtração lenta), para realização da leitura das amostras em espectrofotômetro a 410 nm.

3.3.4 Determinação dos índices de saúde do solo pelo SMAF

Cinco indicadores de qualidade do solo avaliados (densidade do solo, carbono orgânico do solo, atividade da β -glicosidase, pH e disponibilidade de P) foram escolhidos por influenciarem uma ou mais funções do solo (Lal, 2016).

A densidade do solo é uma propriedade física do solo relacionada à sua estrutura, onde o aumento da densidade aparente está associado à compactação do solo, à resistência mecânica ao crescimento radicular e à má aeração (Nunes *et al.*, 2019; Reichert *et al.*, 2009). O carbono orgânico do solo e a atividade enzimática foram considerados indicadores biológico porque (i) reflete a quantidade de matéria orgânica do solo (MOS); (ii) influencia a ciclagem e o armazenamento de nutrientes, a estrutura do solo e o fornecimento de alimento para organismos edáficos; e (iii) afeta diversas outras funções e processos do solo, como fertilidade, retenção de água e emissões gasosas (Lal, 2016; McDaniel *et al.*, 2014; Tiemann *et al.*, 2015). Por fim, o pH e o P foram selecionados como importantes indicadores químicos que refletem a acidez do solo e a disponibilidade de nutrientes.

Tabela 3 - Classes utilizadas para obtenção do índice de saúde do solo com a ferramenta SMAF.

Fator específico do local	Solo Argissolo
Textura do solo	Classe 2
Taxonomia	Classe 2
Mineralogia do solo	Classe 3
Tipo de cultivo	Cultura de cobertura
Clima	Classe 1
Declividade	Classe 1
Método de determinação de Fósforo	Classe 5

Fonte: o autor.

O SMAF foi usado para interpretar e combinar esses cinco indicadores de saúde do solo. Os valores medidos (dados brutos) foram transformados em um valor de 0 a 1 usando funções de pontuação, ou seja, algoritmos em uma planilha do Excel®.

Tabela 4 - Códigos utilizados para obtenção do índice de saúde do solo com a ferramenta SMAF.

Cultura de cobertura	Código da cultura
<i>C. cajan</i>	96 ¹
<i>C. juncea</i>	96 ¹
<i>C. ochroleuca</i>	96 ¹
<i>C. spectabilis</i>	96 ¹
<i>F. esculentum</i>	19
Pousio	107
<i>L. purpureus</i>	9 ²
<i>M. pruriens</i>	34 ³
<i>P. glaucum</i>	81
<i>R. sativus</i>	19 ⁴
<i>S. bicolor</i>	81
<i>U. brizantha</i>	109

Para espécies que não constam nos códigos do SMAF, foram atribuídos os códigos de plantas com características similares: ¹ *V. sativa*; ² *P. vulgaris*; ³ *V. unguiculata*; ⁴ *F. esculentum*.

Fonte: o autor.

Cada curva de pontuação foi desenvolvida para levar em consideração a taxonomia do solo, a textura, a temperatura típica e os regimes médios anuais de precipitação para a área estudada, a mineralogia da argila, a inclinação, a estação em que as amostras foram coletadas, a cultura dominante e o método analítico usado

para a análise de P (Andrews *et al.*, 2004; Stott *et al.*, 2010 e Wienhold *et al.*, 2009). Por exemplo, a interpretação do COS leva em consideração o teor inerente de matéria orgânica, que se baseia na classificação taxonômica do solo (nível de subordem), na textura do solo e no clima como fatores específicos do local. A interpretação da densidade do solo se baseia na textura do solo e na mineralogia da argila. Os valores de pH e P são baseados no tipo de cultura. No entanto, a interpretação do P também leva em consideração a textura do solo, a inclinação do terreno e o método utilizado para medir o P extraível (Andrews *et al.*, 2004; Wienhold *et al.*, 2009). Os fatores específicos do local e suas respectivas classes utilizadas nesta avaliação para cada indicador de saúde do solo estão na Tabela 3, e os códigos das culturas de cobertura estão na Tabela 4.

Desse modo, um índice geral de qualidade do solo (IQS) foi calculado somando-se os valores individuais (de 0 a 1) e dividindo-se pelo número de indicadores utilizados (5 indicadores). Essa abordagem foi coerente com as diretrizes gerais do SMAF, que recomendam o uso de um mínimo de cinco indicadores, representando propriedades e processos físicos, químicos e biológicos do solo (Karlen *et al.*, 2008).

3.3.5 Avaliações das culturas de cobertura

3.3.5.1 Biomassa seca da parte aérea

Para avaliar a biomassa da parte aérea foram coletados um (1) m² de culturas de cobertura antes da dessecação pré-milho. Em seguida a biomassa colhida foi lavada com água destilada, acondicionada em sacos de papel e inseridas em estufa de circulação de ar forçado (65°C) até peso constante. Ao final, a biomassa foi pesada e seu peso foi convertido para representar a produção de biomassa em kg ha⁻¹.

3.3.5.2 Avaliações no WinRhizo e biomassa seca de raízes

O sistema radicular das culturas de cobertura foi analisado conforme metodologia descrita por Tennant (1975) e adaptada às condições experimentais, utilizando-se o sistema de análise de imagens WinRHIZO® (Regent Instruments Inc., Quebec, Canadá). A coleta das raízes foi realizada com o auxílio de gabarito metálico

com dimensões de 0,15 × 0,20 × 0,25 m, inserido no solo na linha de cultivo, permitindo a retirada de monólitos representativos do volume de solo explorado pelas plantas.

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e transportadas ao laboratório. Em seguida, procedeu-se à separação das raízes do solo por meio de lavagem em água corrente, utilizando peneiras de malha fina, de modo a remover as partículas de solo sem causar danos às estruturas radiculares. Após a limpeza, as raízes foram armazenadas em solução alcoólica (álcool etílico a 70%) até o momento da análise, com o objetivo de preservar a integridade dos tecidos e evitar processos de decomposição.

Para a análise morfológica, as raízes foram cuidadosamente distribuídas em bandejas transparentes contendo uma lâmina de água, de forma a minimizar sobreposições e garantir adequada separação dos fragmentos radiculares. Posteriormente, as bandejas foram posicionadas sobre um scanner de mesa acoplado ao sistema WinRHIZO®, realizando-se a digitalização das imagens em resolução mínima de 400 dpi, com fundo contrastante, conforme recomendação do fabricante.

As imagens obtidas foram processadas no software WinRHIZO®, que realiza a segmentação automática das raízes e a quantificação dos parâmetros morfológicos por meio de análise digital. O programa permite a identificação das estruturas radiculares com base na diferença de contraste entre as raízes e o fundo, possibilitando a mensuração precisa do comprimento total e do volume radicular. A partir do processamento das imagens, foram obtidos os dados referentes ao comprimento total das raízes e ao volume radicular.

Ao final das avaliações com o software WinRHIZO®, a biomassa das raízes foram secas em estufa de circulação de ar forçada a 65°C até peso constante. Após essa etapa, as raízes foram pesadas e seu peso foi convertido para representar a produção de biomassa seca radicular em kg ha⁻¹.

3.3.6 Produtividade de grãos de milho

A produtividade de grãos de milho foi quantificada colhendo-se 3 linhas de 1 m por parcela (3 m²). Os grãos foram debulhados para separação das espigas e pesados. Posteriormente, foram secos em estufa para determinação da produtividade de grãos (em kg ha⁻¹), com a umidade corrigida para 13%.

3.4 Análise estatística

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos à verificação dos pressupostos da análise de variância, mediante o teste de normalidade de Shapiro–Wilk. Posteriormente, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) em DBC e quando detectado efeito significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas por meio do teste de Scott Knott ou Tukey, ao nível de 5% de significância. As análises estatísticas foram realizadas em ambiente R (R Core Team, 2025).

4 RESULTADOS

4.1 Atributos físicos do solo

Os atributos físicos do solo avaliados nas camadas de 0,0–0,1 m e 0,1–0,2 m apresentaram respostas distintas em função das culturas de cobertura (Tabela 5). De modo geral, a macroporosidade, microporosidade e porosidade total não foram influenciadas significativamente pelos tratamentos em nenhuma das camadas avaliadas. A densidade do solo, por sua vez, apresentou efeito significativo das culturas de cobertura apenas na camada superficial de 0,0–0,1 m.

Na camada de 0,0–0,1 m, a macroporosidade variou de 0,18 a 0,23 cm³ cm⁻³, com média geral de 0,20 cm³ cm⁻³, sem diferença significativa entre as culturas de cobertura ($p = 0,63$). Os maiores valores numéricos foram observados no pousio e em *L. purpureus*, enquanto os menores ocorreram em *C. juncea*, *C. ochroleuca*, *C. spectabilis* e *U. brizantha*. A microporosidade também não foi alterada significativamente pelos tratamentos ($p = 0,54$), com valores entre 0,17 e 0,20 cm³ cm⁻³ e média de 0,19 cm³ cm⁻³. De forma semelhante, a porosidade total apresentou valores variando de 0,36 a 0,40 cm³ cm⁻³, com média de 0,38 cm³ cm⁻³, sem efeito significativo das culturas de cobertura ($p = 0,42$).

A densidade do solo foi o único atributo físico que respondeu significativamente às culturas de cobertura na camada superficial ($p = 0,00001$). Os valores variaram de 1,19 g cm⁻³, em *M. pruriens*, a 1,45 g cm⁻³, em *C. juncea* e *F. esculentum*. De acordo com o teste de agrupamento, os tratamentos *C. juncea*, *C. spectabilis*, *F. esculentum* e pousio apresentaram os maiores valores de densidade do solo, compondo o grupo estatístico superior. Em contrapartida, *C. cajan*, *C. ochroleuca*, *L. purpureus*, *M. pruriens*, *P. glaucum*, *R. sativus*, *S. bicolor* e *U. brizantha* apresentaram menores valores de densidade, compondo o grupo estatístico inferior. Esse resultado indica que determinadas culturas de cobertura estiveram associadas à redução da densidade do solo na camada superficial, embora essa resposta não tenha sido acompanhada por alterações estatisticamente significativas na porosidade total ou em suas frações.

Na camada de 0,1–0,2 m, não houve efeito significativo das culturas de cobertura sobre nenhum dos atributos físicos avaliados. A macroporosidade apresentou média de 0,08 cm³ cm⁻³, com valores variando de 0,05 a 0,10 cm³ cm⁻³ (p

= 0,87). A microporosidade variou de 0,20 a 0,22 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, com média de 0,20 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ($p = 0,90$), enquanto a porosidade total apresentou média de 0,28 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, com valores entre 0,26 e 0,30 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ($p = 0,79$). A densidade do solo nessa camada variou de 1,50 a 1,63 g cm^{-3} , com média de 1,56 g cm^{-3} , sem diferença significativa entre os tratamentos ($p = 0,48$).

De forma geral, os resultados demonstram que as culturas de cobertura exerceram efeito mais evidente sobre a densidade do solo na camada superficial, enquanto os demais atributos físicos apresentaram comportamento estatisticamente semelhante entre os tratamentos. A ausência de efeito significativo sobre a macroporosidade, microporosidade e porosidade total pode estar relacionada à maior estabilidade estrutural desses atributos ou ao tempo necessário para que alterações promovidas pelos sistemas de cobertura sejam detectadas de forma consistente. Além disso, a resposta significativa da densidade apenas na camada de 0,0–0,1 m reforça que os efeitos das culturas de cobertura tendem a ocorrer inicialmente na superfície do solo, onde há maior concentração de resíduos vegetais, atividade radicular e interação com os processos de agregação e estruturação do solo.

Tabela 5 – Valores de densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (Pot) nas camadas 0,0 – 0,1 m e 0,1-0,2 m, após o cultivo de culturas de cobertura.

