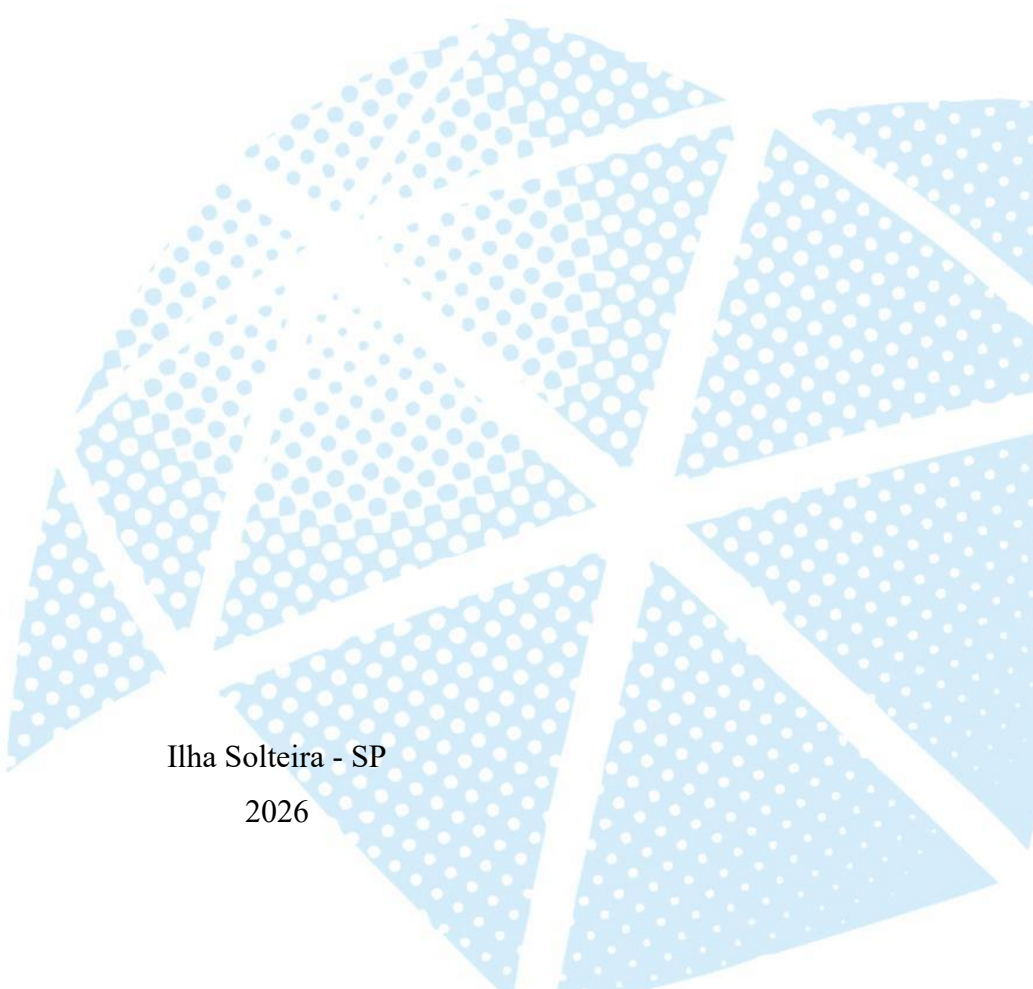


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ANA CLARA BRITTO ANACLETO

**SISTEMAS INTEGRADOS DE MANEJO DO SOLO E COBERTURAS VEGETAIS
SÃO CAPAZES DE AUMENTAR A SAÚDE DO SOLO?**

Ilha Solteira - SP
2026



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ANA CLARA BRITTO ANACLETO

**SISTEMAS INTEGRADOS DE MANEJO DO SOLO E COBERTURAS VEGETAIS
SÃO CAPAZES DE AUMENTAR A SAÚDE DO SOLO?**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
UNESP, como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenheira Agrônoma.

Orientadora: Profa. Dra. Thaís Soto Boni

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- A532s Anacleto, Ana Clara Britto.
Sistemas integrados de manejo do solo e coberturas vegetais são capazes de aumentar a saúde do solo? / Ana Clara Britto Anacleto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
45 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026
- Orientador: Thaís Soto Boni
- Inclui bibliografia
1. Manejo conservacionista. 2. Indicadores biológicos. 3. Qualidade do solo. 4. Latossolo vermelho. 5. Cerrado.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Sistemas integrados de manejo do solo e coberturas vegetais
são capazes de aumentar a saúde do solo?

ALUNO: Ana Clara Britto Anacleto

RA: 201054169

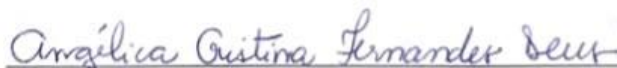
ORIENTADOR: Thaís Soto Boni

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora com Nota: 8,5

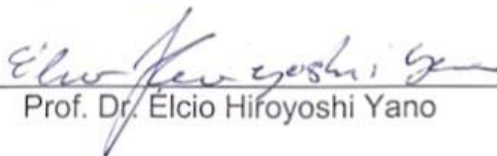
Comissão Examinadora:



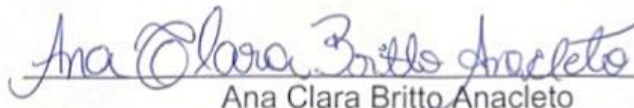
Profa. Dra. Thaís Soto Boni
Presidente (Orientador)



Profa. Dra. Angélica Cristina Fernandes Deus



Prof. Dr. Elcio Hiroyoshi Yano



Ana Clara Britto Anacleto

Ilha Solteira, 06 de julho de 2026.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, que conheceu os desejos mais profundos do meu coração antes mesmo que eles se tornassem palavras. Ao longo desta caminhada, foi em Sua presença que encontrei força para continuar, serenidade para esperar e coragem para seguir adiante. Hoje, ao contemplar esta conquista, reconheço que cada passo foi conduzido por Suas mãos e que nada aconteceu fora do tempo que Ele preparou para mim.

À Nossa Senhora, que esteve presente em cada oração silenciosa, em cada momento de espera e em cada instante em que a fé precisou ser maior que as incertezas. Seu amparo me ensinou que algumas conquistas florescem primeiro na esperança, para depois se tornarem realidade. Com gratidão, entrego este momento àquela que sempre me conduziu com amor e proteção.

Ao meu pai (*in memoriam*), cuja ausência jamais apagará o amor, os ensinamentos e a inspiração que permanecem vivos em minha vida. Esta conquista carrega um pouco de tudo aquilo que você me ensinou e da pessoa que me ajudou a ser.

À minha mãe, por ser meu porto seguro, minha maior incentivadora e o exemplo de força que me guiou até aqui. Seu amor, suas orações e sua confiança sustentaram meus sonhos nos dias mais difíceis e tornaram possível a realização deste momento.

A vocês, que foram luz nos meus caminhos e sustento nos meus dias, dedico não apenas este trabalho, mas também a gratidão por tudo o que me permitiu chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pelas oportunidades concedidas e pela força necessária para superar cada desafio ao longo desta trajetória.

À Nossa Senhora, pela proteção e intercessão constantes durante todos os anos da minha formação.

À minha mãe, por todo amor, apoio, incentivo e dedicação. Obrigada por acreditar em mim, mesmo nos momentos em que eu mesma duvidei.

Ao meu pai (in memoriam), cuja memória continua sendo fonte de inspiração e motivação para seguir em frente.

À minha família, pelo carinho, compreensão e apoio incondicional ao longo desta caminhada.

Aos meus amigos, que a vida e a universidade me permitiram encontrar, e aos meus afilhados, por serem fonte constante de carinho, alegria e inspiração. A presença de vocês transformou os desafios em momentos mais leves e tornou as conquistas ainda mais especiais. Obrigada pelo apoio, pela companhia, pelas palavras de incentivo e por fazerem parte desta caminhada de maneira tão significativa.

À Empresa Júnior Ramo da Terra, pelas experiências, aprendizados e oportunidades que contribuíram significativamente para minha formação pessoal e profissional.

À Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Ilha Solteira, por proporcionar uma formação acadêmica de excelência e por contribuir para meu desenvolvimento profissional e humano.

À minha orientadora, Profa. Dra. Thaís Soto Boni, pela confiança, orientação, apoio e pelos ensinamentos compartilhados ao longo da realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Pedologia e Recuperação Ambiental (LAPRA), pelo acolhimento, pela estrutura disponibilizada e pelo ambiente de aprendizado que foi fundamental ao longo do desenvolvimento desta pesquisa; ao Laboratório de Física do Solo, ao Laboratório de Microbiologia e ao Laboratório de Controle Biológico (CONBIO), pelo apoio nas análises e atividades experimentais; e ao Prof. Élcio, pela disponibilidade da área experimental.

À Fundação AGRISUS, pela concessão da bolsa e pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste estudo.

A todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para minha formação acadêmica, profissional e pessoal, meu sincero agradecimento.

"O solo tem o seu próprio modo de viver, de crescer e de se regenerar. Se o ouvirmos, ele nos ensinará tudo o que precisamos saber."

— Ana Maria Primavesi

RESUMO

A saúde do solo resulta da interação entre atributos físicos, químicos e biológicos, sendo sua avaliação importante para compreender os efeitos de sistemas conservacionistas de manejo em ambientes tropicais. O objetivo deste trabalho foi avaliar alterações em indicadores de saúde do solo após 12 anos de condução de diferentes sistemas de manejo e coberturas vegetais em área experimental de longa duração. O estudo foi realizado em um Latossolo Vermelho Distrófico típico, de textura argilosa, localizado no município de Selvíria, Mato Grosso do Sul. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 6×2 , com seis sistemas de manejo do solo e duas coberturas vegetais compostas por *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Urochloa brizantha* cv. Ipyporã, com quatro repetições. Os sistemas avaliados incluíram preparo reduzido, cultivo mínimo, plantio direto com sulcador de disco, plantio direto com sulcador de haste e sistemas alternados entre plantio direto e cultivo mínimo. Foram avaliados atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Os atributos químicos apresentaram comportamento semelhante entre os tratamentos, sendo observado efeito significativo dos manejos apenas para o zinco e efeito da cobertura vegetal para o boro. Os atributos físicos não foram influenciados pelos sistemas de manejo ou pelas coberturas vegetais; entretanto, resistência à penetração, microporosidade, porosidade total e densidade do solo variaram em função da profundidade. O carbono da biomassa microbiana, a respiração basal e as atividades das enzimas β -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. A macrofauna total manteve-se estável, enquanto Coleoptera apresentou efeito de manejo e interação entre manejo e cobertura vegetal, com maior resposta no sistema SPD/CM sob Marandu. Assim, os efeitos dos manejos e das coberturas vegetais sobre a saúde do solo foram restritos a poucos indicadores, principalmente zinco, boro, variações físicas em profundidade e densidade de Coleoptera.