Cultura de cobertura	Mac	Mic	Pot	Ds	Mac	Mic	Pot	Ds
	 cm ³ cm ⁻³	 cm ³ cm ⁻³	 cm ³ cm ⁻³	g cm ⁻³	 cm ³ cm ⁻³	 cm ³ cm ⁻³	 cm ³ cm ⁻³	g cm ⁻³
	 0,0-0,1 m				 0,1-0,2 m			
<i>C. cajan</i>	0,19 ± 0,02	0,18 ± 0,01	0,36 ± 0,01	1,23 ± 0,03 b	0,06 ± 0,02	0,20 ± 0,01	0,26 ± 0,01	1,58 ± 0,03
<i>C. juncea</i>	0,18 ± 0,02	0,20 ± 0,01	0,38 ± 0,01	1,45 ± 0,03 a	0,09 ± 0,01	0,20 ± 0,01	0,29 ± 0,01	1,52 ± 0,01
<i>C. ochroleuca</i>	0,18 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,37 ± 0,00	1,28 ± 0,02 b	0,07 ± 0,02	0,21 ± 0,01	0,28 ± 0,02	1,60 ± 0,04
<i>C. spectabilis</i>	0,18 ± 0,02	0,19 ± 0,01	0,37 ± 0,01	1,43 ± 0,02 a	0,07 ± 0,02	0,21 ± 0,01	0,28 ± 0,01	1,57 ± 0,04
<i>F. esculentum</i>	0,21 ± 0,01	0,18 ± 0,01	0,39 ± 0,01	1,45 ± 0,03 a	0,07 ± 0,03	0,20 ± 0,01	0,27 ± 0,02	1,58 ± 0,04
Pousio	0,23 ± 0,01	0,17 ± 0,00	0,40 ± 0,01	1,44 ± 0,04 a	0,09 ± 0,01	0,20 ± 0,01	0,29 ± 0,02	1,51 ± 0,05
<i>L. purpureus</i>	0,22 ± 0,04	0,17 ± 0,01	0,39 ± 0,02	1,31 ± 0,07 b	0,08 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,28 ± 0,02	1,56 ± 0,02
<i>M. pruriens</i>	0,21 ± 0,02	0,19 ± 0,01	0,40 ± 0,01	1,19 ± 0,05 b	0,07 ± 0,02	0,20 ± 0,00	0,26 ± 0,02	1,63 ± 0,07
<i>P. glaucum</i>	0,20 ± 0,02	0,18 ± 0,00	0,38 ± 0,02	1,25 ± 0,08 b	0,07 ± 0,01	0,22 ± 0,00	0,29 ± 0,01	1,55 ± 0,04
<i>R. sativus</i>	0,20 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,39 ± 0,00	1,25 ± 0,03 b	0,05 ± 0,02	0,21 ± 0,01	0,26 ± 0,01	1,61 ± 0,05
<i>S. bicolor</i>	0,19 ± 0,01	0,18 ± 0,01	0,37 ± 0,00	1,23 ± 0,03 b	0,10 ± 0,02	0,20 ± 0,02	0,30 ± 0,04	1,50 ± 0,05
<i>U. brizantha</i>	0,18 ± 0,00	0,20 ± 0,01	0,39 ± 0,01	1,23 ± 0,03 b	0,08 ± 0,03	0,20 ± 0,02	0,27 ± 0,01	1,56 ± 0,02
Média	0,2	0,19	0,38	1,31	0,08	0,2	0,28	1,56
CV (%)	17,1	10,17	5,63	4,92	42,46	8,28	10,64	4,56
P-valor	0,63	0,54	0,42	0,00001	0,87	0,9	0,79	0,48
F-valor	0,81	0,92	1,08	7,28	0,53	0,48	0,63	1,00
Normalidade	0,9	0,32	0,65	0,3	0,19	0,45	0,18	0,98

Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

Fonte: o autor.

4.2 Atributos químicos do solo

Os teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio no solo não foram influenciados significativamente pelas culturas de cobertura nas camadas de 0,0–0,1 m e 0,1–0,2 m (Tabela 6), não sendo observadas diferenças estatísticas significativas entre os sistemas de cultivo antecedentes ao milho. De modo geral, os valores médios apresentaram ampla variação numérica entre os tratamentos, principalmente para o fósforo e o cálcio; entretanto, essa variação não resultou em diferenças estatísticas pelo teste F, indicando ausência de efeito significativo das culturas de cobertura sobre os atributos químicos avaliados.

Na camada de 0,0–0,1 m, os teores de fósforo variaram de 37,22 mg dm⁻³, em *C. ochroleuca*, a 112,45 mg dm⁻³, em *L. purpureus*, com média geral de 72,57 mg dm⁻³. Apesar dessa amplitude, não houve diferença significativa entre os tratamentos, com valor de $p = 0,76$. Esse comportamento pode estar relacionado à elevada variabilidade dos dados, evidenciada pelo coeficiente de variação de 65,92%, o maior entre os atributos avaliados nessa camada. Para o potássio, os valores oscilaram entre 2,98 mmolc dm⁻³, em *U. brizantha*, e 5,68 mmolc dm⁻³, em *C. spectabilis*, com média de 4,11 mmolc dm⁻³ e ausência de efeito significativo das culturas de cobertura ($p = 0,30$).

Ainda na camada superficial, os teores de cálcio variaram de 18,08 mmolc dm⁻³, em *F. esculentum*, a 46,43 mmolc dm⁻³, em *L. purpureus*, com média geral de 26,41 mmolc dm⁻³. Embora alguns tratamentos tenham apresentado valores numericamente superiores, especialmente *L. purpureus*, *S. bicolor* e *U. brizantha*, não houve diferença estatística entre as culturas de cobertura ($p = 0,38$). O coeficiente de variação para esse atributo foi de 47,85%, indicando elevada dispersão dos dados e possível influência da heterogeneidade espacial do solo. O magnésio também não apresentou resposta significativa aos tratamentos ($p = 0,68$), com valores entre 6,47 e 9,35 mmolc dm⁻³ e média de 7,48 mmolc dm⁻³.

Na camada de 0,1–0,2 m, o mesmo padrão foi observado. Os teores de fósforo variaram de 17,15 mg dm⁻³, em *C. ochroleuca*, a 67,32 mg dm⁻³, em *U. brizantha*, com média de 40,10 mg dm⁻³. Apesar da diferença numérica entre os tratamentos, não houve efeito significativo das culturas de cobertura ($p = 0,90$), sendo esse atributo novamente caracterizado por elevada variabilidade, com CV de 79,08%. Para o

potássio, os valores variaram de 0,59 mmolc dm⁻³, em *S. bicolor*, a 1,88 mmolc dm⁻³, em *C. spectabilis*, com média de 1,18 mmolc dm⁻³ e ausência de diferença significativa ($p = 0,32$).

Os teores de cálcio na camada subsuperficial variaram de 18,32 mmolc dm⁻³, em *C. cajan*, a 28,61 mmolc dm⁻³, em *S. bicolor*, com média de 22,96 mmolc dm⁻³. O magnésio, por sua vez, variou de 3,86 mmolc dm⁻³, em *S. bicolor*, a 6,88 mmolc dm⁻³, em *C. spectabilis*, com média geral de 5,87 mmolc dm⁻³. Para ambos os atributos, não houve efeito significativo das culturas de cobertura, com valores de $p = 0,85$ para cálcio e $p = 0,87$ para magnésio.

De maneira geral, os resultados indicam que, no período avaliado, as culturas de cobertura não promoveram alterações significativas nos teores de P, K, Ca e Mg nas camadas estudadas. A ausência de significância estatística pode estar associada à elevada variabilidade experimental, especialmente para o fósforo, que apresentou coeficientes de variação superiores a 65% na camada superficial e a 79% na camada de 0,1–0,2 m. Essa alta dispersão dos dados pode reduzir a sensibilidade da análise de variância para detectar diferenças entre tratamentos, mesmo quando há contrastes numéricos expressivos entre as médias. Além disso, a dinâmica desses nutrientes no solo pode ser influenciada por fatores como heterogeneidade espacial da fertilidade, histórico de adubação, acúmulo superficial de resíduos e diferenças na ciclagem de nutrientes pelas espécies de cobertura.

Tabela 6 – Valores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio nas camadas 0,0 – 0,1 m e 0,1-0,2 m, após cultivo de culturas de cobertura.

Cultura de cobertura	P _{resina}	K ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	P _{resina}	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
	mg dm ⁻³	 mmol _c dm ⁻³	 mmol _c dm ⁻³	 mmol _c dm ⁻³	mg dm ⁻³	 mmol _c dm ⁻³	 mmol _c dm ⁻³	 mmol _c dm ⁻³
	0,0-0,1 m				0,1-0,2 m			
<i>C. cajan</i>	64,18 ± 32,30	4,28 ± 1,45	21,52 ± 8,91	6,47 ± 2,15	31,51 ± 13,42	1,35 ± 0,25	18,32 ± 7,31	5,44 ± 1,80
<i>C. juncea</i>	75,43 ± 26,02	4,20 ± 1,39	23,24 ± 9,94	6,63 ± 2,22	36,12 ± 15,48	1,54 ± 0,33	21,82 ± 9,40	5,47 ± 2,09
<i>C. ochroleuca</i>	37,22 ± 12,77	4,44 ± 0,54	18,48 ± 7,37	6,73 ± 2,15	17,15 ± 8,84	0,89 ± 0,19	18,99 ± 7,93	5,27 ± 1,51
<i>C. spectabilis</i>	74,42 ± 24,49	5,68 ± 0,56	29,28 ± 5,30	8,07 ± 1,09	36,92 ± 14,22	1,88 ± 0,49	24,53 ± 4,10	6,88 ± 0,74
<i>F. esculentum</i>	45,06 ± 19,25	3,25 ± 0,87	18,08 ± 8,09	7,09 ± 2,54	50,16 ± 39,72	1,04 ± 0,23	19,58 ± 10,32	5,86 ± 2,85
Pousio	82,33 ± 25,14	4,41 ± 1,07	27,61 ± 11,67	9,35 ± 3,28	32,78 ± 14,43	1,01 ± 0,12	25,64 ± 11,26	6,45 ± 2,69
<i>L. purpureus</i>	112,45 ± 64,67	4,18 ± 0,91	46,43 ± 21,67	8,45 ± 1,47	42,31 ± 17,63	1,44 ± 0,67	25,54 ± 4,31	6,11 ± 0,60
<i>M. pruriens</i>	46,41 ± 1,37	3,41 ± 0,28	20,81 ± 4,38	6,68 ± 1,18	33,09 ± 4,95	1,02 ± 0,35	21,04 ± 5,04	6,40 ± 1,17
<i>P. glaucum</i>	78,46 ± 31,29	5,09 ± 0,30	23,28 ± 8,16	7,41 ± 2,06	40,44 ± 13,78	1,37 ± 0,31	23,51 ± 7,36	6,22 ± 1,54
<i>R. sativus</i>	66,76 ± 25,58	4,33 ± 0,77	26,00 ± 2,60	8,92 ± 1,00	52,87 ± 38,72	1,09 ± 0,11	19,92 ± 8,06	5,87 ± 1,87
<i>S. bicolor</i>	98,50 ± 58,79	3,04 ± 0,55	33,00 ± 16,45	6,59 ± 2,20	40,48 ± 20,26	0,59 ± 0,13	28,61 ± 14,84	3,86 ± 1,70
<i>U. brizantha</i>	89,64 ± 32,01	2,98 ± 0,39	29,24 ± 11,88	7,41 ± 2,75	67,32 ± 31,74	0,92 ± 0,22	27,97 ± 12,40	6,61 ± 2,74
Média	72,57	4,11	26,41	7,48	40,1	1,18	22,96	5,87
CV (%)	65,92	30,61	47,85	26,35	79,08	45,96	37,73	32,9
P-valor	0,76	0,3	0,38	0,68	0,9	0,32	0,85	0,87
F-valor	0,65	1,28	1,14	0,76	0,47	1,24	0,5	0,52
Normalidade	0,27	0,5	0,06	0,66	0,5	0,74	0,39	0,59

Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott (p<0,05).

Fonte: o autor.

4.3 Atributos biológicos do solo

Os atributos biológicos do solo avaliados foram o conteúdo de carbono orgânico do solo nas camadas 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m e a atividade da enzima beta β -glicosidase na camada 0,0-0,1 m (Tabela 7). Os teores de carbono orgânico do solo (COS) não foram influenciados significativamente pelas culturas de cobertura nas duas camadas avaliadas. Na camada de 0,0–0,1 m, os valores variaram de 6,79 g dm⁻³, observado em *C. ochroleuca*, a 10,42 g dm⁻³, em *C. cajan*, com média geral de 9,18 g dm⁻³. Apesar dessa variação numérica entre os tratamentos, não houve diferença estatística entre as culturas de cobertura, conforme indicado pelo valor de $p = 0,66$.

Tabela 7 – Valores de carbono orgânico do solo e atividade da enzima β -glicosidase (BGL), após cultivo de culturas de cobertura.