Palavras-chave: manejo conservacionista; indicadores biológicos; saúde do solo; Latossolo Vermelho; Cerrado.

ABSTRACT

Soil health results from the interaction between physical, chemical, and biological attributes, and its assessment is important for understanding the effects of conservation management systems in tropical environments. The objective of this study was to evaluate changes in soil health indicators after 12 years of implementing different management systems and vegetation covers in a long-term experimental plot. The study was conducted on a typical dystrophic red Latosol with a clay texture, located in the municipality of Selvíria, Mato Grosso do Sul. The experiment was conducted using a randomized block design in a 6×2 factorial layout, with six soil management systems and two vegetation covers consisting of *Urochloa brizantha* cv. Marandu and *Urochloa brizantha* cv. Ipyporã, with four replicates. The management systems evaluated included reduced tillage, minimum tillage, no-till with a disc furrower, no-till with a tine furrower, and alternating systems between no-till and minimum tillage. Chemical, physical, and biological soil properties were evaluated. Chemical attributes showed similar behavior across treatments, with a significant effect of management practices observed only for zinc and an effect of plant cover observed for boron. Physical attributes were not influenced by management systems or plant covers; however, penetration resistance, microporosity, total porosity, and soil density varied with depth. Microbial biomass carbon, basal respiration, and the activities of the enzymes β -glycosidase, acid phosphatase, and arylsulfatase showed no significant differences among the treatments. Total macrofauna remained stable, while Coleoptera showed a management effect and an interaction between management and vegetation cover, with the greatest response observed in the SPD/CM system under Marandu. Thus, the effects of management practices and vegetation covers on soil health were limited to a few indicators

Keywords: conservation management; biological indicators; soil health; Oxisol; Cerrado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	11
	2.1 MANEJO DO SOLO E SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS	
	AGRÍCOLAS.....	11
	2.2 SISTEMA PLANTIO DIRETO COMO REFERÊNCIA CONSERVACIONISTA	
		11
	2.3 CULTIVO SIMULTÂNEO EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS	12
	2.4 SAÚDE DO SOLO SOB ABORDAGEM INTEGRADA	13
	2.5 INDICADORES BIOLÓGICOS DA SAÚDE DO SOLO.....	14
	2.6 COLONIZAÇÃO RADICULAR FÚNGICA	16
	2.7 FAUNA EDÁFICA E FUNCIONALIDADE ECOLÓGICA	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	18
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
	4.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	24
	4.2 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO	27
	4.3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.....	32
	4.4 MACROFAUNA EDÁFICA.....	34
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS.....	38
	APÊNDICE A – REGISTRO FOTOGRÁFICO DAS ETAPAS DO	
	EXPERIMENTO	41

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade dos sistemas agrícolas em ambientes tropicais depende da manutenção da saúde do solo, pois esse compartimento concentra processos essenciais à ciclagem de nutrientes, à dinâmica da água, à formação e estabilidade de agregados e à sustentação da atividade biológica. Quando submetido a manejo inadequado, o solo tende a sofrer degradação física, química e biológica, com consequências diretas sobre sua capacidade de desempenhar funções ecológicas e produtivas. Nesse contexto, Hoek *et al.* (2021) reforçam a necessidade de integrar produção agrícola e conservação ambiental, enquanto a conservação do solo ultrapassa a preocupação com a fertilidade imediata e passa a ser compreendida como condição indispensável para a estabilidade dos agroecossistemas.

Em regiões tropicais, essa discussão assume maior relevância em razão das características intrínsecas dos solos altamente intemperizados, como elevada suscetibilidade à degradação física, rápida decomposição da matéria orgânica e baixa reserva natural de nutrientes. Stefanoski *et al.* (2016) destacam que o uso e o manejo do solo interferem diretamente na qualidade edáfica, sobretudo por modificarem atributos físicos, químicos e biológicos. Nessas condições, práticas baseadas em revolvimento frequente, baixa cobertura superficial e redução da diversidade vegetal tendem a acelerar a perda de saúde do solo. Em contrapartida, sistemas conservacionistas de manejo, especialmente aqueles baseados na manutenção de cobertura permanente, no mínimo revolvimento e na diversificação de espécies, favorecem a recuperação gradual da funcionalidade edáfica.

Entre esses sistemas, o Sistema Plantio Direto se destaca por reduzir a exposição do solo a agentes erosivos, preservar a estrutura e estimular a atividade biológica. Segundo a FEBRAPDP (2025), o SPD deve ser compreendido pela integração entre mínimo revolvimento, cobertura permanente e diversificação de culturas. Teng *et al.* (2024) também destacam que os efeitos positivos de práticas conservacionistas tendem a se consolidar ao longo do tempo. De forma complementar, o uso de plantas de cobertura amplia a heterogeneidade dos resíduos, intensifica a ciclagem de nutrientes e fortalece as interações solo-biota, aspectos importantes para a construção de sistemas agrícolas mais estáveis (Pacheco *et al.*, 2017).

A avaliação da saúde do solo deve contemplar diferentes dimensões de sua funcionalidade, integrando atributos físicos, químicos, microbiológicos, bioquímicos e biológicos. Indicadores como densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, teores de nutrientes, carbono da biomassa microbiana, respiração basal, atividade enzimática, colonização radicular fúngica e macrofauna edáfica permitem uma interpretação mais abrangente das respostas do solo ao manejo. Karlen *et al.* (2001) já destacavam que a qualidade

do solo deve ser avaliada de forma integrada, enquanto Delgado-Baquerizo *et al.* (2017) reforçam a importância da microbiota para a manutenção da multifuncionalidade dos ecossistemas.

Além disso, a saúde do solo não pode ser entendida isoladamente, pois está diretamente associada à interação entre os componentes físicos, químicos e biológicos do sistema. Solos com maior estabilidade estrutural e maior atividade biológica tendem a apresentar melhores condições para infiltração de água, exploração radicular e retenção de nutrientes. Vezzani (2015) trata o solo como componente essencial na provisão de serviços ecossistêmicos, expressando não apenas sua condição atual, mas também sua capacidade de responder a perturbações e manter a funcionalidade ao longo do tempo.

Nesse sentido, estudos de longa duração são fundamentais para compreender os efeitos reais do manejo sobre o solo, uma vez que muitas alterações ocorrem de forma lenta e cumulativa. Em sistemas tropicais, nos quais a dinâmica da matéria orgânica e da estrutura do solo é particularmente sensível, avaliações de curto prazo podem não ser suficientes para evidenciar diferenças consistentes entre tratamentos. Philippot *et al.* (2024) ressaltam que a interação entre comunidades microbianas e propriedades do solo é central para compreender a resposta do sistema, reforçando a necessidade de monitoramentos em horizonte temporal compatível com a dinâmica edáfica.

Diante disso, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a saúde do solo em uma área submetida, ao longo de 12 anos, a diferentes sistemas de manejo do solo e ao cultivo simultâneo de sorgo com plantas de cobertura, por meio da análise integrada de atributos físicos, químicos, microbiológicos e biológicos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MANEJO DO SOLO E SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

A relação entre o manejo do solo e a sustentabilidade agrícola tem sido amplamente discutida, sobretudo em contextos em que a intensificação produtiva ocorre sobre bases ecológicas frágeis. Em ambientes tropicais, essa problemática se intensifica devido à elevada taxa de decomposição da matéria orgânica, à maior suscetibilidade estrutural de determinados solos e à baixa diversificação dos sistemas agrícolas. Nesse sentido, Stefanoski *et al.* (2016) destacam que o uso e o manejo do solo influenciam diretamente sua qualidade física, ao modificarem atributos relacionados à estrutura, porosidade, densidade e resistência à penetração. Pinto *et al.* (2022), ao avaliarem sistemas no Cerrado, também evidenciam que práticas conservacionistas podem favorecer indicadores de qualidade do solo. Diante desse cenário, a sustentabilidade não deve ser compreendida apenas como manutenção do rendimento das culturas, mas como capacidade de preservar os processos edáficos que sustentam a produção ao longo do tempo.

Nesse contexto, destaca-se a contribuição de Ana Maria Primavesi para uma visão ecológica do manejo do solo. Para Primavesi (2016), a fertilidade depende da interação entre estrutura, matéria orgânica, aeração, água e atividade biológica, e não apenas da composição química do solo. Dessa forma, o solo passa a ser compreendido como um sistema dinâmico, cuja funcionalidade depende da preservação de sua vida interna e do equilíbrio entre seus componentes físicos, químicos e biológicos.

Essa perspectiva, além de ampliar a compreensão da fertilidade, reforça a necessidade de práticas que minimizem perturbações mecânicas excessivas, preservem a cobertura do solo e favoreçam a atividade biológica. Essa lógica também se aproxima de Vezzani (2015), ao tratar o solo como componente essencial para a provisão de serviços ecossistêmicos. Em termos práticos, isso significa reconhecer que o manejo não atua apenas sobre a superfície cultivada, mas também sobre a dinâmica ecológica que regula a produção vegetal. Consequentemente, a sustentabilidade dos sistemas agrícolas depende, em grande medida, da capacidade de manter o solo biologicamente ativo, estruturalmente estável e funcional ao longo do tempo.

2.2 SISTEMA PLANTIO DIRETO COMO REFERÊNCIA CONSERVACIONISTA

O Sistema Plantio Direto (SPD) configura-se como uma das principais estratégias de manejo conservacionista no Brasil, por associar produção agrícola à conservação do solo. Segundo a FEBRAPDP (2025), em 2024 o Brasil atingiu aproximadamente 41 milhões de hectares utilizando ao menos o princípio elementar do plantio sobre a palhada para a produção

de grãos. No entanto, o SPD deve ser compreendido como um sistema baseado na integração entre mínimo revolvimento do solo, cobertura permanente e rotação ou diversificação de culturas. Assim, sua importância não está apenas na redução do preparo convencional, mas na adoção conjunta desses princípios, uma vez que o não revolvimento isolado, sem cobertura adequada e diversidade vegetal, não caracteriza plenamente o sistema.

A manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo exerce papel fundamental no SPD, pois protege o solo contra o impacto das gotas de chuva, reduz oscilações térmicas, conserva a umidade e favorece a infiltração de água. Além disso, a palhada atua como fonte de energia para a macrofauna edáfica e a microbiota decompositora, contribuindo para a ciclagem de nutrientes e para a atividade enzimática do solo (Tabatabai, 1994). A intensidade desses efeitos depende da qualidade dos resíduos vegetais; materiais com maior relação C/N, como gramíneas tropicais, apresentam decomposição mais lenta e maior persistência sobre o solo, enquanto resíduos de menor relação C/N liberam nutrientes mais rapidamente (Silva *et al.*, 2023).