Cultura de cobertura	COS g dm ⁻³		BGL <i>p</i> -nitrofenol ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)
	0,0 - 0,1 m	0,1 - 0,2 m	0,0 - 0,1 m
<i>C. cajan</i>	10,42 $\pm$ 1,74	6,47 $\pm$ 0,57	55,71 $\pm$ 13,50 ab
<i>C. juncea</i>	10,25 $\pm$ 1,98	7,25 $\pm$ 0,22	66,88 $\pm$ 11,10 ab
<i>C. ochroleuca</i>	6,79 $\pm$ 1,00	6,27 $\pm$ 0,78	78,01 $\pm$ 20,00 ab
<i>C. spectabilis</i>	9,78 $\pm$ 0,55	6,25 $\pm$ 0,83	95,08 $\pm$ 11,80 a
<i>F. esculentum</i>	8,20 $\pm$ 0,83	6,33 $\pm$ 2,08	69,44 $\pm$ 19,20 ab
Pousio	9,79 $\pm$ 0,85	7,50 $\pm$ 2,02	56,99 $\pm$ 11,00 ab
<i>L. purpureus</i>	9,65 $\pm$ 0,82	6,35 $\pm$ 1,32	89,04 $\pm$ 3,17 ab
<i>M. pruriens</i>	8,93 $\pm$ 1,05	7,59 $\pm$ 1,14	73,69 $\pm$ 8,47 ab
<i>P. glaucum</i>	9,17 $\pm$ 0,61	6,27 $\pm$ 0,91	82,48 $\pm$ 9,56 ab
<i>R. sativus</i>	9,61 $\pm$ 1,10	6,61 $\pm$ 1,53	67,58 $\pm$ 8,89 ab
<i>S. bicolor</i>	8,16 $\pm$ 0,94	6,21 $\pm$ 1,06	52,34 $\pm$ 14,20 b
<i>U. brizantha</i>	9,39 $\pm$ 1,86	7,46 $\pm$ 1,68	69,33 $\pm$ 15,60 ab
Média	9,18	6,71	71,38
CV (%)	22,09	33,79	19,52
P-valor	0,66	0,99	0,002
F-valor	0,77	0,18	2,67
Normalidade	0,24	0,55	0,38

Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: o autor.

Na camada de 0,1–0,2 m, também não foi observado efeito significativo dos tratamentos sobre o COS, com valor de $p = 0,99$. Nessa profundidade, os teores variaram de 6,21 g dm⁻³, em *S. bicolor*, a 7,59 g dm⁻³, em *M. pruriens*, com média

geral de $6,71 \text{ g dm}^{-3}$. De modo geral, os valores de COS foram numericamente menores na camada subsuperficial em comparação à camada de 0,0–0,1 m, evidenciando maior acúmulo de carbono na porção mais superficial do solo.

Por outro lado, a atividade da enzima β -glicosidase (BGL) foi significativamente alterada pelas culturas de cobertura na camada de 0,0–0,1 m, com valor de $p = 0,002$. Os valores variaram de $52,34 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, em *S. bicolor*, a $95,08 \mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, em *C. spectabilis*. A maior atividade enzimática foi observada no tratamento com *C. spectabilis*, o qual diferiu estatisticamente de *S. bicolor*, que apresentou o menor valor. Os demais tratamentos apresentaram comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente nem do tratamento com maior atividade nem daquele com menor atividade.

Esses resultados demonstram que, embora as culturas de cobertura não tenham promovido alterações significativas nos teores de COS nas camadas avaliadas, houve resposta significativa da atividade da β -glicosidase na camada superficial do solo. Esse comportamento sugere que a atividade enzimática pode responder de forma mais sensível às alterações promovidas pelas culturas de cobertura, especialmente em curto prazo, quando comparada ao conteúdo de carbono orgânico do solo.

4.4 Saúde do solo acessada pelo índice SMAF

O índice de qualidade do solo (SQI), obtido por meio da ferramenta SMAF, apresentou diferenças significativas entre os tratamentos na camada de 0,0 – 0,1 m (Tabela 8).

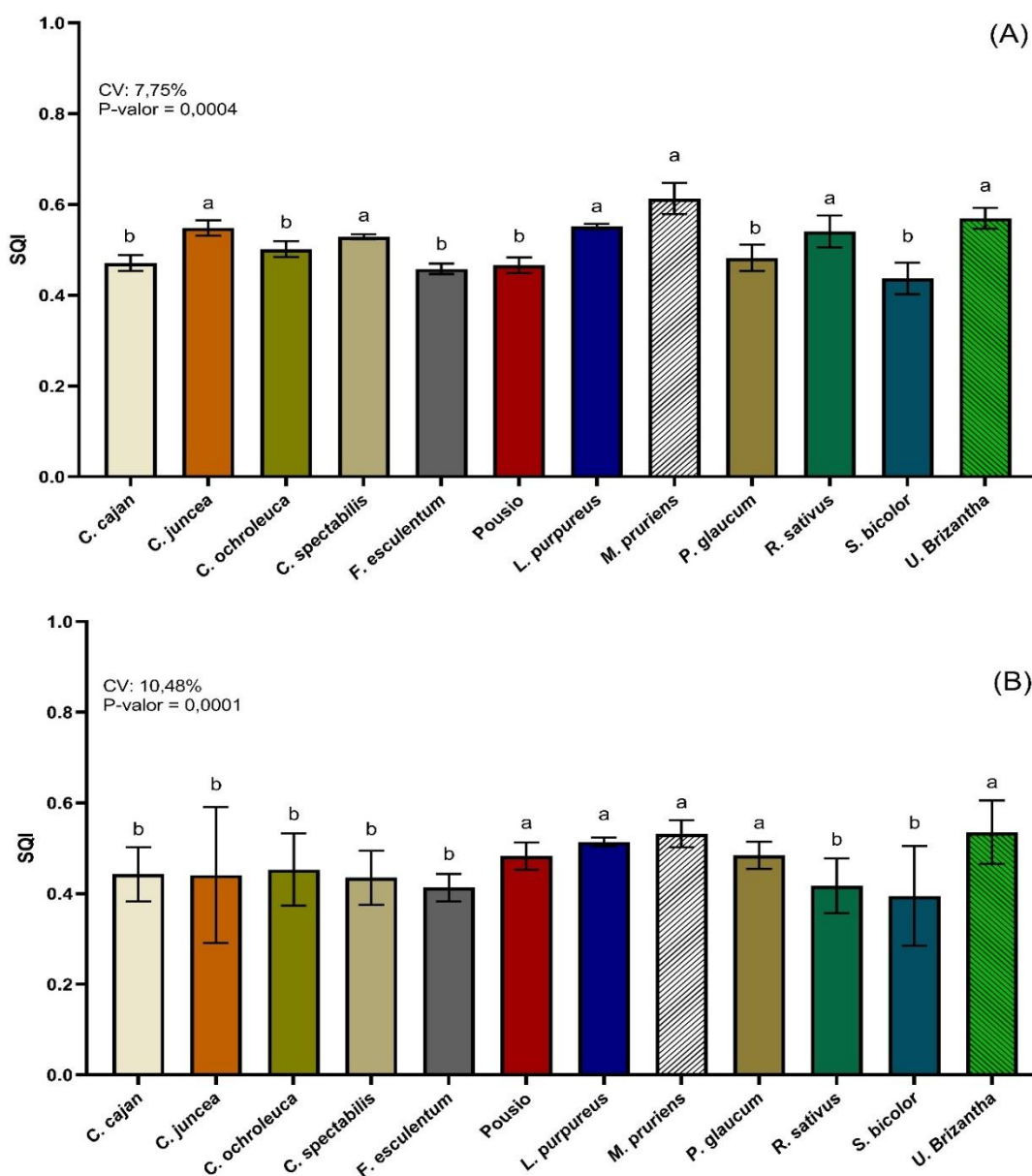
Tabela 8 - Resumo da análise de variância para o índice de saúde do solo (IQS) nas camadas 0,00 – 0,10 m; 0,10 – 0,20 m.

Fonte de variação	GL	SQI (0,00-0,10 m)	SQI (0,10-0,20 m)
Tratamentos	11	5,30*	2,84*
Bloco	2	1,53 ^{ns}	13,82*
Erro	22	---	---
CV (%)	---	7,75	10,48
Média Geral	---	0,51	0,46

*significativo e ^{ns} não significativo a $p < 0,05$. Fonte: o autor.

Os valores de SQI variaram aproximadamente entre 0,43 e 0,61, evidenciando variação na condição geral do solo em função das culturas de cobertura avaliadas (Figura 3). Os maiores valores de SQI foram observados nos tratamentos com *M. pruriens*, *C. juncea*, *U. brizantha*, *L. purpureus*, *C. spectabilis* e *R. sativus*. Esses tratamentos apresentaram valores de SQI próximos ou superiores a 0,53; destacando-se em relação aos demais.

Figura 3 - Índice de qualidade do solo (SQI) após o cultivo de culturas de cobertura e milho acessado pela ferramenta SMAF referente as camadas de 0,00 – 0,10 m (A) e 0,10 – 0,20 m (B).



Barras com letras diferentes apresentam médias com diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: o autor.

Por outro lado, os menores valores de SQI foram observados nos tratamentos com *C. cajan*, *C. ochroleuca*, *F. esculentum*, Pousio, *P. glaucum* e *S. bicolor*, com valores de SQI predominantemente abaixo de 0,50. De forma geral, a maioria das culturas de cobertura promoveram valores intermediários de SQI na camada superficial do solo (Figura 3 A).

O índice de qualidade do solo (SQI), obtido por meio da ferramenta SMAF, apresentou diferenças significativas entre os tratamentos na camada de 0,1–0,2 m (Figura 3 B), conforme indicado pelo valor de $p = 0,0001$, com coeficiente de variação de 10,48%. Os valores de SQI variaram aproximadamente entre 0,39 e 0,53, indicando variação na condição geral do solo em função das culturas de cobertura avaliadas.

Os maiores valores de SQI foram observados nos tratamentos com *U. brizantha*, *M. pruriens*, *L. purpureus*, *P. glaucum* e pousio, os quais compuseram o grupo estatisticamente superior, com valores próximos ou superiores a 0,48. O tratamento com *U. brizantha* apresentou o maior valor médio de SQI nessa camada. Por outro lado, os tratamentos com *C. cajan*, *C. juncea*, *C. ochroleuca*, *C. spectabilis*, *F. esculentum*, *R. sativus* e *S. bicolor* apresentaram valores inferiores de SQI, com valores predominantemente abaixo de 0,45.

De forma geral, observou-se redução dos valores absolutos de SQI na camada de 0,1–0,2 m em comparação à camada superficial, com manutenção da variabilidade entre culturas de cobertura e distinção estatística entre os grupos formados pelo teste de Scott–Knott.

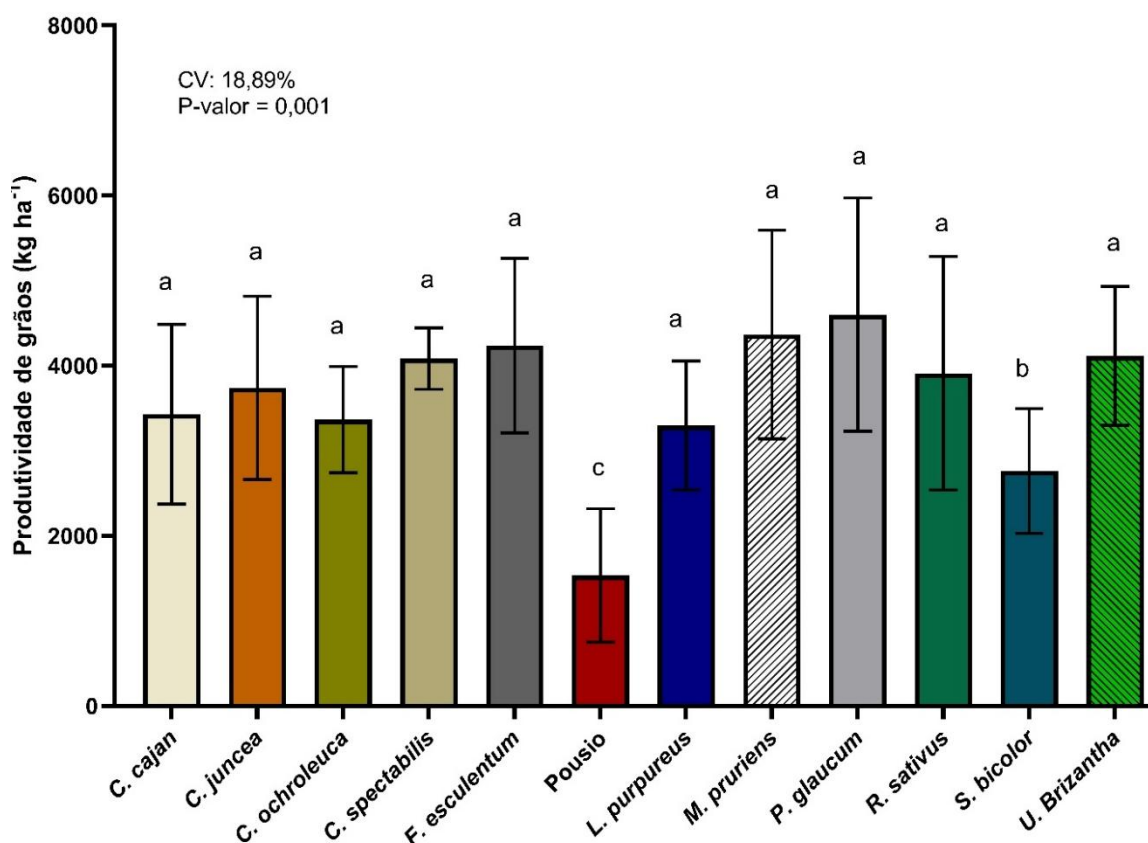
4.5 Produtividade de grãos de milho

A produtividade de grãos do milho variou significativamente em função das espécies de culturas de cobertura antecedendo o cultivo ($CV = 18,89\%$; $p = 0,001$), com separação dos tratamentos em três grupos estatísticos distintos pelo teste de Scott-Knott (Figura 4).

A maior parte dos tratamentos figuraram entre as maiores médias de produtividade, evidenciando desempenho superior do milho quando cultivado após as espécies de cobertura avaliadas. Entre os tratamentos classificados com a maior produtividade de grãos de milho, observaram-se os maiores valores médios para as parcelas cultivadas com *P. glaucum* ($4,599 \text{ t ha}^{-1}$), *M. pruriens* ($4,365 \text{ t ha}^{-1}$), *F.*

esculentum (4,236 t ha⁻¹), *U. brizantha* (4,114 t ha⁻¹) e *C. spectabilis* (4,083 t ha⁻¹), os quais figuraram entre os maiores rendimentos obtidos no experimento.

Figura 4 - Produtividade de grãos de milho (em kg ha⁻¹) cultivado após a aplicação das práticas de cobertura de solo.



Barras com letras diferentes apresentam médias com diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: o autor.

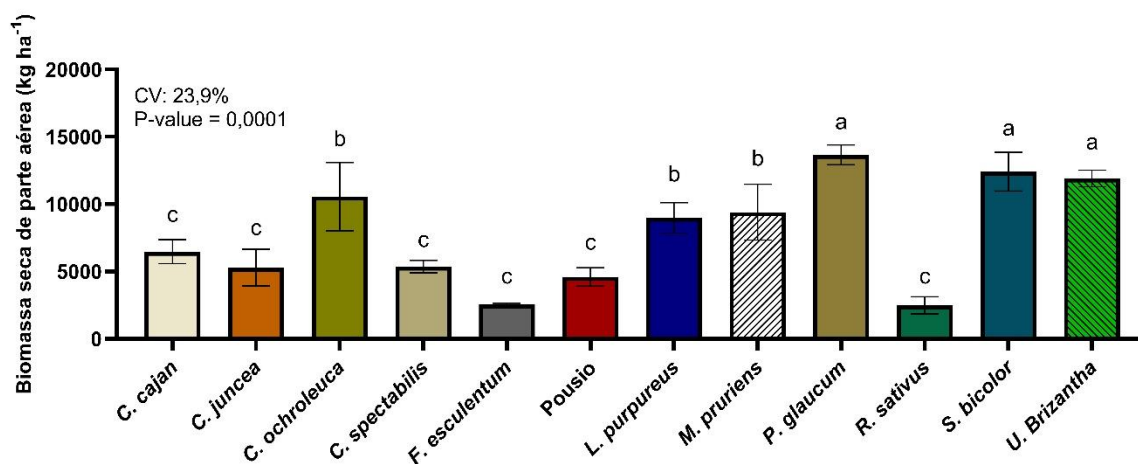
Ainda dentro do mesmo agrupamento estatístico, também se destacaram tratamentos com produtividades variando aproximadamente entre 3,3 e 4,0 t ha⁻¹, sendo: *C. juncea*, *C. cajan*, *C. ochroleuca*, *L. purpureus*, *M. pruriens* e *R. sativus*. Indicando que diferentes espécies de cobertura foram capazes de sustentar produtividades elevadas e relativamente próximas entre si. Por outro lado, o tratamento com *S. bicolor* apresentou produtividade de grãos de milho inferior em relação ao grupo de maior desempenho, com média de 2,769 t ha⁻¹. O tratamento pousio apresentou o menor valor de produtividade entre todos os avaliados (1,534 t ha⁻¹), o que evidencia o efeito negativo da cobertura vegetal com plantas indesejadas (daninhas) sobre o rendimento do milho no sistema.

4.6 Produtividade de biomassa seca da parte aérea das culturas de cobertura

A produtividade de biomassa seca da parte aérea das culturas de cobertura apresentou diferenças significativas entre os tratamentos avaliados ($p = 0,0001$) (Figura 5), evidenciando elevada variabilidade no desempenho produtivo das espécies, nas condições experimentais deste estudo. As maiores produtividades de biomassa foram observadas para *P. glaucum*, *S. bicolor* e *U. brizantha*, com valores superiores a $11.000 \text{ kg ha}^{-1}$. Esses tratamentos destacaram-se significativamente em relação às demais espécies, evidenciando elevado potencial de produção de parte aérea no período avaliado.

Um segundo grupo intermediário foi composto por *C. ochroleuca*, *L. purpureus* e *M. pruriens*, que apresentaram produtividades moderadas, variando entre 9.000 e $10.500 \text{ kg ha}^{-1}$, diferindo estatisticamente tanto do grupo de maior produtividade quanto das espécies de menor acúmulo de biomassa.

Figura 5 - Produtividade de biomassa seca da parte aérea das culturas de cobertura (em kg ha^{-1}).



Barras com letras diferentes apresentam médias com diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: o autor.

As menores produtividades de biomassa seca da parte aérea foram registradas para *C. cajan*, *C. juncea*, *C. spectabilis*, *F. esculentum*, área em pousio e *R. sativus*, com valores abaixo de 6.500 kg ha^{-1} . Dentre essas, *F. esculentum* e *R. sativus* se destacaram por apresentar os menores acúmulos de biomassa seca, abaixo de 2.600

kg ha⁻¹, indicando desempenho produtivo limitado nas condições edafoclimáticas do experimento.

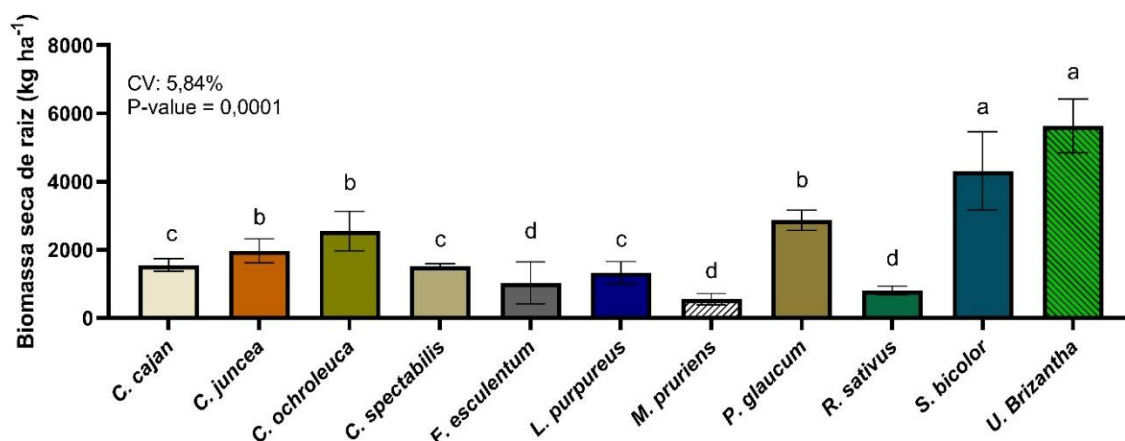
De modo geral, os resultados evidenciam ampla variação na capacidade de produção de biomassa da parte aérea entre as espécies de culturas de cobertura, reforçando a influência da escolha da espécie sobre o aporte de resíduos vegetais ao sistema de cultivo.

4.7 Avaliações radiculares

4.7.1 Biomassa seca radicular das culturas de cobertura

A produtividade de biomassa radicular das culturas de cobertura (camada 0,00-0,15 m) apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos avaliados ($p = 0,0001$) (Figura 6), com as maiores produtividades de biomassa radicular observadas para *U. brizantha* e *S. bicolor*, com valores superiores a 4.000 kg ha⁻¹, destacando-se significativamente em relação às demais espécies avaliadas.

Figura 6 - Produção de biomassa seca das raízes das culturas de cobertura (em kg ha⁻¹).



Barras com letras diferentes apresentam médias com diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: o autor.

Um grupo intermediário foi formado por *C. juncea*, *C. ochroleuca* e *P. glaucum*, que apresentaram produtividades radiculares variando aproximadamente entre 2.000

e 3.000 kg ha⁻¹. As espécies *C. cajan*, *C. spectabilis* e *L. purpureus* apresentaram produtividades radiculares, em torno de 1.200 a 1.600 kg ha⁻¹. Em níveis ainda mais inferiores, *F. esculentum*, *M. pruriens* e *R. sativus* apresentaram baixos acúmulos de biomassa radicular, com valores inferiores a 1.000 kg ha⁻¹. Na área mantida em pousio não foram realizadas coletas de biomassa radicular.

De forma geral, os resultados evidenciam ampla variabilidade entre as espécies quanto à produção de biomassa radicular, ressaltando a influência da escolha da planta de cobertura sobre o aporte de raízes ao solo e, consequentemente, sobre os processos físicos e biológicos associados ao sistema radicular.

4.7.2 Comprimento e volume de raízes

Os resultados referentes ao comprimento e ao volume de raízes das culturas de cobertura, obtidos por meio da análise no sistema WinRhizo (Figura 7), evidenciaram diferenças significativas entre os tratamentos ($p < 0,01$), indicando efeito das espécies sobre o desenvolvimento do sistema radicular (Tabela 9).

Tabela 9 - Comprimento e volume de raízes de culturas de cobertura.

Culturas de cobertura	Comprimento (cm cm⁻¹)		Volume (cm³ cm⁻³)	
<i>C. cajan</i>	2.381,37 ± 592,94	b	6,19 ± 1,76	b
<i>C. juncea</i>	5.200,42 ± 1.266,23	b	9,77 ± 2,04	b
<i>C. ochroleuca</i>	5.995,87 ± 720,77	b	11,54 ± 0,92	b
<i>C. spectabilis</i>	5.780,80 ± 816,24	b	11,04 ± 1,85	b
<i>F. esculentum</i>	6.843,70 ± 2.929,53	b	11,81 ± 5,77	b
<i>L. purpureus</i>	1.499,23 ± 1.251,94	b	6,99 ± 2,21	b
<i>M. pruriens</i>	3.591,56 ± 630,76	b	5,04 ± 0,53	b
<i>P. glaucum</i>	7.071,27 ± 752,12	b	17,43 ± 3,21	b
<i>R. sativus</i>	4.532,49 ± 513,01	b	9,20 ± 1,76	b
<i>S. bicolor</i>	8.415,27 ± 2.658,32	b	26,38 ± 6,29	a
<i>U. Brizantha</i>	14.338,88 ± 1.005,45	a	33,75 ± 3,35	a
Média	5968,26		13,56	
CV (%)	43,62		43,18	
P valor	0,0008		0,0001	

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: o autor.

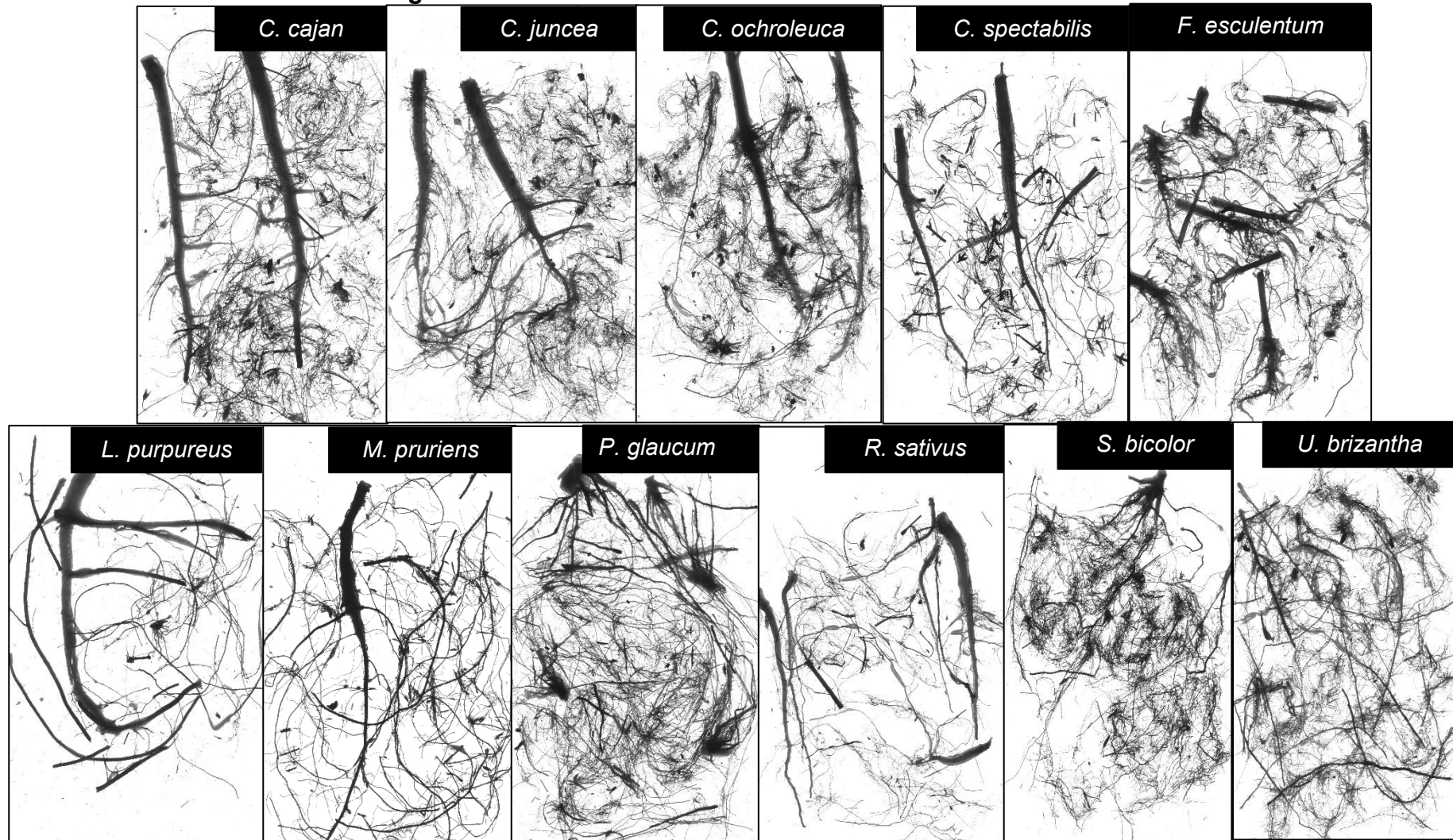
Para o comprimento de raízes, observou-se que *U. brizantha* apresentou o maior valor médio (14.338,88 cm), diferindo estatisticamente das demais espécies. Em contraste, todas as demais culturas de cobertura avaliadas foram agrupadas em um segundo grupo, não apresentando diferenças significativas entre si. Entre essas, destacaram-se as médias de *L. purpureus*, que apresentou o menor comprimento médio de raízes (1.499,23 cm). A média geral para essa variável foi de 5.968,26 cm, associada a um coeficiente de variação de 43,62%, indicando elevada variabilidade experimental.