A estabilidade funcional do SPD depende da adoção contínua de seus princípios, uma vez que as melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo tendem a ocorrer de forma gradual. Nesse sentido, Teng *et al.* (2024) destacam que os efeitos positivos do plantio direto se consolidam ao longo do tempo, especialmente em experimentos de longa duração, reforçando a necessidade de interpretar seus resultados em horizonte temporal compatível com a dinâmica do solo.

2.3 CULTIVO SIMULTÂNEO EM SISTEMAS CONSERVACIONISTAS

O cultivo simultâneo de culturas e plantas de cobertura constitui uma estratégia importante em sistemas conservacionistas, por ampliar a diversidade vegetal no ambiente agrícola e favorecer a manutenção da cobertura do solo. Em condições de Cerrado, Sodré Filho *et al.* (2022) destacam que o sorgo pode ser cultivado em consórcio com espécies de *Urochloa* durante a entressafra, contribuindo para a produção de biomassa e para a continuidade da cobertura vegetal no Sistema Plantio Direto.

A associação de espécies com diferentes arquiteturas radiculares, exigências nutricionais e padrões de produção de resíduos favorece a exploração do perfil do solo, a ciclagem de nutrientes e a formação de palhada. Nesse sentido, Nakao *et al.* (2018) observaram que o consórcio entre sorgo e *Urochloa brizantha* apresenta potencial para a produção de matéria seca, reforçando a importância dessas combinações em sistemas voltados à conservação do solo.

No contexto dos sistemas conservacionistas, as plantas de cobertura exercem papel essencial na proteção da superfície, na conservação da umidade e na redução dos riscos de erosão. Ferraz-Almeida *et al.* (2022), ao avaliarem sistemas de sorgo consorciado com gramíneas, destacam que essas associações podem contribuir para o aporte de matéria seca, acúmulo de carbono e alterações na porosidade do solo, reforçando o potencial do cultivo simultâneo para a manutenção da qualidade edáfica.

2.4 SAÚDE DO SOLO SOB ABORDAGEM INTEGRADA

A saúde do solo é um conceito central na ciência do solo, por representar a capacidade desse recurso de desempenhar funções essenciais à produção agrícola, à regulação ambiental e à manutenção dos processos ecológicos. Karlen *et al.* (2001) definem esse conceito a partir da capacidade do solo de funcionar dentro dos limites do ecossistema, sustentando produtividade, qualidade ambiental e saúde de plantas e animais. Assim, a saúde do solo expressa não apenas seu estado atual, mas também sua capacidade de responder às pressões do manejo e sustentar, ao longo do tempo, processos relacionados à produtividade e à estabilidade dos agroecossistemas.

A adoção de uma abordagem integrada se justifica pelo fato de que as alterações provocadas pelo manejo agrícola raramente ocorrem de forma independente em um único compartimento do solo. Práticas que modificam a estrutura física, por exemplo, podem afetar a infiltração de água, a aeração e o desenvolvimento radicular, ao mesmo tempo em que influenciam a atividade microbiana e a dinâmica de nutrientes. Da mesma forma, mudanças químicas relacionadas à fertilidade e ao teor de matéria orgânica repercutem sobre a atividade biológica e sobre a estabilidade dos agregados. Assim, Karlen *et al.* (2001) e Stefanoski *et al.* (2016) reforçam que a avaliação integrada permite compreender melhor os efeitos acumulativos e interativos dos sistemas de manejo.

Os atributos físicos do solo são fundamentais para a compreensão de sua funcionalidade, uma vez que estão diretamente relacionados à estrutura, à porosidade, à densidade, à infiltração de água e à resistência à penetração. Stefanoski *et al.* (2016) destacam que esses atributos respondem ao uso e manejo do solo, influenciando o crescimento radicular e a movimentação de água e ar. Já os atributos químicos refletem a capacidade do solo de suprir nutrientes e manter condições adequadas ao desenvolvimento vegetal, enquanto os atributos biológicos revelam a intensidade da atividade dos organismos do solo e dos processos de decomposição e ciclagem de nutrientes.

Dentro dessa perspectiva, a matéria orgânica assume papel integrador, por atuar simultaneamente sobre os componentes físicos, químicos e biológicos do solo. Ela contribui para a agregação, aumenta a capacidade de retenção de água, fornece nutrientes e serve de substrato para a microbiota edáfica. Por isso, sua presença é frequentemente associada à melhoria da saúde do solo em sistemas conservacionistas, especialmente quando há aporte contínuo de resíduos vegetais e redução do revolvimento. Além disso, indicadores biológicos como carbono da biomassa microbiana, atividade enzimática e respiração do solo têm sido amplamente utilizados por apresentarem elevada sensibilidade às mudanças de manejo e por refletirem rapidamente a resposta do sistema às práticas adotadas (Mercante *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2023; Tabatabai, 1994).

Dessa forma, a avaliação integrada da saúde do solo permite superar limitações de análises fragmentadas e oferecer uma visão mais realista da condição do sistema. Essa perspectiva é reforçada por Vasu, Tiwary e Chandran (2024), que destacam a importância de integrar atributos morfológicos, físicos, químicos e biológicos para uma avaliação mais completa da qualidade do solo. Assim, em vez de considerar apenas a fertilidade química ou apenas a estrutura física, reconhece-se que a saúde do solo resulta do equilíbrio entre seus diferentes componentes e da forma como eles interagem sob determinado manejo. Em estudos de longa duração, essa integração torna-se ainda mais importante, pois muitos efeitos do manejo se manifestam de maneira gradual e cumulativa, exigindo indicadores capazes de captar mudanças sutis na funcionalidade do solo.

2.5 INDICADORES BIOLÓGICOS DA SAÚDE DO SOLO

Dentre os diferentes grupos de indicadores de saúde do solo, os indicadores biológicos e bioquímicos vêm ganhando importância devido à sua alta sensibilidade às mudanças decorrentes do manejo. Essa sensibilidade resulta da resposta rápida da biota do solo a alterações como intensidade da perturbação, cobertura da superfície, umidade e temperatura. Philippot *et al.* (2024) destacam que a interação entre comunidades microbianas e propriedades do solo é determinante para o funcionamento edáfico. Assim, esses indicadores permitem avaliar dimensões funcionais do sistema que nem sempre se manifestam nas análises físicas ou químicas comuns. A respiração basal do solo corresponde ao fluxo de CO₂ liberado pela atividade microbiana durante a decomposição da matéria orgânica e indica a intensidade dos processos metabólicos no solo.

Por refletir o uso de substratos orgânicos pela microbiota, esse atributo responde rapidamente às mudanças no manejo, na disponibilidade de resíduos e nas condições ambientais que afetam a atividade biológica (Mercante *et al.*, 2008).

O carbono da biomassa microbiana representa a fração viva da matéria orgânica do solo e um dos componentes mais dinâmicos do sistema. Essa fração participa da decomposição de resíduos vegetais, da imobilização e mineralização de nutrientes e da formação de compostos mais estáveis no solo. Mercante *et al.* (2008) destacam sua utilidade como indicador da resposta biológica do solo às práticas de manejo, especialmente em sistemas com entrada contínua de resíduos e cobertura superficial permanente.

A análise conjunta desses dois atributos é útil porque permite distinguir solos com maior atividade metabólica daqueles em que a biomassa microbiana é mais estável ou limitada pela menor disponibilidade de carbono. Em sistemas de conservação como o SPD, as variações na respiração basal e no carbono da biomassa microbiana ajudam a identificar mudanças no funcionamento biológico do solo associadas à cobertura vegetal, à rotação de culturas e ao acúmulo de matéria orgânica.

A atividade enzimática do solo é um dos indicadores mais sensíveis da qualidade biológica e funcional do sistema, pois reflete processos diretamente relacionados à decomposição da matéria orgânica e à ciclagem de nutrientes. Tabatabai (1994) descreve a importância das enzimas do solo na mediação de reações bioquímicas, enquanto Balota *et al.* (2014) demonstram sua sensibilidade em sistemas conservacionistas de longa duração. Dentre as enzimas mais utilizadas em estudos dessa natureza, destacam-se a β -glicosidase, a fosfatase ácida e a arilsulfatase, associadas aos ciclos do carbono, do fósforo e do enxofre. A β -glicosidase participa da degradação de compostos de carbono, atuando principalmente na etapa final da hidrólise da celulose, com liberação de glicose para o metabolismo microbiano. Essa enzima é frequentemente utilizada como bioindicador de restauração ou degradação do solo, pois responde a sistemas de conservação e à entrada contínua de resíduos vegetais (Bandick; Dick, 1999; Stott *et al.*, 2010).

A fosfatase ácida está relacionada com a mineralização do fósforo orgânico, promovendo a liberação de fosfato inorgânico disponível para as plantas, o que lhe confere particular importância em solos tropicais onde a disponibilidade de fósforo é normalmente limitada.

A arilsulfatase está envolvida na mineralização de compostos orgânicos de enxofre, contribuindo para a liberação desse nutriente no sistema solo-planta. A avaliação conjunta da β -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase permite interpretar a atividade bioquímica do solo de forma mais abrangente, integrando processos associados aos ciclos do carbono, fósforo e enxofre e ampliando a compreensão dos efeitos do manejo na saúde do solo (BALOTA *et al.*, 2014; TABATABAI, 1994).

2.6 COLONIZAÇÃO RADICULAR FÚNGICA

A colonização radicular por fungos micorrízicos arbusculares (FMA) é considerada um importante indicador da saúde do solo, por refletir a capacidade do ambiente edáfico em sustentar interações biológicas essenciais ao funcionamento dos ecossistemas terrestres. Esses fungos estabelecem associações mutualísticas com a maioria das espécies vegetais e desempenham papel relevante em processos relacionados à aquisição de nutrientes, dinâmica do carbono, agregação do solo e manutenção da atividade biológica, contribuindo diretamente para a funcionalidade e a resiliência dos sistemas agrícolas (Kuyper; Jansa, 2023).

A resposta desse indicador está diretamente associada às condições físicas, químicas e biológicas do solo, sendo sensível às alterações promovidas pelo manejo. Práticas conservacionistas que favorecem o acúmulo de matéria orgânica, a cobertura permanente do solo e a redução do revolvimento tendem a preservar a estrutura micelial dos fungos micorrízicos e estimular a atividade dos FMA. Por outro lado, sistemas submetidos a perturbações intensas podem comprometer o estabelecimento da simbiose e reduzir a eficiência dos processos ecológicos mediados por esses organismos (Kuyper; Jansa, 2023).