Em relação ao volume de raízes, verificou-se comportamento semelhante ao observado para o comprimento, com diferenças significativas entre os tratamentos ($p = 0,0001$). O valor médio geral para o volume radicular foi de 13,56 cm³, com coeficiente de variação de 43,18%, também indicando expressiva variabilidade entre as unidades experimentais.

As maiores médias foram registradas para *U. brizantha* (33,75 cm³) e *Sorghum bicolor* (26,38 cm³), evidenciando maior desenvolvimento volumétrico do sistema radicular nessas espécies. As demais culturas de cobertura foram classificadas em um segundo grupo, com valores variando de $5,04 \pm 0,53$ cm³, em *Mucuna pruriens*, a $17,43 \pm 3,21$ cm³, em *P. glaucum*.

De modo geral, os resultados demonstram que *U. brizantha* e *S. bicolor* se destacaram quanto ao desenvolvimento do sistema radicular, especialmente em termos de volume, refletindo maior exploração do solo.

Figura 7 – Análise das raízes através do software WinRHIZO



Fonte: o autor.

5 DISCUSSÃO

5.1 Atributos do solo após o cultivo de culturas de cobertura

A ausência de efeito significativo para a maior parte dos atributos físicos, químicos e para o carbono orgânico do solo pode estar relacionada ao curto período de condução do experimento (Blanco-Canqui & Jasa, 2019). Considerando que o estudo foi realizado durante apenas um ano agrícola, esse intervalo pode não ter sido suficiente para que as espécies de cobertura promovessem alterações mensuráveis nos atributos do solo, assim como reportado por (Acuña & Villamil, 2014) em seu estudo avaliando o efeito de curto prazo de culturas de cobertura nas propriedades do solo e produtividade da soja (*Glycine max* L.) no qual os resultados mostraram que um ciclo de cultivo não foi suficiente para evidenciar alterações nas propriedades do solo relacionadas à cultura de cobertura. Em seu trabalho avaliando efeito do cultivo de culturas de cobertura por 3 anos, (Liebig *et al.*, 2015) também reporta que o cultivo dessas plantas não apresentou efeitos significativos nas propriedades do solo próximo à superfície.

Assim, é possível que a manutenção do sistema por períodos mais longos seja necessária para que os efeitos acumulativos do aporte de resíduos, da atividade radicular e da ciclagem de nutrientes se expressem de forma mais evidente nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Blanco-Canqui & Ruis, 2020; Koudahe *et al.*, 2022).

As culturas de cobertura alteraram de forma mais evidente dois atributos associados à funcionalidade superficial do solo, a densidade do solo e a atividade da β -glicosidase. A menor densidade do solo observada em parte dos tratamentos na camada de 0,0–0,1 m sugere que algumas culturas de cobertura contribuíram para melhorar a condição física superficial do solo. Esse efeito pode estar relacionado à ação das raízes (Hudek *et al.*, 2022), ao aporte de biomassa (Finney *et al.*, 2016) e ao estímulo à agregação (Dai *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2005). Entretanto, no presente estudo, a redução da densidade não foi acompanhada por alterações significativas na macroporosidade, microporosidade e porosidade total. Esse resultado contrasta com resultados apontados na literatura, onde os efeitos do cultivo de culturas de cobertura na densidade do solo são frequentemente acompanhados por efeitos na porosidade do solo (Çerçioğlu *et al.*, 2019; S. I. Haruna *et al.*, 2018; Villamil *et al.*, 2006; Yan &

Arthur, 2025). Esse resultado sugere que nas condições avaliadas, a densidade do solo foi mais sensível as alterações promovidas pelas culturas de cobertura em comparação com os demais parâmetros físicos avaliados.

A atividade da β -glicosidase foi significativamente influenciada pelas culturas de cobertura na camada superficial. Esse resultado indica que a atividade da β -glicosidase foi mais sensível para captar às diferenças entre espécies, o que corrobora com o estudo de Chavarria *et al.*, 2016) e (Feng *et al.*, 2021) que evidenciam o impacto que o cultivo de culturas de cobertura exerce na atividade dessa enzima. A β -glicosidase participa da degradação de compostos orgânicos relacionados ao ciclo do carbono e é considerada um indicador sensível da atividade microbiana e da decomposição de resíduos vegetais, essa enzima atua na degradação da celulose em glicose e desempenha papel importante no ciclo do carbono no solo (Adetunji *et al.*, 2017; Lehman *et al.*, 2024; Stott *et al.*, 2010).

A maior atividade de β -glicosidase observada sob *C. spectabilis* sugere maior estímulo à atividade microbiana relacionada à decomposição de compostos orgânicos nessa cultura de cobertura, por outro lado, a menor atividade observada sob *S. bicolor* pode estar relacionada à composição química dos resíduos de gramíneas (Hu *et al.*, 2024). Esse resultado contrasta com os apontados por Côté *et al.*, 2025), onde *C. spectabilis* apresentou menor atividade da enzima β -glicosidase quando comparada a gramíneas (*U. brizantha* e *P. glaucum*). A dinâmica da atividade enzimática encontrada neste estudo pode estar associada à relação C:N dos resíduos (Xu *et al.*, 2024), à atividade radicular (Lee *et al.*, 2025) e à maior disponibilidade de substratos para os microrganismos. Ainda assim, essa interpretação deve ser feita com cautela, pois a atividade enzimática também é regulada por umidade (Zhang *et al.*, 2011), temperatura (Zhang *et al.*, 2025), pH (Fraser *et al.*, 2024; Wade *et al.*, 2021), profundidade e textura do solo (Pereira *et al.*, 2025; Silwana *et al.*, 2025).

De modo geral, os resultados demonstram que os efeitos das culturas de cobertura em curto prazo foram detectados principalmente por atributos físicos (densidade do solo) e biológicos (β -glicosidase) da camada superficial. A densidade do solo indicou alterações na condição estrutural, enquanto a β -glicosidase evidenciou mudanças na funcionalidade biológica ligada ao ciclo do carbono. Por outro lado, os atributos químicos, as frações da porosidade e o carbono orgânico total apresentaram menor sensibilidade no período avaliado. Esse padrão reforça que a interpretação dos efeitos das culturas de cobertura deve considerar a integração dos indicadores, uma

vez que atributos físicos, químicos e biológicos respondem em velocidades distintas às mudanças promovidas pelo manejo.

5.2 Saúde do solo acessada pelo índice SMAF

A avaliação integrada da saúde do solo por meio do *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) evidenciou resposta diferenciada do índice de qualidade do solo (SQI) entre as camadas avaliadas e as práticas de cobertura. O padrão encontrado neste estudo reflete a sensibilidade da zona superficial do perfil do solo às práticas de manejo e à sucessão entre culturas de cobertura e milho, conforme documentado em estudos que utilizam abordagens de qualidade do solo, em função dos indicadores utilizados pelo SMAF (e.g., carbono orgânico, fósforo disponível, densidade do solo) (Blanco-Canqui *et al.*, 2023; Rickard *et al.*, 2025). Andrews *et al.* (2004) destacam que o SMAF foi concebido justamente para capturar alterações funcionais do solo associadas a práticas agrícolas, sendo particularmente eficaz em camadas onde a atividade radicular, o aporte de resíduos vegetais e a bioturbação são mais intensos.

Os valores médios de SQI observados nos gráficos reforçam esse comportamento vertical do solo. Na camada de 0,00–0,10 m e 0,00–0,20 m, determinados sistemas apresentaram índices significativamente superior, indicando melhoria integrada das funções do solo, enquanto outros mantiveram valores mais baixos, refletindo menor eficiência funcional do sistema solo–planta. Resultados semelhantes foram relatados por Cherubin *et al.* (2016), que em sua avaliação de saúde do solo através do SMAF, demonstraram que as respostas mais pronunciadas ocorrem nas camadas superficiais em sistemas com maior aporte de resíduos e diversidade de culturas, diminuindo o score com a profundidade do solo, independente do sistema de uso.

Vale ressaltar que na camada de 0,10–0,20 m, os resultados indicam que os efeitos das culturas de cobertura não se restringiram exclusivamente à superfície do solo, mas também promoveram melhorias funcionais em subsuperfície, possivelmente associadas ao crescimento radicular mais profundo (Joshi *et al.*, 2026), redução da densidade do solo (Shah *et al.*, 2017) e à modificação gradual da estrutura do solo (Rabot *et al.*, 2018).

Karlen *et al.* (2001) ressalta que o uso de índices integrativos de avaliação da saúde do solo não substitui a análise individual dos atributos edáficos, mas amplia a compreensão do funcionamento do sistema solo como um todo, especialmente no contexto da sustentabilidade agrícola. Desse modo, esses índices permitem o monitoramento das mudanças ao longo do tempo e fornecem subsídios técnicos para a tomada de decisão relacionada ao uso e ao manejo da terra.

Com relação as culturas de cobertura, *U. brizantha*, pousio e *M. pruriens* se destacam por estarem entre os grupos com os maiores scores de SQI nas camadas 0,00 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m, corroborando com os achados na literatura nos estudos com *U. brizantha* (Bonetti *et al.*, 2025; Rocha *et al.*, 2023) para uso em curto prazo e seus efeitos na qualidade do solo; e *M. pruriens* e seu alto potencial de recuperação do solo através da fixação de nitrogênio, aumento do carbono orgânico do solo e diversificação da biota do solo (Barthès *et al.*, 2004; Blanchart *et al.*, 2006; Muoni *et al.*, 2019). Gentsch *et al.* (2024) destaca que o uso de culturas de cobertura contribui para a melhoria da estrutura em solos aráveis, desse modo, aumentar a diversidade funcional de espécies vegetais em misturas de culturas de cobertura pode ser uma estratégia para aprimorar ainda mais seus efeitos positivos em ecossistemas agrícolas.

A área em posuio também figura entre os maiores índices, possivelmente devido à alta diversidade de espécies, consequentemente, diversidade de raízes, liberação de nutrientes, aporte de material orgânico (Aweto, 1981; Bruun *et al.*, 2006; Burdukovskii *et al.*, 2020). Contudo, deve-se destacar, que a diversidade de plantas nessa área é constituída principalmente de plantas daninhas, ou seja, um mix de plantas indesejáveis, como consequência tem-se um aumento na necessidade de controle e entradas na área, que são potencialmente prejudiciais ao desenvolvimento de culturas subsequentes (Choudhary, 2023; Smith *et al.*, 2010; Swanton *et al.*, 2015).

Esses achados reforçam o papel das culturas de cobertura como ferramentas importantes para a construção da qualidade funcional do solo em sistemas agrícolas tropicais. Ao mesmo tempo, evidenciam a necessidade de avaliações integradas da saúde do solo, uma vez que indicadores analisados isoladamente, como densidade do solo, macroporosidade e disponibilidade de nutrientes, podem não ser suficientemente sensíveis para detectar mudanças entre tratamentos no curto prazo. Nesse sentido, índices integradores de saúde do solo permitem captar respostas

combinadas entre atributos físicos, químicos e biológicos, oferecendo uma interpretação mais abrangente dos efeitos do manejo.