Estudos recentes destacam que os FMA exercem papel central na saúde do solo, influenciando simultaneamente processos relacionados à disponibilidade de nutrientes, estabilidade estrutural, armazenamento de carbono e diversidade microbiana. Dessa forma, a colonização pode ser interpretada como um bioindicador da integridade ecológica do solo, fornecendo informações sobre sua capacidade de manter funções essenciais à sustentabilidade dos agroecossistemas (ZHANG *et al.*, 2024).

2.7 FAUNA EDÁFICA E FUNCIONALIDADE ECOLÓGICA

A fauna edáfica constitui um dos principais componentes biológicos associados à saúde do solo, participando ativamente da manutenção de processos ecológicos responsáveis pela funcionalidade dos agroecossistemas. A composição, diversidade e abundância desses organismos respondem de forma sensível às alterações promovidas pelo manejo, refletindo mudanças relacionadas à disponibilidade de matéria orgânica, cobertura vegetal, umidade, estrutura do solo e intensidade de perturbação antrópica. Da Silva *et al.* (2013) ressaltam o uso da fauna edáfica como bioindicadora da qualidade ambiental e da sustentabilidade dos sistemas de produção.

Entre os organismos edáficos, a macrofauna exerce papel particularmente relevante devido à sua capacidade de modificar diretamente o ambiente físico do solo. Minhocas,

formigas, cupins e outros invertebrados promovem a fragmentação e incorporação de resíduos vegetais, a formação de bioporos e a redistribuição de partículas, influenciando atributos relacionados à porosidade, infiltração de água, aeração e desenvolvimento radicular. Essas modificações contribuem para a melhoria das condições edáficas e favorecem a manutenção de processos fundamentais à estabilidade e ao funcionamento dos sistemas agrícolas.

Além dos efeitos estruturais, a macrofauna participa ativamente da decomposição da matéria orgânica, da ciclagem de nutrientes e da regulação das comunidades microbianas, estabelecendo interações que influenciam diretamente a dinâmica do carbono e o fluxo de energia no solo. Estudos recentes destacam que a biodiversidade edáfica desempenha papel central na provisão de serviços ecossistêmicos, contribuindo para a manutenção da fertilidade, da estabilidade estrutural, da retenção hídrica e da resiliência dos agroecossistemas frente às perturbações ambientais (Angst *et al.*, 2024).

A intensificação do uso da terra e a baixa diversificação dos sistemas produtivos têm sido apontadas como importantes fatores de redução da abundância e da diversidade da fauna do solo, comprometendo processos ecológicos essenciais à funcionalidade edáfica. Chiappero *et al.* (2024) demonstram que alterações no uso e manejo do solo reduzem a biodiversidade subterrânea e afetam a capacidade do sistema de sustentar serviços ecossistêmicos e manter sua integridade ecológica.

Nesse contexto, a avaliação da fauna edáfica permite compreender não apenas o estado de conservação do ambiente, mas também sua capacidade de sustentar funções biológicas fundamentais ao equilíbrio e à saúde do solo. Quando analisada de forma integrada aos indicadores microbiológicos, bioquímicos e físicos, essa variável contribui para uma abordagem mais abrangente da funcionalidade ecológica e da sustentabilidade dos sistemas de manejo.

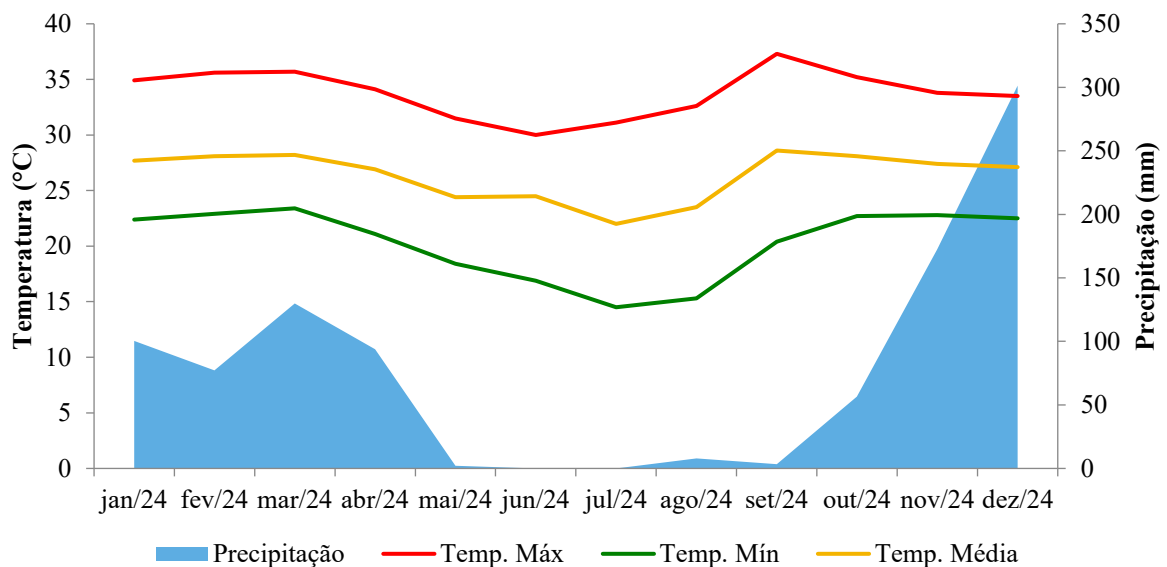
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área Experimental

O estudo foi conduzido durante a safra 2024/25 na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de Ilha Solteira, localizada no município de Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil, nas coordenadas aproximadas de 20°22' S e 51°22' W, com altitude média de 335 m. O clima da região é classificado como Aw segundo Köppen, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos, com precipitação média anual em torno de 1.300 mm e temperatura média anual próxima de 24,5 °C.

A Figura 1 apresenta as temperaturas máximas, mínimas e médias mensais e a precipitação observadas na área experimental durante o período de avaliação.

Figura 1 – Temperaturas máximas, mínimas e médias mensais (°C) e precipitação (mm) registradas na área experimental durante o período de avaliação, em 2024.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados meteorológicos disponibilizados pelo Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira (UNESP, 2026).

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, de textura argilosa com teores de 431 g kg⁻¹ de argila na camada de 0,00-0,10 m e 455 g kg⁻¹ na camada de 0,10-0,20 m (Tabela 1). Trata-se de solo altamente intemperizado, com predominância de minerais de baixa atividade, elevada estabilidade estrutural e forte dependência da matéria orgânica para a manutenção da fertilidade e da qualidade física e biológica. O estudo foi realizado em uma área experimental, implantada em 2012, com histórico de 12 anos sob sistemas conservacionistas de manejo do solo.

Tabela 1 – Caracterização granulométrica do solo da área experimental.

Profundidades (m)	Argila -----	Areia g kg ⁻¹ -----	Silte -----	Classe textural
0,00 – 0,10	431	517	52	Argiloso
0,10 – 0,20	455	497	48	Argiloso

Nos dois últimos anos, a área experimental foi conduzida com soja (*Glycine max* L., cultivar HO TERERÊ IPRO) no período de verão. No inverno, adotou-se o cultivo simultâneo de sorgo (*Sorghum bicolor* L., cultivar Pioneer 50A40) com plantas de cobertura, composto por *Urochloa brizantha* cv. Marandu, *Urochloa brizantha* cv. Ipyporã e *Fagopyrum esculentum*, com o objetivo de produzir biomassa e manter a cobertura do solo.

Como parte do manejo corretivo da área, em abril, foram realizadas calagem, na dose de 2,7 t ha⁻¹, e gessagem, na dose de 750 kg ha⁻¹, visando à correção da acidez e à melhoria das condições químicas do solo. As sementes foram tratadas conforme o padrão comercial, com inseticidas e fungicidas, seguindo as recomendações dos fabricantes.

3.2 Delineamento Experimental e Tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 6 × 2, com seis sistemas de manejo do solo e duas coberturas vegetais, com quatro repetições.

As coberturas vegetais avaliadas foram compostas por duas cultivares de *Urochloa brizantha* associadas ao trigo mourisco, sendo *Urochloa brizantha* cv. Marandu + *Fagopyrum esculentum* e *Urochloa brizantha* cv. Ipyporã + *Fagopyrum esculentum*.

Os sistemas de manejo avaliados foram: (1) preparo reduzido (PR), no qual foram realizadas duas operações mecanizadas, sendo grade média seguida de escarificação a 0,36 m de profundidade, promovendo maior mobilização do solo, tanto na camada superficial quanto em profundidade; (2) cultivo mínimo (CM), em que também houve escarificação a 0,36 m de profundidade, porém realizada em uma única operação, com menor revolvimento total do solo em comparação ao PR; (3) cultivo mínimo/plantio direto (CM/SPD), que representa a alternância entre cultivo mínimo e plantio direto nas diferentes safras, combinando períodos de mobilização controlada com períodos de maior conservação do solo; (4) plantio direto/cultivo mínimo (SPD/CM), que também representa a alternância entre plantio direto e cultivo mínimo, porém em ordem inversa ao CM/SPD; (5) sistema plantio direto com haste (SPD-H), no qual a mobilização ficou restrita à linha de semeadura, com maior mobilização localizada promovida pela haste; e (6) sistema plantio direto com disco (SPD-D), também com mobilização restrita à

linha de semeadura, porém com menor revolvimento do solo, preservando mais a palhada e a estrutura superficial.

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2024, após a colheita do sorgo e antes da semeadura da soja, nas respectivas parcelas experimentais, visando avaliar os efeitos acumulados dos sistemas de manejo e das coberturas vegetais sobre os indicadores de saúde do solo.

3.3 Amostragem do Solo

Para as análises químicas, microbiológicas e enzimáticas, foram coletadas amostras deformadas de solo em cinco pontos por parcela, distribuídos sistematicamente na área útil e homogeneizados para compor uma amostra representativa de cada unidade experimental, na profundidade de 0,00–0,10 m, com auxílio de trado holandês. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos identificados, sendo posteriormente secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm.

Para os atributos físicos, foram coletadas amostras indeformadas com anéis de Kopecky nas profundidades de 0,00–0,05, 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m, com três repetições por profundidade em cada parcela.

3.4 Análise Granulométrica

A composição granulométrica do solo foi determinada pelo método da pipeta, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017), com dispersão química em solução de NaOH 1 mol L⁻¹ e agitação mecânica a alta rotação por 15 minutos. A fração silte foi obtida pelo método gravimétrico indireto, calculada pela diferença entre o total de solo e as frações de argila e areia determinadas. Os resultados foram expressos em g kg⁻¹.

3.5 Atributos Químicos do Solo

As análises químicas foram realizadas conforme metodologia descrita por Raij *et al.* (2001). O pH foi determinado em suspensão solo: solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ na proporção 1:2,5 (v/v). O fósforo disponível foi extraído pela resina trocadora de íons e determinado por colorimetria. O potássio foi extraído com resina e determinado por fotometria de chama. O cálcio e o magnésio trocáveis foram extraídos com resina e determinados por espectrometria de absorção atômica. A acidez potencial (H⁺+Al) foi extraída com solução tamponada de acetato de cálcio pH 7,0 e determinada por titulometria. O alumínio trocável foi extraído com KCl 1 mol L⁻¹ e titulado com NaOH 0,025 mol L⁻¹. O enxofre disponível foi extraído com fosfato de cálcio monobásico e determinado por turbidimetria. A soma de bases (SB), a capacidade de

troca catiônica (CTC) e a saturação por bases (V%) foram calculadas matematicamente a partir dos valores obtidos. A matéria orgânica foi determinada pelo método colorimétrico (método de Walkley-Black modificado) com leitura em espectrofotômetro a 650 nm.

3.6 Carbono da Biomassa Microbiana

O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado pelo método de fumigação-extração proposto por Vance *et al.* (1987). As amostras de solo foram submetidas à fumigação com clorofórmio isento de etanol por 24 horas e, em seguida, extraídas com solução de K_2SO_4 0,5 mol L⁻¹. O carbono presente nos extratos foi quantificado por oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, com titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal. O CBM foi estimado pela diferença entre o carbono extraído das amostras fumigadas e não fumigadas, utilizando-se o fator de correção $k_{EC} = 0,33$.

3.7 Respiração Basal do Solo

A respiração basal do solo (RBS) foi determinada pelo método da captura alcalina de CO₂, de acordo com Mercante *et al.* (2008). Amostras de 50 g de solo com umidade ajustada a 60% da capacidade de campo foram acondicionadas em frascos herméticos de 1 L contendo um frasco interno com 10 ml de solução de NaOH 1 mol L⁻¹ para captura do CO₂ liberado pela microbiota. Um frasco adicional sem solo foi incubado como branco analítico. Os frascos foram mantidos em incubação a 28 °C por 7 dias no escuro. Ao final do período, a solução de NaOH foi titulada com HCl 0,5 mol L⁻¹ na presença de 2 ml de BaCl₂ a 10% (m/v) para precipitação do carbonato e 2 gotas de fenolftaleína 1% (m/v) como indicador. Os resultados foram expressos em $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo dia}^{-1}$.

3.8 Atividade Enzimática do Solo

As atividades das enzimas β -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase foram determinadas pelo método colorimétrico de Tabatabai (1994), baseado na quantificação do p-nitrofenol (pNF) liberado após a hidrólise de substratos sintéticos específicos, com leitura em espectrofotômetro a 410 nm.

A atividade da β -glicosidase foi determinada a partir da incubação do solo com tampão acetato de sódio (pH 5,0) e solução de p-nitrofenil- β -D-glicopiranosídeo (PNG), a reação foi interrompida e o material filtrado para leitura em espectrofotômetro.

O mesmo procedimento foi adotado para a fosfatase ácida, substituindo-se o substrato por solução de p-nitrofenil fosfato dissódico (PNF).

Já para a arilsulfatase, utilizou-se tampão acetato de sódio em pH 5,8 e solução de p-nitrofenil sulfato de potássio (PNS), mantidas as demais condições de incubação e leitura.

3.9 Colonização Radicular Fúngica

A colonização radicular por fungos foi avaliada por meio de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e fungos endofíticos septados melanizados (DSE). As raízes coletadas junto ao solo durante a amostragem foram separadas por peneiramento úmido, lavadas em água corrente e submetidas ao processo de clarificação e coloração conforme Phillips e Hayman (1970). As raízes foram clarificadas em solução de KOH 10% (m/v) a 90 °C por 45 minutos, acidificadas em HCl 1% (v/v) por 10 minutos e coradas com azul de tripano 0,05% (m/v) em lactoglicerol (lactato:glicerina:água, 1:1:1) a 90 °C por 30 minutos. Após a coloração, as raízes foram lavadas em lactoglicerol puro para remover o excesso de corante e montadas em lâminas com glicerina.

A percentagem de colonização, ambos nativos da área, foi determinada pelo método da intersecção em quadrante, com avaliação de 100 campos microscópicos por amostra em microscópio óptico com objetiva de 40x. Foram consideradas estruturas positivas de FMA as hifas asseptadas e incolores, arbúsculos e vesículas, e de DSE as hifas septadas de coloração escura (melanizadas) no interior das células corticais radiculares. Os resultados foram expressos em percentagem de comprimento radicular colonizado.

3.10 Atributos Físicos do Solo

A densidade do solo (Ds) foi determinada pelo método do anel volumétrico, dividindo-se a massa de solo seco em estufa a 105 °C por 24 horas pelo volume interno do anel de Kopecky (98,17 cm³), conforme Teixeira *et al.* (2017).

A microporosidade foi determinada por tensão de 6 kPa em mesa de tensão, correspondente a poros com diâmetro equivalente superior a 50 µm. Os anéis com solo saturado foram submetidos a essa tensão por 48 horas até atingir equilíbrio, pesados e secos em estufa para determinar o volume de água retida, equivalente à microporosidade. A porosidade total foi calculada com base na densidade de partículas ($D_p = 2,65 \text{ g cm}^{-3}$), assumida constante para Latossolos. A macroporosidade foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade. Todos os procedimentos seguiram Teixeira *et al.* (2017).

A resistência mecânica do solo à penetração de raízes (RP) foi determinada em campo com penetrômetro de impacto após a semeadura da soja. As leituras foram realizadas em três pontos por parcela até a profundidade de 0,20 m, e os valores de impactos dm⁻¹ foram

convertidos para MPa pela fórmula de Stolf (1991): $RP \text{ (MPa)} = 5,6 + 6,89 \times N$, onde N é o número de impactos por dm. Os resultados foram estratificados nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m para compatibilização com as amostras indeformadas.

3.11 Macrofauna Edáfica

A macrofauna edáfica foi avaliada após a semeadura da soja, por coleta direta em monólitos de solo demarcados por quadrantes de $0,25 \times 0,25$ m, com uma amostra coletada por parcela na camada de 0,00-0,05 m. O solo contido em cada quadrante foi cuidadosamente retirado com auxílio de enxada, transferido para bandejas de fundo branco e submetido à separação manual completa, com separação dos organismos do substrato mineral e dos resíduos vegetais por meio de pinça entomológica.

O procedimento foi realizado imediatamente após a coleta, com observação direta a olho nu e auxílio de lupa de campo para a captura de indivíduos de menor porte. Após a separação, os organismos foram acondicionados em frascos com álcool etílico a 70% em volume para conservação e posterior identificação em laboratório.

A identificação foi realizada ao nível de ordem taxonômica com auxílio de lupa estereoscópica, utilizando chave de identificação proposta por Moço *et al.* (2005). Os resultados foram expressos em número de indivíduos por metro quadrado (ind. m⁻²).

3.12 Análise dos Dados

As amostras químicas, microbiológicas, enzimáticas e físicas indeformadas foram coletadas após a colheita do sorgo e antes da semeadura da soja, em outubro de 2024. A resistência à penetração e a macrofauna edáfica foram avaliadas após a semeadura da soja. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 10% de probabilidade, no software SISVAR.

As etapas de coleta, preparo e avaliações das amostras estão ilustradas no Apêndice A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

As respostas dos atributos químicos ao manejo tendem a ocorrer de forma gradual em solos argilosos de Cerrado, devido à adsorção de nutrientes, ao efeito tampão e à proteção da matéria orgânica pela fração mineral. Stefanoski *et al.* (2016) e Pinto *et al.* (2022) destacam que a textura, a matéria orgânica e o sistema de manejo influenciam a estabilidade dos indicadores de qualidade do solo. Com isso, os atributos químicos podem apresentar menor sensibilidade a alterações de curto prazo, especialmente quando comparados aos atributos biológicos e bioquímicos.

Na camada de 0,00–0,10 m, os teores de fósforo disponível (P), matéria orgânica (MO), pH, potássio, cálcio, magnésio, enxofre e acidez potencial (H+Al) não foram influenciados pelos sistemas de manejo, pelas coberturas vegetais ou pela interação entre esses fatores (Tabela 2). Esses resultados indicam que, após 12 anos de condução experimental, os diferentes sistemas conservacionistas mantiveram condições químicas semelhantes na camada superficial do solo.

Tabela 2 – Valores médios para teores de fósforo (P), matéria orgânica (MO), pH, cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al) e enxofre (S) do solo, sobre o efeito dos sistemas de manejo do solo e coberturas vegetais.

		P	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S
Fatores de Variação		mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	----- mmolc dm ⁻³ -----					
Manejo (M)	PR	49,0 a	24,2 a	5,5 a	5,3 a	34,2 a	22,7 a	23,7 a	0,0 a	5,5 a
	CM	46,7 a	25,2 a	5,3 a	5,2 a	27,7 a	20,5 a	28,7 a	0,5 a	6,0 a
	CM/SPD	43,2 a	24,7 a	5,7 a	6,5 a	37,0 a	23,5 a	21,0 a	0,0 a	5,0 a
	SPD/CM	50,5 a	25,0 a	5,4 a	7,2 a	32,5 a	23,5 a	25,7 a	0,0 a	5,7 a
	SPD-H	55,7 a	28,0 a	5,4 a	6,5 a	24,5 a	21,7 a	28,0 a	0,0 a	5,7 a
	SPD-D	56,0 a	25,7 a	5,5 a	6,9 a	32,2 a	22,7 a	26,7 a	0,0 a	8,0 a
Cobertura (C)	Marandu	50,1 a	26,3 a	5,5 a	6,5 a	33,9 a	21,5 a	25,0 a	0,0 a	4,9 a
	Ipyporã	50,3 a	24,7 a	5,4 a	6,1 a	28,8 a	23,4 a	26,3 a	0,2 a	7,1 a
p valor	M	0,716	0,433	0,685	0,527	0,447	0,880	0,172	0,458	0,835
	C	0,963	0,139	0,742	0,585	0,189	0,260	0,453	0,337	0,128
	MxC	0,609	0,735	0,878	0,583	0,818	0,888	0,731	0,458	0,909

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 10% de probabilidade. Nota: preparo reduzido (PR); cultivo mínimo (CM); sistema de plantio direto com disco (SPD-D) e sistema de plantio direto com haste (SPD-H); SPD alternado com CM (SPD/CM); e CM alternado com SPD (CM/SPD).