5.3 Produção de biomassa e desenvolvimento radicular das culturas de cobertura

A produção de biomassa vegetal constitui um dos principais indicadores da eficiência das culturas de cobertura, por estar diretamente relacionada à proteção do solo, à ciclagem de nutrientes e à manutenção da matéria orgânica (Finney *et al.*, 2016).

As maiores produtividades registradas para *P. glaucum*, *S. bicolor* e *U. brizantha* podem ser atribuídas às características fisiológicas dessas espécies, como o rápido crescimento inicial e a elevada capacidade de exploração do solo. Esses atributos favorecem o acúmulo de biomassa em condições tropicais, contribuindo para maior aporte de resíduos vegetais e formação de palhada persistente (Baptistella *et al.*, 2020).

Os tratamentos com *C. ochroleuca*, *L. purpureus* e *M. pruriens*, apresentaram produção intermediária de biomassa, refletindo um equilíbrio entre crescimento vegetativo e alocação de recursos. Além da produção de palha, essas espécies se destacam pelo potencial de fixação biológica de nitrogênio, o que pode favorecer a fertilidade do solo e o desenvolvimento da cultura subsequente (Berriel *et al.*, 2020; Sujatha *et al.*, 2024).

As menores produtividades observadas para *C. cajan*, *C. juncea*, *C. spectabilis*, *F. esculentum* e *R. sativus* contrastam com os achados por Berriel *et al.* (2020), que, que destacam a *C. juncea* e *C. spectabilis* com elevado potencial produtivo de biomassa e fixação biológica de nitrogênio, esse resultado pode estar associado à menor adaptação e menor eficiência no uso dos recursos nas condições edafoclimáticas deste estudo.

A baixa produção de biomassa da área em pousio sugere que, apesar de ser composta por espécies espontâneas adaptadas às condições edafoclimáticas locais, a elevada diversidade de plantas e competição por recursos entre espécies, pode resultar na formação de plantas de porte reduzido, consequentemente, com menor capacidade de acúmulo de biomassa como observado em estudos que relatam queda

de biomassa/performance individual com o aumento da riqueza de espécies em comunidades vegetais (Roscher, 2025).

Além disso, em sistemas agrícolas, a capacidade competitiva da vegetação está mais relacionada à produção total de biomassa do que à diversidade de espécies. Desse modo, áreas em pousio são formadas por plantas com vigor reduzido em função da intensa competição intra e interespecífica, resultando em menor crescimento individual e menor acúmulo de massa seca. Em contrapartida, culturas de cobertura cultivadas apresentam elevado potencial produtivo, rápido fechamento do dossel e maior aporte de resíduos vegetais, favorecendo maior produção de biomassa (MacLaren *et al.*, 2019).

A avaliação da biomassa radicular de plantas é um importante parâmetro para determinar o potencial de desenvolvimento radicular em culturas de cobertura, visto que, as raízes exercem papel fundamental na manutenção da qualidade dos solos. Os maiores valores de biomassa radicular encontrados neste estudo são referentes a espécies do grupo das gramíneas, *U. brizantha* (5.632,00 kg ha⁻¹) e *S. bicolor* (4.313,33 kg ha⁻¹), frequentemente, relacionadas ao maior desenvolvimento radicular quando comparadas a espécies vegetais do grupo das leguminosas (Podzikowski *et al.*, 2023).

De modo geral, gramíneas frequentemente investem fortemente em raízes finas, por isso, tendem a apresentar maiores valores de biomassa radicular, bem como, alta capacidade de exploração do solo, influenciada pelo sistema radicular fasciculado com maiores comprimentos de pelos radiculares, alta capacidade competitiva por recursos (e.g., água e nutrientes) e maior volume de raízes (Carmona *et al.*, 2021).

Em contrapartida, a ampla variabilidade nos valores de biomassa radicular entre as demais culturas de cobertura (551,00 a 2.868,00 Kg ha⁻¹), pode ter ocorrido em função das diferenças morfológicas entre as espécies, assim como, da capacidade adaptativa das espécies as condições deste estudo. A exemplo das crotalárias, (Mosjidis & Wang, 2011) destacam que ocorrem diferenças importantes entre espécies, principalmente relacionados ao porte das plantas e a biomassa de raízes, onde a *C. juncea* se destaca por apresentar portes mais altos e elevada produção de biomassa radicular. Nesse contexto, os resultados deste estudo apontam para uma igualdade na produção de biomassa radicular entre *C. juncea* e *C. ochroleuca*, e menor capacidade de produção de raízes por parte das plantas de *C. spectabilis*.

Desse modo, os dados de biomassa radicular destacam a elevada capacidade de *U. brizantha* e *S. bicolor* em promover um elevado desenvolvimento radicular nas condições avaliadas, principalmente em camadas superficiais do solo. Contudo, espécies do grupo das leguminosas devem ser consideradas como potenciais estratégias de manejo de cobertura de solo, pois a seleção correta de espécies pode compensar sua menor produção de raízes, com o aporte de nitrogênio no sistema proveniente da fixação biológica.

Dados relacionados ao comprimento e volume de raízes são essenciais e complementares para avaliação do desenvolvimento radicular por espécies vegetais. Em consonância com os dados de biomassa radicular, os maiores valores de comprimento de raízes para os tratamentos com *U. brizantha*, sugere uma alta capacidade de desenvolvimento radicular por parte dessas espécies, assim como reportado por (Huot *et al.*, 2020) que destacam a alta capacidade de exploração radicular do solo por espécies que apresentam sistema radicular fasciculado.

É recorrente em estudos que avaliam o desenvolvimento radicular (Craine *et al.*, 2003; Evans, 1977; Yang *et al.*, 2017), que espécies vegetais do grupo das gramíneas apresentem maiores valores de volume radicular quando comparadas as leguminosas, especialmente quando amostradas camadas mais superficiais do solo, desse modo, os resultados deste estudo corroboram com os reportados na literatura, onde, os tratamentos com *S. bicolor* e *U. brizantha*, apresentaram os maiores valores de volume radicular, 33,75 e 26,38 cm³ cm⁻³, respectivamente.

Esses resultados podem ter ocorrido em função da alta adaptação dessas espécies as condições edafoclimáticas do estudo, assim como, da capacidade de ocupação e exploração radicular dessas espécies de gramíneas, que resulta em plantas de maior vigor, conseqüentemente, com maior desenvolvimento radicular (Mendoza *et al.*, 2016).

Desse modo, em função dos melhores resultados, nas condições edafoclimáticas deste estudo, culturas como *Sorghum bicolor* e *Urochloa brizantha* apresentam elevado potencial para promover melhorias nas propriedades físicas do solo influenciadas pelo desenvolvimento radicular, especialmente a densidade do solo, a porosidade total e a macroporosidade.

5.4 Produtividade de grãos de milho

A produtividade de grãos do milho foi significativamente influenciada pelas culturas de cobertura antecedendo a cultura ($p = 0,001$). Esse comportamento é consistente com a ideia de que a presença de cobertura vegetal atua como um componente chave de melhoria do ambiente edáfico, sobretudo por efeitos associados à qualidade física do solo, como maior proteção superficial, estabilização estrutural e incremento da funcionalidade da porosidade (Adetunji *et al.*, 2020).

Revisões em diferentes sistemas agrícolas mostram que culturas de cobertura têm potencial de influenciar na densidade do solo e infiltração de água, atributos diretamente relacionados à melhoria das condições para crescimento radicular e maior eficiência no uso de água pela cultura subsequente (Adetunji *et al.*, 2020; Haruna *et al.*, 2020).

O melhor desempenho observado em coberturas como *P. glaucum* e *U. brizantha* pode ser interpretado, pela capacidade dessas espécies em produzir elevada biomassa de parte aérea e, principalmente, um sistema radicular abundante e agressivo, contribuindo para a formação e manutenção de bioporos, redução de impedimentos físicos e maior conectividade entre poros (Bertollo *et al.*, 2021; Xiong *et al.*, 2022).

Em solos sob plantio direto, a adoção de coberturas foi associada à alteração de atributos estruturais, incluindo redução de densidade do solo e maior estabilidade do sistema de agregados, o que favorece condições mais adequadas para o desenvolvimento de culturas subseqüentes, especialmente em períodos críticos de déficit hídrico (Haruna *et al.*, 2023; Koudahe *et al.*, 2022b; Saha *et al.*, 2024). Além disso, a manutenção de palhada na superfície exerce papel central na dinâmica físico-hídrica do sistema, contribuindo para redução da evaporação, maior conservação de umidade e amortecimento de variações térmicas, efeitos que se refletem em maior continuidade do crescimento radicular e, conseqüentemente, maior suporte ao enchimento de grãos do milho (Shen *et al.*, 2018; Tuure *et al.*, 2021).

Em condições de compactação, estudos demonstram que diferentes coberturas são capazes de promover mudanças físicas mensuráveis, reduzindo efeitos de selamento superficial, erosão, e favorecendo infiltração, o que impacta diretamente a eficiência do sistema em captar e armazenar água no perfil (Gabriel *et al.*, 2021; Ruan *et al.*, 2001; Serafim *et al.*, 2025).

Por outro lado, a menor produtividade de grãos de milho observada no tratamento com *S. bicolor*, em comparação aos tratamentos com as demais culturas de cobertura, sugere que, apesar da alta produção de biomassa, seus efeitos no ambiente radicular e na porosidade podem não ter sido tão eficientes. Esse resultado reforça que não é apenas a quantidade de palhada, mas também a forma como a espécie altera atributos do solo que pode determinar a magnitude do benefício produtivo na cultura sucessora (Koudahe *et al.*, 2022b). Além disso, o excesso de palhada pode, em determinadas condições, prejudicar o estabelecimento da cultura subsequente, ao dificultar a semeadura e a emergência, e interferir no crescimento inicial, o que pode se refletir negativamente no rendimento final (Wuest *et al.*, 2000)

Sabe-se que áreas mantidas em pousio com plantas daninhas, especialmente as nativas, fornecem importantes serviços ecossistêmicos, como recuperação e diminuição de perda de N, acúmulo de água e aporte de biomassa no solo (Wortman, 2016). Apesar desses efeitos benéficos, neste estudo, a produtividade de milho foi significativamente reduzida em comparação aos tratamentos mantidos com culturas de cobertura, esse resultado pode ter ocorrido em função das plantas daninhas inerentes ao tratamento com pousio, nessas áreas, a comunidade infestante tende a ocupar rapidamente o espaço disponível, intensificando a competição com as culturas de interesse por luz, água e nutrientes, especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento, período no qual a cultura é mais sensível à interferência e pode sofrer perdas expressivas de produtividade (Harre & Young, 2020; Kaur *et al.*, 2018; Zeleke, 2017).

6 CONCLUSÕES

O cultivo de culturas de cobertura em sucessão ao milho modificou a funcionalidade do Argissolo Vermelho-Amarelo em curto prazo, embora as respostas tenham variado entre os indicadores avaliados. Entre os atributos isolados, a densidade do solo e a atividade da β -glicosidase foram os mais responsivos aos tratamentos, evidenciando alterações na condição física e na funcionalidade biológica do solo, na camada superficial. Em contraste, a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, atributos químicos e carbono orgânico do solo apresentaram menor capacidade de discriminação entre as espécies no período experimental.

A avaliação integrada por meio do SMAF demonstrou maior sensibilidade para diferenciar os sistemas de cultivo em relação à maioria dos atributos isolados. Assim, os resultados confirmam que a integração de indicadores físicos, químicos e biológicos é mais adequada para caracterizar os efeitos das culturas de cobertura sobre o solo, sobretudo em curto prazo, quando as respostas individuais podem ser discretas ou ocorrer em diferentes velocidades.

As culturas de cobertura diferiram quanto à produção de biomassa aérea, biomassa radicular e características morfológicas das raízes, refletindo estratégias funcionais distintas entre as espécies. Gramíneas como *U. brizantha* e *S. bicolor* apresentaram maior desenvolvimento radicular, indicando potencial para contribuir com a estruturação física do solo. No entanto, a contribuição das espécies ao sistema solo-planta depende da combinação entre biomassa, arquitetura radicular, ciclagem de nutrientes e efeitos sobre a cultura subsequente.

A produtividade de grãos de milho foi influenciada pelas espécies antecessoras, demonstrando que a escolha da cultura de cobertura afeta o desempenho da cultura comercial em sucessão. Os maiores rendimentos foram observados após *P. glaucum*, *M. pruriens*, *F. esculentum*, *U. brizantha* e *C. spectabilis*, enquanto o pousio resultou na menor produtividade.

Portanto, os resultados demonstram que o uso de culturas de cobertura em sucessão ao milho pode favorecer a funcionalidade do solo e a produtividade da cultura subsequente em sistemas subtropicais. Além disso, a avaliação integrada por meio de índices de saúde do solo mostrou-se mais eficaz para capturar alterações sistêmicas no Argissolo Vermelho-Amarelo, especialmente em curto prazo.