A manutenção de níveis semelhantes de fertilidade sugere que os sistemas avaliados foram capazes de preservar o equilíbrio químico do ambiente edáfico, favorecendo a disponibilidade de nutrientes e a sustentabilidade produtiva. Tal comportamento é consistente com a elevada estabilidade química característica de Latossolos argilosos manejados sob sistemas conservacionistas, nos quais os efeitos do manejo frequentemente se manifestam de forma mais expressiva em atributos biológicos e bioquímicos do que nos indicadores químicos tradicionais de fertilidade.

Os teores de matéria orgânica variaram de 24,2 a 28,0 g dm⁻³ entre os sistemas de manejo. Embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas, os valores encontrados podem ser considerados elevados para condições de Cerrado e evidenciam a capacidade dos sistemas avaliados de manter o aporte e a conservação de resíduos orgânicos na superfície do solo. Em Latossolos argilosos, a elevada interação entre a matéria orgânica e a fração mineral favorece a estabilização do carbono no solo, contribuindo para a manutenção dos estoques orgânicos ao longo do tempo (Stefanoski *et al.*, 2016).

Para o fósforo disponível, os teores oscilaram entre 43,2 e 56,0 mg dm⁻³, sem diferenças significativas entre os tratamentos. De forma semelhante, os valores de pH permaneceram entre 5,3 e 5,7, enquanto os teores de K, Ca e Mg apresentaram baixa variação entre os sistemas avaliados. Esses resultados demonstram que os manejos adotados foram igualmente eficientes na manutenção da fertilidade do solo, refletindo tanto o histórico de correção e adubação da área quanto a contribuição da ciclagem de nutrientes promovida pelas culturas de cobertura.

A ausência de diferenças para a acidez potencial (H+Al) e para o alumínio trocável reforça a condição de estabilidade química observada no experimento. Os baixos teores de Al e os valores de pH superiores a 5,0 indicam ambiente favorável ao desenvolvimento radicular e à atividade biológica do solo, sem restrições associadas à toxidez por alumínio. Da mesma forma, os teores de enxofre permaneceram semelhantes entre os tratamentos, evidenciando que os sistemas de manejo não alteraram significativamente a disponibilidade desse nutriente na camada avaliada.

As coberturas vegetais também não promoveram alterações nos atributos químicos analisados. Os consórcios envolvendo *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Urochloa brizantha* cv. Ipyporã apresentaram comportamento semelhante para todas as variáveis avaliadas, sugerindo contribuição equivalente para a manutenção da fertilidade química do solo nas condições deste estudo.

De maneira geral, os resultados evidenciam elevada estabilidade química do sistema após 12 anos de adoção de práticas conservacionistas. Considerando a textura argilosa do Latossolo estudado e sua elevada capacidade tampão, as alterações decorrentes do manejo tendem a ocorrer de forma gradual, sendo frequentemente mais perceptíveis em atributos biológicos, bioquímicos e físicos do que nos indicadores químicos de fertilidade. Assim, a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos não deve ser interpretada como ausência de efeitos do manejo, mas como indicativo da manutenção de condições químicas adequadas e relativamente estáveis no solo ao longo do período experimental.

Para os micronutrientes, os sistemas de manejo não influenciaram os teores de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn), indicando que os diferentes níveis de mobilização do solo não promoveram alterações expressivas na disponibilidade desses elementos após 12 anos de condução experimental (Tabela 3). Apenas o zinco (Zn) apresentou efeito significativo do manejo ($p = 0,043$); entretanto, a distribuição dos valores entre os tratamentos não evidenciou um padrão consistente que permitisse associar o comportamento observado a um sistema específico de manejo. Dessa forma, o resultado sugere uma resposta pontual do elemento, sem reflexo no conjunto dos atributos químicos avaliados.

Tabela 3 – Valores médios para teores de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) do solo, sobre o efeito dos sistemas de manejo do solo e coberturas vegetais.

Fatores de Variação		B	Cu	Fe	Mn	Zn
		----- mmolc dm ⁻³ -----				
Manejo (M)	PR	0,21 a	3,17 a	23,00 a	21,52 a	4,87 a
	CM	0,21 a	3,05 a	21,50 a	21,35 a	2,50 b
	CM/SPD	0,18 a	2,77 a	18,50 a	20,57 a	2,30 b
	SPD/CM	0,22 a	3,40 a	20,25 a	22,07 a	4,20 a
	SPD-H	0,20 a	3,22 a	23,50 a	21,65 a	3,07 b
	SPD-D	0,20 a	3,10 a	23,00 a	22,05 a	3,65 a
Cobertura (C)	Marandu	0,22 a	3,26 a	23,91 a	21,20 a	3,77 a
	Ipyporã	0,18 b	2,97 a	19,33 a	21,87 a	3,09 a
<i>p</i> valor	M	0,783	0,949	0,883	0,582	0,043
	C	0,049	0,441	0,122	0,210	0,156
	MxC	0,833	0,730	0,600	0,628	0,338

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 10% de probabilidade. Nota: preparo reduzido (PR); cultivo mínimo (CM); sistema de plantio direto com disco (SPD-D) e sistema de plantio direto com haste (SPD-H); SPD alternado com CM (SPD/CM); e CM alternado com SPD (CM/SPD).

Em relação às coberturas vegetais, verificou-se efeito significativo apenas para os teores de boro ($p = 0,049$), com maiores valores médios observados sob *Urochloa brizantha* cv. Marandu em comparação à cv. Ipyporã. Esse comportamento pode estar relacionado a diferenças na absorção, acumulação e posterior reciclagem do micronutriente pela fitomassa produzida pelas espécies forrageiras, uma vez que a decomposição dos resíduos vegetais constitui importante via de retorno de micronutrientes ao solo. Para Cu, Fe, Mn e Zn, não foram constatadas diferenças entre as coberturas avaliadas.

Não foi observada interação significativa entre sistemas de manejo e coberturas vegetais para nenhum dos micronutrientes analisados, indicando que os efeitos dos fatores estudados ocorreram de forma independente. De maneira geral, os resultados evidenciam elevada estabilidade da disponibilidade de micronutrientes no solo, reforçando a capacidade dos sistemas conservacionistas em manter condições químicas adequadas mesmo após longo período de adoção.

4.2 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO

A ausência de diferenças significativas para o carbono da biomassa microbiana (CBM) entre os sistemas de manejo e coberturas vegetais avaliados (Tabela 4) evidencia que a biomassa

microbiana do solo se manteve relativamente estável após 12 anos de condução sob sistemas conservacionistas. Os valores variaram de 0,24 mg C kg⁻¹ no tratamento CM a 0,55 mg C kg⁻¹ no SPD/CM, sem diferenças estatísticas entre os tratamentos.

O CBM representa a fração viva da matéria orgânica do solo e é reconhecido como um dos indicadores mais sensíveis das alterações promovidas pelo manejo, por refletir o tamanho e o potencial metabólico da comunidade microbiana (Mercante *et al.*, 2008; Vance; Brookes; Jenkinson, 1987). Entretanto, a ausência de resposta significativa sugere que os diferentes sistemas avaliados proporcionaram condições semelhantes para o desenvolvimento e manutenção da microbiota do solo. Esse comportamento é compatível com ambientes conduzidos sob sistemas conservacionistas de longa duração, nos quais a manutenção da cobertura vegetal e o aporte contínuo de resíduos favorecem a estabilização dos compartimentos biológicos do solo.

Da mesma forma, a respiração basal do solo (RBS) não apresentou diferenças significativas em função do manejo ou das coberturas vegetais. Os valores oscilaram entre 15,00 e 23,57 mg C kg⁻¹ de solo seco dia⁻¹, indicando relativa uniformidade da atividade metabólica microbiana entre os tratamentos. Como a RBS expressa a intensidade da mineralização da matéria orgânica e o fluxo respiratório da comunidade microbiana, a ausência de diferenças sugere que os processos de decomposição e transformação da matéria orgânica ocorreram em intensidade semelhante em todos os sistemas avaliados (Mercante *et al.*, 2008).

Considerando que a área experimental apresenta histórico superior a uma década sob práticas conservacionistas e textura argilosa, a estabilidade observada pode estar associada à manutenção de condições favoráveis de umidade, disponibilidade de substrato e proteção física da matéria orgânica, fatores que contribuem para reduzir oscilações na atividade microbiana.

Tabela 4 – Valores médios de carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS) e colonização radicular fúngica (FMA+DSE) em função dos sistemas de manejo do solo e das coberturas vegetais.

Fatores de Variação		CBM	RBS	FMA+DSE
		mg C kg ⁻¹	mg C kg ⁻¹ solo seco dia ⁻¹	%
Manejo (M)	PR	0,48 a	19,28 a	24,00 a
	CM	0,24 a	19,50 a	24,25 a
	CM/SPD	0,25 a	23,57 a	42,00 a
	SPD/CM	0,55 a	15,00 a	33,25 a
	SPD-H	0,52 a	18,21 a	36,00 a
	SPD-D	0,45 a	18,21 a	33,75 a
Cobertura (C)	Marandu	0,39 a	19,85 a	25,58 b
	Ipyporã	0,44 a	18,07 a	38,83 a
p valor	M	0,584	0,661	0,641
	C	0,750	0,534	0,078
	MxC	0,133	0,743	0,673

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 10% de probabilidade. Nota: preparo reduzido (PR); cultivo mínimo (CM); sistema de plantio direto com disco (SPD-D) e sistema de plantio direto com haste (SPD-H); SPD alternado com CM (SPD/CM); e CM alternado com SPD (CM/SPD).

Para a colonização (FMA+DSE), não foi observado efeito dos sistemas de manejo nem da interação manejo × cobertura. Entretanto, verificou-se efeito da cobertura vegetal, com maior percentual de colonização nas parcelas cultivadas com *Urochloa brizantha* cv. Ipyporã (38,83%) em comparação àquelas com *Urochloa brizantha* cv. Marandu (25,58%). Esse resultado indica que características inerentes às espécies forrageiras podem influenciar a intensidade das associações fúngicas estabelecidas na rizosfera. A literatura demonstra que diferenças na arquitetura radicular, na produção de exsudatos e na qualidade dos compostos orgânicos liberados pelas raízes podem modificar a composição e a atividade das comunidades de fungos simbióticos presentes no solo (Zhang *et al.*, 2024).