REFERÊNCIAS

- ACUÑA, J. C. M.; VILLAMIL, M. B. Short-Term Effects of Cover Crops and Compaction on Soil Properties and Soybean Production in Illinois. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 3, p. 860–870, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj13.0370>.
- ADETUNJI, A. T. *et al.* Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104717, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>.
- ADETUNJI, A. T. *et al.* The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 3, p. 794–807, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000300018>.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 601–612, ago. 2003.
- ALMEIDA, D. S. *et al.* Can tropical grasses grown as cover crops improve soil phosphorus availability? **Soil Use and Management**, v. 34, n. 3, p. 316–325, 21 set. 2018.
- AMORIM, H. C. S. *et al.* Soil quality indices based on long-term conservation cropping systems management. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 3, n. 1, 11 jan. 2020.
- ANDRADE, C. A. O. *et al.* Straw production and agronomic performance of soybean intercropped with forage species in no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 10, p. 861–868, out. 2017.
- ANDREWS, S. S. *et al.* A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 90, n. 1, p. 25–45, jun. 2002.
- ANDREWS, S. S. *et al.* The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945–1962, nov. 2004.
- APOORVA, M. S.; KUNDLAS, K. Negative impacts of intensive agricultural practices on environment and ecosystem: A review. **International Journal of Research in Agronomy**, v. 7, n. 12, p. 285–289, 1 dez. 2024.
- AWETO, A. O. Organic Matter Build-Up in Fallow Soil in a Part of South-Western Nigeria and its Effects on Soil Properties. **Journal of Biogeography**, v. 8, n. 1, p. 67, jan. 1981.
- BAETS, S. *et al.* Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. **CATENA**, v. 85, n. 3, p. 237–244, jun. 2011.
- BALOTA, E. L. *et al.* Enzimas e seu papel na qualidade do solo. <https://www.researchgate.net/publication/288482294>. 2013.

BAPTISTELLA, J. L. C. *et al.* Urochloa in Tropical Agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, 5 ago. 2020.

BARTHÈS, B. *et al.* Effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on soil carbon in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. **Soil Use and Management**, v. 20, n. 2, p. 231–239, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00363.x>.

BASCHE, A. D. *et al.* Simulating long-term impacts of cover crops and climate change on crop production and environmental outcomes in the Midwestern United States. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 218, p. 95–106, fev. 2016.

BERRIEL, V. *et al.* Cover Crop Selection by Jointly Optimizing Biomass Productivity, Biological Nitrogen Fixation, and Transpiration Efficiency: Application to Two *Crotalaria* Species. **Agronomy**, v. 10, n. 8, p. 1116, 1 ago. 2020.

BERTOLLO, A. M. *et al.* Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 206, p. 104820, fev. 2021.

BLANCHART, E. *et al.* Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, p. S136–S144, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.018>.

BLANCO-CANQUI, H. *et al.* Cover crops and soil health in rainfed and irrigated corn: What did we learn after 8 years? **Soil Science Society of America Journal**, v. 87, n. 5, p. 1174–1190, 27 set. 2023.

BLANCO-CANQUI, H.; JASA, P. J. Do Grass and Legume Cover Crops Improve Soil Properties in the Long Term? *Soil Science Society of America Journal*, 83(4), 1181–1187. 2019. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2019.02.0055>.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. Cover crop impacts on soil physical properties: A review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 5, p. 1527–1576, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20129>.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, Sabrina J. Cover crop impacts on soil physical properties: A review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 5, p. 1527–1576, 27 set. 2020.

BONETTI, J. de A. *et al.* Short-term effects of Urochloa intercropped with corn on the structure properties of a soil under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 49, 2025. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20240036>.

BORKERT, C. M. *et al.* Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 1, p. 143–153, jan. 2003.

BRENNAN, E. B.; ACOSTA-MARTINEZ, V. Cover Crops and Compost Influence Soil Enzymes during Six Years of Tillage-Intensive, Organic Vegetable Production. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 3, p. 624–637, maio 2019.

- BRUUN, T. B. *et al.* Linking yields of upland rice in shifting cultivation to fallow length and soil properties. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 113, n. 1–4, p. 139–149, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.09.012>.
- BURDUKOVSKII, M. *et al.* Impact of different fallow durations on soil aggregate structure and humus status parameters. **Soil and Water Research**, v. 15, n. 1, p. 1–8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17221/174/2018-SWR>.
- BŁAŻEWICZ-WOŹNIAK, M.; KONOPIŃSKI, M. Impact of cover crops and tillage on porosity of podzolic soil. **International Agrophysics**, v. 27, n. 3, p. 247–255, 1 set. 2013.
- CALONEGO, J. C. *et al.* Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31–37, abr. 2017.
- CANTARELLA, H. *et al.* Boletim 100: Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas - SP: IAC, 2022. v. 01.
- CARMONA, C. P. *et al.* Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function. **Nature**, v. 597, n. 7878, p. 683–687, 30 set. 2021.
- CARVALHO, A. M. *et al.* Chemical composition of cover crops and soil organic matter pools in no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 1, p. 940–952, 10 jan. 2022.
- ÇERÇİOĞLU, M. *et al.* Effect of cover crop management on soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 343, p. 247–253, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.027>.
- CERCIOGLU, M. *et al.* Effects of cover crop and biofuel crop management on computed tomography-measured pore parameters. **Geoderma**, v. 319, p. 80–88, jun. 2018.
- CHAVARRÍA, D. N. *et al.* Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. **European Journal of Soil Biology**, v. 76, p. 74–82, set. 2016.
- CHEN, G. *et al.* Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 61–69, mar. 2014.
- CHEN, G.; WEIL, R. R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 17–27, dez. 2011.
- CHERUBIN, M. R. *et al.* A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 1, p. 215–226, 5 jan. 2016.
- CHERUBIN, M. R. *et al.* Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, n. 0, 13 fev. 2017.

CHERUBIN, M. R. Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo. Universidade de São Paulo - USP. 2022. DOI: <https://doi.org/10.11606/9786589722151>.

CHOUDHARY, V. K. Weed suppression, weed seed bank and crop productivity influenced under tillage and mulches in maize-rapeseed cropping system. **Crop Protection**, v. 172, p. 106333, out. 2023.

CORDEIRO, C. F. S.; ECHER, Fábio Rafael; ARAUJO, Fabio Fernando. Cover Crops Impact Crops Yields by Improving Microbiological Activity and Fertility in Sandy Soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 1968–1977, 2021.

CÔRT, A. S. D. *et al.* Cover crop diversity improves the biochemical, physical and microbiological attributes of soil under long-term no-tillage. **Applied Soil Ecology**, v. 215, p. 106494, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106494>.

CRAINE, J. M. *et al.* Relationship between the structure of root systems and resource use for 11 North American grassland plants. **Plant Ecology**, v. 165, n. 1, p. 85–100, mar. 2003.

CRÈME, A. *et al.* Effects of grasses and a legume grown in monoculture or mixture on soil organic matter and phosphorus forms. **Plant and Soil**, v. 402, n. 1–2, p. 117–128, 19 maio 2016.

CRESSWELL, H. P.; KIRKEGAARD, J. A. Subsoil amelioration by plant-roots - the process and the evidence. **Soil Research**, v. 33, n. 2, p. 221, 1995.

CROTTY, F. V.; STOATE, C. The legacy of cover crops on the soil habitat and ecosystem services in a heavy clay, minimum tillage rotation. **Food and Energy Security**, v. 8, n. 3, 29 jul. 2019.

CROW, S. E. *et al.* The legacy of intensive agricultural history on the soil health of (sub)tropical landscapes. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, 1 fev. 2023.

CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Improving Soil Fertility and Crop Yield in a Tropical Region with Palisadegrass Cover Crops. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2271–2280, nov. 2015.

DABNEY, S. M. *et al.* Using winter cover crops to improve soil and water quality. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 7–8, p. 1221–1250, 30 abr. 2001.

DAI, W. *et al.* Influence of cover crops on soil aggregate stability, size distribution and related factors in a no-till field. **Soil and Tillage Research**, v. 244, p. 106197, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106197>.

DARYANTO, S. *et al.* Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 357–373, out. 2018.

DEEL, H. L. *et al.* SEMWISE: A national soil health scoring framework for agricultural systems. **Applied Soil Ecology**, v. 195, p. 105273, mar. 2024.

DEINES, J. M. *et al.* Recent cover crop adoption is associated with small maize and soybean yield losses in the United States. **Global Change Biology**, v. 29, n. 3, p. 794–807, 8 fev. 2023.

DING, G. *et al.* Effect of cover crop management on soil organic matter. **Geoderma**, v. 130, n. 3–4, p. 229–239, fev. 2006.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 15, n. 1, p. 3–11, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6).

DORAN, John W.; PARKIN, Timothy B. Defining and Assessing Soil Quality. In: **DORAN, W. et al.** (Orgs.). Defining soil quality for a sustainable environment. V. 35 ed.: Soil Science Society of America, 2015. p. 1–21.

EVANS, P. S. Comparative root morphology of some pasture grasses and clovers. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 20, n. 3, p. 331–335, 9 ago. 1977.

FAGERIA, N. K. *et al.* Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 36, n. 19–20, p. 2733–2757, out. 2005.

FENG, H. *et al.* On-farm assessment of cover cropping effects on soil C and N pools, enzyme activities, and microbial community structure. **The Journal of Agricultural Science**, v. 159, n. 3–4, p. 216–226, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/S002185962100040X>.

FINNEY, D. M. *et al.* Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 1, p. 39–52, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj15.0182>.

FINNEY, D. M. *et al.* Biomass Production and Carbon/Nitrogen Ratio Influence Ecosystem Services from Cover Crop Mixtures. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 1, p. 39–52, jan. 2016.

FINNEY, D. M. *et al.* Living cover crops have immediate impacts on soil microbial community structure and function. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 72, n. 4, p. 361–373, jul. 2017.

FRASER, T. D. *et al.* Optimizing pH for Soil Enzyme Assays Reveals Important Biochemical Functions in Low pH Soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 4, p. 6236–6247, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01866-y>.

GABRIEL, J. L. *et al.* Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. **Geoderma**, v. 386, p. 114911, mar. 2021.

GARCÍA-GONZÁLEZ, I. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungal activity responses to winter cover crops in a sunflower and maize cropping system. **Applied Soil Ecology**, v. 102, p. 10–18, jun. 2016.

GARCÍA-GONZÁLEZ, I. *et al.* Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. **Geoderma**, v. 322, p. 81–88, jul. 2018.

GENTSCH, N. *et al.* Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. **SOIL**, v. 10, n. 1, p. 139–150, 15 fev. 2024.

GENTSCH, N. *et al.* Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. **SOIL**, v. 10, n. 1, p. 139–150, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-10-139-2024>.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121–145, jun. 2005.

HARRE, N. T.; YOUNG, B. G. Early-season nutrient competition between weeds and soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 12, p. 1887–1906, 20 jul. 2020.

HARUNA, S. *et al.* Influence of no-till cover crops on the physical and hydraulic properties of a Paleudult. **International Agrophysics**, v. 37, n. 2, p. 189–199, 2023. DOI: <https://doi.org/10.31545/intagr/162799>.

HARUNA, S. I. *et al.* Improving soil physical properties through the use of cover crops: A review. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3(1). 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agg2.20105>.

HARUNA, S. I. *et al.* Soil Hydraulic Properties: Influence of Tillage and Cover Crops. **Pedosphere**, v. 28, n. 3, p. 430–442, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60387-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60387-4).

HARUNA, S. I. *et al.* Soil Thermal Properties Influenced by Perennial Biofuel and Cover Crop Management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 5, p. 1147–1156, set. 2017.

HARUNA, S.; NKONGOLO, Nsalambi. Tillage, Cover Crop and Crop Rotation Effects on Selected Soil Chemical Properties. **Sustainability**, v. 11, n. 10, p. 2770, 15 maio 2019.

HU, Q. *et al.* Legume cover crops sequester more soil organic carbon than non-legume cover crops by stimulating microbial transformations. **Geoderma**, v. 450, p. 117024, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117024>.

HU, Q. *et al.* Soil organic carbon fractions in response to soil, environmental and agronomic factors under cover cropping systems: A global meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 355, p. 108591, out. 2023.

HUBBARD, R. K. *et al.* Effects of cover crop systems on soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in the coastal plain of southeastern USA. **Soil and Tillage Research**, v. 126, p. 276–283, jan. 2013.

HUDEK, C. *et al.* Functional root trait-based classification of cover crops to improve soil physical properties. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 1, 30 jan. 2022.

HUOT, C. *et al.* Root depth development in tropical perennial forage grasses is related to root angle, root diameter and leaf area. **Plant and Soil**, v. 456, n. 1–2, p. 145–158, 10 nov. 2020.