A ausência de diferenças entre os sistemas de manejo para FMA+DSE também merece destaque. Fungos micorrízicos arbusculares são particularmente sensíveis a distúrbios físicos intensos do solo, sendo favorecidos por sistemas com menor revolvimento e maior continuidade da cobertura vegetal (Kuyper; Jansa, 2023). No presente estudo, entretanto, todos os tratamentos foram conduzidos dentro de uma lógica conservacionista e apresentavam histórico prolongado de aporte de resíduos vegetais, condição que provavelmente contribuiu para a

manutenção de níveis semelhantes de colonização entre os manejos. Esse resultado reforça a hipótese de que, após longos períodos de adoção de práticas conservacionistas, diferenças estruturais entre sistemas podem se tornar menos pronunciadas para determinados indicadores biológicos.

A atividade das enzimas β -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida não foi influenciada pelos sistemas de manejo, pelas coberturas vegetais ou pela interação entre esses fatores (Tabela 5). Esses resultados indicam que, após 12 anos de condução experimental, os diferentes sistemas conservacionistas mantiveram funcionamento bioquímico semelhante, sem alterações detectáveis na atividade das enzimas relacionadas aos ciclos do carbono, enxofre e fósforo. Considerando que as enzimas do solo respondem à disponibilidade de substratos orgânicos, à atividade microbiana e às condições ambientais do sistema, a estabilidade observada sugere que os tratamentos proporcionaram condições semelhantes para os processos bioquímicos associados à ciclagem de nutrientes (Bandick; Dick, 1999; Tabatabai, 1994).

A β -glicosidase é considerada uma das principais enzimas indicadoras da dinâmica do carbono por atuar na etapa final da degradação da celulose, liberando compostos assimiláveis pelos microrganismos. Sua manutenção em níveis semelhantes entre os tratamentos indica que os processos de decomposição da matéria orgânica e transformação dos resíduos vegetais ocorreram de forma relativamente homogênea no sistema. Da mesma forma, a atividade da arilsulfatase, relacionada à mineralização de compostos orgânicos sulfurados, demonstra que a dinâmica do enxofre permaneceu estável entre os manejos. Para a fosfatase ácida, enzima associada à liberação de fósforo a partir de formas orgânicas, a ausência de diferenças sugere que os mecanismos biológicos envolvidos na disponibilização desse nutriente foram mantidos independentemente do sistema de manejo adotado.

Tabela 5 – Valores médios da atividade das enzimas β -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida do solo em função dos sistemas de manejo do solo e das coberturas vegetais.

Fatores de Variação		β -glicosidase	Arilsulfatase	Fosfatase
		$\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$		
Manejo (M)	PR	146,47 a	63,70 a	176,31 a
	CM	135,48 a	44,14 a	189,24 a
	CM/SPD	166,02 a	50,23 a	230,92 a
	SPD/CM	134,63 a	43,45 a	179,49 a
	SPD-H	136,94 a	52,81 a	194,68 a
	SPD-D	138,52 a	63,17 a	194,43 a
Cobertura (C)	Marandu	145,66 a	59,25 a	197,30 a
	Ipyporã	140,36 a	46,58 a	191,05 a
<i>p</i> valor	M	0,847	0,756	0,482
	C	0,742	0,232	0,708
	MxC	0,679	0,981	0,684

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 10% de probabilidade. Nota: preparo reduzido (PR); cultivo mínimo (CM); sistema de plantio direto com disco (SPD-D) e sistema de plantio direto com haste (SPD-H); SPD alternado com CM (SPD/CM); e CM alternado com SPD (CM/SPD).

Esse comportamento é coerente com os resultados observados para os atributos microbiológicos do solo. A estabilidade do carbono da biomassa microbiana e da respiração basal indica que a comunidade microbiana apresentou tamanho e atividade semelhantes entre os tratamentos, condição que pode refletir diretamente na produção e na atividade das enzimas extracelulares. Como a síntese enzimática está associada à atividade dos microrganismos do solo, a ausência de alterações nos indicadores microbiológicos contribui para explicar a uniformidade observada nas atividades enzimáticas.

Além disso, a textura argilosa do Latossolo estudado pode ter contribuído para a estabilidade desses atributos. Solos com maior teor de argila apresentam capacidade de adsorção e proteção de enzimas extracelulares em superfícies minerais, especialmente óxidos de ferro e alumínio, aumentando sua persistência no ambiente e reduzindo oscilações decorrentes do manejo (Bandick; Dick, 1999; Tabatabai, 1994). Paralelamente, o aporte contínuo de resíduos vegetais e a manutenção da cobertura do solo ao longo dos anos podem ter favorecido condições mais estáveis de disponibilidade de carbono, umidade e temperatura, fatores essenciais para a atividade bioquímica do solo.

Embora não tenham sido observadas diferenças significativas entre os tratamentos, os valores médios de β -glicosidase e fosfatase ácida podem ser relacionados, de forma complementar, aos parâmetros interpretativos da BioAS/Embrapa. Para Latossolos Vermelhos argilosos de Cerrado, Mendes *et al.* (2019) classificam a β -glicosidase como baixa quando ≤ 66 , moderada entre 67 e 115 e adequada quando > 116 ; para fosfatase ácida, os valores são considerados baixos quando ≤ 263 , moderados entre 264 e 494 e adequados quando > 495 mg de p-nitrofenol kg^{-1} de solo h^{-1} . Neste estudo, a β -glicosidase apresentou valores compatíveis com a classe adequada, enquanto a fosfatase ácida permaneceu abaixo da faixa moderada, indicando maior manutenção da atividade associada ao ciclo do carbono em relação à enzima ligada ao ciclo do fósforo.

Portanto, a ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos não deve ser interpretada como baixa atividade biológica, mas como indicativo de que os sistemas avaliados apresentaram funcionamento bioquímico semelhante. Em conjunto, os resultados indicam manutenção da atividade enzimática relacionada ao ciclo do carbono, enquanto as enzimas associadas aos ciclos do fósforo e do enxofre apresentaram resposta mais limitada ou sem diferenciação entre os manejos, reforçando a estabilidade bioquímica do solo nas condições avaliadas.

4.3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Os atributos físicos do solo avaliados, resistência mecânica à penetração de raízes (RP), macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo (Ds), não apresentaram efeito significativo dos sistemas de manejo nem das coberturas vegetais (Tabela 6), indicando que, nas condições do experimento, essas práticas não foram suficientes para promover mudanças detectáveis na condição física do solo no período avaliado. Esses resultados sugerem estabilidade relativa da estrutura física frente aos tratamentos adotados, embora também possa refletir baixa sensibilidade desses atributos para responder rapidamente a intervenções de curto e médio prazo.

A profundidade foi o principal fator de variação, com efeito sobre RP, microporosidade, porosidade total e Ds, evidenciando estratificação vertical do perfil. Na camada de 0,00–0,05 m, observaram-se maiores valores de RP, microporosidade, porosidade total e Ds, sendo que a Ds não diferiu da camada de 0,05–0,10 m. Esse resultado pode refletir a maior variabilidade da superfície do solo, favorecida pelo acúmulo de resíduos vegetais, atividade biológica e variações de umidade.

Embora a Ds tenha permanecido abaixo do limite crítico de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, Sato *et al.* (2015) destacam que, em Latossolos, a densidade crítica varia conforme textura e umidade, podendo ser próxima de $1,51 \text{ g cm}^{-3}$ em solos argilosos. Assim, os valores observados não indicam compactação severa pela Ds. No entanto, a RP superficial de 3,83 MPa superou o limite de 2,0 MPa, o que exige cautela, pois, conforme Moraes *et al.* (2020), a RP é fortemente dependente da umidade do solo e deve ser interpretada junto à Ds e à porosidade.

Tabela 6 – Valores médios para resistência à penetração (RP), macroporosidade (macroporos), microporosidade (microporos), porosidade total (porosidade) e densidade do solo (Ds), sobre o efeito dos sistemas de manejo do solo e coberturas vegetais.

Fatores de Variação		RP	Macroporos	Microporos	Porosidade	Ds
		MPa	----- % -----			g cm^{-3}
Manejo (M)	PR	2,63	3,24	42,44	45,69	1,41
	CM	2,46	3,76	44,49	48,26	1,46
	CM/SPD	3,20	1,88	42,25	44,14	1,37
	SPD/CM	3,11	5,23	41,20	46,43	1,42
	SPD-H	3,14	3,68	41,98	45,66	1,42
	SPD-D	2,78	2,99	42,81	45,80	1,43
Profundidade – cm (P)	00-05	3,83 a	3,87	44,78 a	48,66 a	1,43 b
	05-10	2,90 b	2,76	41,61 b	44,38 b	1,41 b
	10-20	1,94 c	3,76	41,19 b	44,95 b	1,26 a
Cobertura (C)	Marandu	2,93	3,12	43,05	46,18	1,49
	Ipyporã	2,85	3,81	42,00	45,81	1,50
p valor	M	0,232	0,190	0,384	0,465	0,867
	C	0,700	0,342	0,233	0,749	0,661
	P	0,000	0,385	0,003	0,007	0,000
	MxC	0,299	0,893	0,146	0,217	0,375
	MxP	0,137	0,445	0,134	0,071	0,819
	CxP	0,275	0,456	0,905	0,816	0,476
	MxCxP	0,113	0,960	0,727	0,962	0,657

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 10% de probabilidade. Nota: preparo reduzido (PR); cultivo mínimo (CM); sistema de plantio direto com disco (SPD-D) e sistema de plantio direto com haste (SPD-H); SPD alternado com CM (SPD/CM); e CM alternado com SPD (CM/SPD).

Além disso, foram observados valores negativos de macroporosidade, principalmente nas camadas subsuperficiais, decorrentes do cálculo por diferença entre porosidade total e microporosidade, o que torna esse indicador sensível a pequenas variações analíticas.

4.4 MACROFAUNA EDÁFICA

Entre os grupos taxonômicos avaliados, apenas Coleoptera apresentou resposta significativa aos fatores experimentais, com efeito do manejo e da interação manejo $\times$ cobertura vegetal (Tabela 7). Para os demais grupos e para a densidade total da macrofauna, não foram observadas variações significativas, indicando baixa sensibilidade da comunidade aos tratamentos no período avaliado.

O desdobramento da interação mostrou maior densidade desse grupo no sistema SPD/CM sob *Urochloa brizantha* cv. Marandu em relação aos demais manejos, enquanto sob cv. Ipyporã não houve variação entre sistemas. Entre as coberturas vegetais, esse efeito foi observado apenas no SPD/CM, com maior densidade sob Marandu (Tabela 8).

De forma geral, a macrofauna total manteve-se estável entre os tratamentos, enquanto Coleoptera respondeu pontualmente à combinação entre manejo e cobertura vegetal, evidenciando que alterações iniciais no sistema solo–manejo–cobertura foram perceptíveis apenas para esse grupo, sem mudanças estruturais na comunidade.