JOSHI, N. *et al.* The soil-root nexus: how soil health shapes plant nutrient uptake and food nutritional security. **Plant and Soil**. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-026-08489-5>.

KARASAWA, T. Beneficial effects of cover crops on various soil functions and nutrient supply. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 70, n. 4, p. 237–245, 3 jul. 2024.

KARLEN, D. L. *et al.* Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4–10, 1997. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.

KARLEN, D. L. *et al.* Soil quality: Current concepts.

KAUR, S. *et al.* Understanding crop-weed-fertilizer-water interactions and their implications for weed management in agricultural systems. **Crop Protection**, v. 103, p. 65–72, jan. 2018.

KIDD, D. R. *et al.* Rhizosphere carboxylates and morphological root traits in pasture legumes and grasses. **Plant and Soil**, v. 402, n. 1–2, p. 77–89, 10 maio 2016.

KIM, N. *et al.* Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 142, p. 107701, mar. 2020.

KING, Al. E.; HOFMOCKEL, Kirsten S. Diversified cropping systems support greater microbial cycling and retention of carbon and nitrogen. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 240, p. 66–76, mar. 2017.

KOUDAHE, K. *et al.* Critical review of the impact of cover crops on soil properties. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 3, p. 343–354, set. 2022.

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875–5895, 13 maio 2015.

Lal, R., 2016. Soil health and carbon management. **Food Energy Secur.** 5, 212–222. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.96>.

LEE, J. H. *et al.* Direct root contact among neighboring plants influences activity of soil extracellular enzymes. **Applied Soil Ecology**, v. 215, p. 106422, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106422>.

LEHMAN, R. M. *et al.* When are you measuring soil β -glucosidase activities in cropping systems? **Agricultural & Environmental Letters**, 9(2). 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/acl2.70002>.

LEHMANN, J. *et al.* The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 10, p. 544–553, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>.

LI, Y. *et al.* Climate change and cover crop effects on water use efficiency of a corn-soybean rotation system. **Agricultural Water Management**, v. 255, p. 107042, set. 2021.

LIEBIG, M. A. *et al.* Short-Term Soil Responses to Late-Seeded Cover Crops in a Semi-Arid Environment. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2011–2019, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj15.0146>.

LIU, A. *et al.* Effects of Cover Crops on Soil Aggregate Stability, Total Organic Carbon, and Polysaccharides. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 6, p. 2041–2048, 2005. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0032>.

LUZ, F. B. *et al.* Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 281, p. 100–110, set. 2019.

MACLAREN, C. *et al.* Cover Crop Biomass Production Is More Important than Diversity for Weed Suppression. **Crop Science**, v. 59, n. 2, p. 733–748, mar. 2019.

MAUGHAN, M. W. *et al.* Soil Quality and Corn Yield under Crop–Livestock Integration in Illinois. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 6, p. 1503–1510, nov. 2009.

MCDANIEL, M. D. *et al.* Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. **Ecol. Appl.**, v. 24, p. 560–570, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1890/13-0616.1>.

MENDOZA *et al.* Competition and growth of a grass–legume mixture fertilised with nitrogen and phosphorus: effect on nutrient acquisition, root morphology and symbiosis with soil microorganisms. **Crop & Pasture Science**, v. 67, n. 6, p. 629–640, 28 jun. 2016.

MOSJIDIS, J. A.; WANG, M. Li. *Crotalaria*. In: **Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 63–69.

MUONI, T. *et al.* The Role of *Mucuna pruriens* in Smallholder Farming Systems of Eastern and Southern Africa: A Review. In *Agronomic Crops* (pp. 485–498). Springer Singapore. 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8_23.

NUNES, M. R. *et al.* A SMAF assessment of U.S. tillage and crop management strategies. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 8, p. 100072, dez. 2020.

NUNES, M. R. *et al.* The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 4, p. 1196–1213, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20244>.

- PAYE, W. S. *et al.* Cover crop water use and corn silage production in -semi-arid irrigated conditions. **Agricultural Water Management**, v. 260, p. 107275, fev. 2022.
- PEOPLES, M. B. *et al.* The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. **Symbiosis**, v. 48, n. 1–3, p. 1–17, fev. 2009.
- PEREIRA, M. B. N. *et al.* Ruzigrass as Cover Crop Enhances Enzymatic Activity Linked to Soybean Rooting in Deep Soil Layers. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02914-x>.
- PODZIKOWSKI, L. Y. *et al.* Plant diversity and grasses increase root biomass in a rainfall and grassland diversity manipulation. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 11, 27 nov. 2023.
- QIN, Z. *et al.* Assessing the impacts of cover crops on maize and soybean yield in the U.S. Midwestern agroecosystems. **Field Crops Research**, v. 273, p. 108264, nov. 2021.
- QUINTARELLI, V. *et al.* Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. **Agriculture**, v. 12, n. 12, p. 2076, 3 dez. 2022.
- RABOT, E. *et al.* Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122–137, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.
- RAIJ, B. **van et al.** Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2001.
- REEVES, D. W. Cover crops and rotations. In: **HATFIELD, J. L.**; **STEWART, B. A.** (Orgs.). *Crops Residue and Management*. 1. ed.: Boca Raton, 1994. p. 230.
- RICE, J. F. *et al.* Integrating Cover Crops into Soybean Systems in the Southern Great Plains: Impacts on Yield and Yield Components. **Agronomy**, v. 14, n. 7, p. 1356, 23 jun. 2024.
- RICKARD, W. *et al.* Change in Soil Macroporosity With Land Use and Its Effect on Soil Respiration. **Soil Use and Management**, v. 41, n. 3, 4 jul. 2025.
- RIVIÈRE, C. *et al.* The Effects of Cover Crops on Multiple Environmental Sustainability Indicators-A Review. **Agronomy**, v. 12, n. 9, p. 17, 25 ago. 2022.
- ROCHA, P. R. R. *et al.* Cover crops on soil quality and yield of cowpea under no-tillage in the Amazon savanna. *Acta Scientiarum*. **Agronomy**, v. 46, n. 1, p. e62853, 11 out. 2023.
- ROSCHER, C. Competitive superiority of non-native invaders becomes weaker when plant diversity increases – a case study with *Solidago* species. **NeoBiota**, v. 100, p. 239–256, 19 ago. 2025.
- RUAN *et al.* Residue Cover and Surface-Sealing Effects on Infiltration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 3, p. 853–861, maio 2001.

SAHA, A. K. *et al.* Impact of no-till, crop rotation, cover crop, and drainage on soil physical and hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 88, n. 2, p. 239–257, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20614>.

SANCHEZ, I. *et al.* Cover Crops Impacts on Louisiana Corn Production and Soil Properties. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 2, n. 1, p. 1–8, jan. 2019.

SANTOS, H. G. *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p.

SÃO MIGUEL, A. S. D. C. *et al.* Cover Crops in the Weed Management in Soybean Culture. **Planta Daninha**, v. 36, 3 set. 2018.

SCAVO, A. *et al.* The role of cover crops in improving soil fertility and plant nutritional status in temperate climates. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 5, p. 93, 2022.

SERAFIM, M. E. *et al.* Biopores, soil decompacting potential, and biomass of *Brachiaria* cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 49, 7 mar. 2025.

SHAH, A. N. *et al.* Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 11, p. 10056–10067, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>.

SHEN, Y. *et al.* Effect of tillage and crop residue on soil temperature following planting for a Black soil in Northeast China. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 4500, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22822-8>.

SILVEIRA, A. P. D. *et al.* Protocolos para a determinação da atividade de enzimas em solos: arilsulfatase, β -glicosidase, fosfatase ácida. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, Centro de Solos e Recursos Ambientais, 2022. 14 p. Versão abril de 2022.

SILWANA, S. *et al.* Short-Term Effects of Cover Crop Species and Termination Methods on Soil pH and Key Enzymatic Activities (β -Glucosidase, Phosphatase and Urease Activities) in a Citrus Orchard (Eureka Lemons). **Horticulturae**, v. 11, n. 9, p. 1014, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11091014>.

SMITH, R. G. *et al.* A new hypothesis for the functional role of diversity in mediating resource pools and weed–crop competition in agroecosystems. **Weed Research**, v. 50, n. 1, p. 37–48, 7 fev. 2010.

SODRÉ FILHO, J. *et al.* Intercropping sorghum and grasses during off-season in Brazilian Cerrado. **Scientia Agricola**, v. 79, n. 5, 2022.

SOUZA, R. F. *et al.* Effect of management systems and cover crops on organic matter dynamics of soil under vegetables. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 923–933, jun. 2014.

STEENWERTH, K.; BELINA, K. M. Cover crops enhance soil organic matter, carbon dynamics and microbiological function in a vineyard agroecosystem. **Applied Soil Ecology**, v. 40, n. 2, p. 359–369, out. 2008.

STIRZAKER, R. J. *et al.* Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, v. 185, n. 1, p. 151–162, mar. 1996.

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**, v. 74, n. 1, p. 107–119, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0029>.

STOTT, D. E.; MOEBIUS-CLUNE, B. N. Soil Health: Challenges and Opportunities. p. 109–121, 2017.

SUJATHA, S. *et al.* Biomass Accumulation, Soil Fertility and Energy Use in Seed Crop Systems of Velvet Bean (*Mucuna Pruriens* L.). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 21, p. 3263–3285, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2391463>.

SWANTON, C. J. *et al.* Experimental Methods for Crop–Weed Competition Studies. **Weed Science**, v. 63, n. SP1, p. 2–11, 20 fev. 2015.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: **WEAVER, R. W.**; **ANGLE, J. S.**; **BOTTOMLEY, P. S.** (ed.). *Methods of soil analysis: Part 2: Microbiological and biochemical properties*. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775-833. DOI: [10.2136/sssabookser5.2.c37](https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37).

TEIXEIRA, P. C. *et al.* Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília-DF: EMBRAPA, 2017.

TENNANT, D. A Test of a Modified Line Intersect Method of Estimating Root Length. **The Journal of Ecology**, v. 63, n. 3, p. 995, 1975. DOI: <https://doi.org/10.2307/2258617>.

TIEMANN, L. K. *et al.* Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecol. Lett.*, v. 18, p. 761–771, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12453>.

TUURE, J. *et al.* Plant residue mulch increases measured and modelled soil moisture content in the effective root zone of maize in semi-arid Kenya. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104945, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104945>.

TYLER, H. L. Winter cover crops and no till management enhance enzyme activities in soybean field soils. **Pedobiologia**, v. 81–82, p. 150666, set. 2020.

VILLAMIL, M. B. *et al.* No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 6, p. 1936–1944, 2006. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0350>.

WADE, J. *et al.* Prescribed pH for soil β -glucosidase and phosphomonoesterase do not reflect pH optima. **Geoderma**, v. 401, p. 115161, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115161>.

WEERASEKARA, C. S. *et al.* Effects of Cover Crops on Soil Quality: Selected Chemical and Biological Parameters. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 17, p. 2074–2082, 25 set. 2017.

WIENHOLD, B. J. *et al.* Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). *Renew. Agric. Food Syst.*, v. 24, p. 260–266, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1742170509990093>.

WORTMAN, S. E. Weedy fallow as an alternative strategy for reducing nitrogen loss from annual cropping systems. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 4, p. 61, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0397-3>.

WUEST, S. B.; ALBRECHT, Stephan L.; SKIRVIN, Katherine W. Crop residue position and interference with wheat seedling development. **Soil and Tillage Research**, v. 55, n. 3–4, p. 175–182, jun. 2000.

XIONG, P. *et al.* Root and root-derived biopore interactions in soils: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 185, n. 5, p. 643–655, 24 out. 2022.

XU, Q. *et al.* Priming and balance of soil organic carbon differ with additive C:N ratios and long-term green manuring. **Applied Soil Ecology**, v. 201, p. 105495, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105495>.

YAN, F.; ARTHUR, E. Cover crops alter soil physicochemical properties: A global meta-analysis. **Geoderma**, v. 460, p. 117436, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117436>.

YANG, Z. *et al.* Variation in root traits associated with nutrient foraging among temperate pasture legumes and grasses. **Grass and Forage Science**, v. 72, n. 1, p. 93–103, 30 mar. 2017.

ZELEKE, K. T. Fallow management increases soil water and nitrogen storage. **Agricultural Water Management**, v. 186, p. 12–20, maio 2017.

ZHANG, B. *et al.* Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. **Land Degradation & Development**, v. 35, n. 10, p. 3256–3273, 27 jun. 2024.

ZHANG, X. *et al.* Temperature sensitivity and spatial distribution of β -glucosidase activity in microbial hotspots: The impact of root hairs. **Rhizosphere**, v. 36, p. 101192, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101192>.

ZHANG, Y. *et al.* Kinetic parameters of soil β -glucosidase response to environmental temperature and moisture regimes. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1285–1291, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400022>.

ZHU, S. *et al.* Cover cropping promotes soil carbon sequestration by enhancing microaggregate-protected and mineral-associated carbon. **Science of The Total Environment**, v. 908, p. 168330, jan. 2024.