Tabela 7 – Valores médios de densidade da macrofauna do solo, distribuída por ordens taxonômicas, em função dos sistemas de manejo do solo e das coberturas vegetais.

Fatores de Variação		Annelida	Araneae	Coleoptera	Dermaptera	Diptera	Hymenoptera	Isoptera	Lepidoptera	Myriapoda	Total
----- ind m ⁻² -----											
Manejo (M)	PR	2,00 a	0,00 a	0,50 b	1,25 a	0,00 a	5 a	0,00 a	0,50 a	0,75 a	10,5 a
	CM	2,50 a	0,00 a	0,50 b	1,75 a	0,00 a	6,75 a	0,00 a	0,25 a	0,75 a	14,2 a
	CM/SPD	3,25 a	0,00 a	0,75 b	2,50 a	0,00 a	0,75 a	0,00 a	0,00 a	0,25 a	8,0 a
	SPD/CM	3,00 a	0,50 a	1,50 a	0,50 a	0,25 a	0,75 a	0,00 a	0,25 a	1,25 a	8,2 a
	SPD-H	2,75 a	0,25 a	0,00 b	2,00 a	0,00 a	5,25 a	0,00 a	0,00 a	1,25 a	11,7 a
	SPD-D	2,00 a	0,00 a	0,00 b	2,25 a	0,00 a	6,75 a	0,50 a	0,00 a	0,75 a	9,2 a
Cobertura (C)	Marandu	2,33 a	0,08 a	0,75 a	1,83 a	0,00 a	3,5 a	0,00 a	0,16 a	0,75 a	9,7 a
	Ipyporã	3,50 a	0,16 a	0,33 b	1,58 a	0,08 a	3,91 a	0,16 a	0,16 a	0,91 a	11,0 a
p valor	M	0,921	0,292	0,018	0,473	0,458	0,810	0,458	0,458	0,839	0,760
	C	0,298	0,574	0,083	0,687	0,337	0,893	0,337	0,997	0,737	0,631
	MxC	0,950	0,883	0,004	0,076	0,458	0,308	0,458	0,701	0,791	0,220

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 10% de probabilidade. Nota: preparo reduzido (PR); cultivo mínimo (CM); sistema de plantio direto com disco (SPD-D) e sistema de plantio direto com haste (SPD-H); SPD alternado com CM (SPD/CM); e CM alternado com SPD (CM/SPD).

Tabela 8 – Densidade de indivíduos da ordem Coleoptera no desdobramento da interação entre os sistemas de manejo do solo e as coberturas vegetais.

Manejo	Cobertura		<i>p</i> valor
	Marandu	Ipyporã	
PR	0,5 Ab	0,5 Aa	1,0000
CM	0,0 Ab	1,0 Aa	0,0888
CM/SPD	1,0 Ab	0,5 Aa	0,3728
SPD/CM	3,0 Aa	0,0 Ba	0,0001
SPD-H	0,0 Ab	0,0 Aa	1,0000
SPD-D	0,0 Ab	0,0 Aa	1,0000
<i>p</i> valor	0,0008	0,3904	

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 10% de probabilidade. Nota: preparo reduzido (PR); cultivo mínimo (CM); sistema de plantio direto com disco (SPD-D) e sistema de plantio direto com haste (SPD-H); SPD alternado com CM (SPD/CM); e CM alternado com SPD (CM/SPD).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos indicam que, após 12 anos de condução experimental sob sistemas conservacionistas de manejo do solo e coberturas vegetais, a maior parte dos atributos químicos, físicos, microbiológicos e biológicos avaliados não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos. A fertilidade do solo apresentou pouca variação entre os sistemas, com respostas significativas restritas ao zinco, em função do manejo, e ao boro, em função da cobertura vegetal. Os atributos físicos não foram influenciados pelos manejos ou pelas coberturas, porém resistência à penetração, microporosidade, porosidade total e densidade do solo variaram em função da profundidade.

O carbono da biomassa microbiana, a respiração basal e as atividades das enzimas β -glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, o que pode estar associado à estabilidade da área após 12 anos de manejo conservacionista. A macrofauna total manteve-se estável, enquanto Coleoptera apresentou efeito de manejo e interação manejo $\times$ cobertura, com maior densidade no sistema SPD/CM sob *Urochloa brizantha* cv. Marandu.

Dessa forma, os efeitos dos sistemas de manejo e das coberturas vegetais sobre a saúde do solo foram restritos a poucos indicadores, principalmente zinco, boro, variações físicas em profundidade e densidade de Coleoptera. Esses resultados demonstram que a interpretação da saúde do solo exige uma abordagem integrada, uma vez que cada conjunto de indicadores apresenta sensibilidade distinta às práticas de manejo. A continuidade do monitoramento da área experimental, associada à realização de análises a longo prazo, poderá contribuir para compreender melhor a dinâmica desses sistemas em Latossolo Vermelho Distrófico típico sob condições de Cerrado.

REFERÊNCIAS

- ANGST, G. *et al.* Conceptualizing soil fauna effects on labile and stabilized soil organic matter. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 5005, 2024.
- BALOTA, E. L.; CALEGARI, A.; NAKATANI, A. S.; COYNE, M. S. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: a long-term study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 197, p. 31-40, 2014.
- BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, n. 11, p. 1471-1479, 1999.
- CHIAPPERO, M. F. *et al.* A global meta-analysis reveals a consistent reduction in soil fauna abundance and richness as consequence of land-use conversion. **Science of the Total Environment**, v. 946, 173822, 2024.
- SILVA, R. F. da *et al.* Fauna edáfica influenciada pelo uso de culturas e consórcios de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, p. 130-137, 2013.
- DELGADO-BAQUERIZO, M. *et al.* Soil microbial communities drive the resistance of ecosystem multifunctionality to global change in drylands across the globe. **Ecology Letters**, v. 20, n. 10, p. 1295-1305, 2017. DOI: 10.1111/ele.12826.
- FERRAZ-ALMEIDA, R.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; CAMARGO, R.; LEMES, E. M.; FARIA, R. S. de; LANA, R. M. Q. Sorghum-grass intercropping systems under varying planting densities in a semi-arid region: focusing on soil carbon and grain yield in the conservation systems. **Agriculture**, v. 12, n. 11, 1762, 2022. DOI: 10.3390/agriculture12111762.
- FEBRAPDP. **SPD praticado no Brasil é destaque em conceituada revista científica internacional**. Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto, 17 abr. 2025. Disponível em: <https://plantiodireto.org.br/spd-praticado-no-brasil-e-destaque-em-conceituada-revista-cientifica-internacional>. Acesso em: 9 jul. 2026.
- HOEK, A. C. *et al.* Towards environmentally sustainable food systems: decision-making factors in sustainable food production and consumption. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 610-626, 2021.
- KARLEN, D. L. *et al.* Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 1, p. 4-10, 2001.
- KUYPER, T. W.; JANSZ, J. Arbuscular mycorrhiza: advances and retreats in our understanding of the ecological functioning of the mother of all root symbioses. **Plant and Soil**, v. 489, n. 1, p. 41-88, 2023.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; LOPES, A. A. de C.; SOUZA, L. M. de. **Bioanálise do solo: como acessar e interpretar a saúde do solo**. Circular Técnica 38. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2019.
- MERCANTE, F. M.; SILVA, R. F.; FRANCELINO, C. S. F.; CAVALHEIRO, J. C. T.; OTSUBO, A. A. Biomassa microbiana em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 4, p. 479-485, 2008.
- MOÇO, M. K. S.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; CORREIA, M. E. F. Caracterização da fauna edáfica em diferentes coberturas vegetais na região Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 555-564, 2005.

- MORAES, M. T. de *et al.* Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 200, 104611, 2020.
- NAKAO, A. H. *et al.* Intercropping *Urochloa brizantha* and sorghum inoculated with diazotrophic bacteria. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 4, p. 619-627, 2018.
- PACHECO, L. P. *et al.* Produção de fitomassa e ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura no cerrado piauiense. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 13-23, 2017.
- PHILIPPOT, L. *et al.* The interplay between microbial communities and soil properties. **Nature Reviews Microbiology**, v. 22, n. 4, p. 226-239, 2024.
- PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 55, n. 1, p. 158-161, 1970.
- PINTO, L. A. S. R. *et al.* Soil quality indicators in conventional and conservation tillage systems in the Brazilian Cerrado. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, 306, 2022.
- PRIMAVESI, A. **Manual do solo vivo: solo sadio, planta sadia, ser humano sadio**. São Paulo: Expressão Popular, 2016.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001.
- SATO, M. K. *et al.* Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **International Agrophysics**, v. 29, p. 441-447, 2015.
- SILVA, C. A. *et al.* Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. In: BETTIOL, W. *et al.* (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 17-47.
- SODRÉ FILHO, J. *et al.* Intercropping sorghum and grasses during off-season in the Brazilian Cerrado. **Scientia Agricola**, v. 79, n. 5, e20200284, 2022.
- STEFANOSKI, D. C. *et al.* Soil quality and management: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, e0150128, 2016.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 229-235, 1991.
- 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.
- TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W. *et al.* (ed.). **Methods of soil analysis: part 2: microbiological and biochemical properties**. Madison: **Soil Science Society of America**, 1994. p. 775-833.
- TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- TENG, J. *et al.* Conservation agriculture improves soil health and sustains crop yields after long-term warming. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, 8785, 2024.
- UNESP. **Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira: dados meteorológicos. Ilha Solteira**: UNESP, 2026. Disponível em: <https://clima.feis.unesp.br/>. Acesso em: 9 jul. 2026.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987.

VASU, D.; TIWARY, P.; CHANDRAN, P. A novel and comprehensive soil quality index integrating soil morphological, physical, chemical and biological properties. **Soil and Tillage Research**, v. 244, 106246, 2024.

VEZZANI, F. M. Solos e os serviços ecossistêmicos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 4, p. 673-684, 2015.

ZHANG, J. *et al.* Potential of arbuscular mycorrhizal fungi for soil health: a review. **Pedosphere**, v. 34, n. 2, p. 279-288, 2024.

APÊNDICE A – REGISTRO FOTOGRÁFICO DAS ETAPAS DO EXPERIMENTO



Figura 1 – Coleta do solo (a); peneiramento e preparo do solo para avaliações posteriores (b); avaliação de umidade do solo (c). Fotos: Ana Clara Britto Anacleto.



Figura 2 – Monitoramento do sorgo e das plantas de cobertura. Fotos: Ana Clara Britto Anacleto.



Figura 3 – Atividade enzimática do solo em laboratório. Fotos: Ana Clara Britto Anacleto.



Figura 4 – Incubação das amostras para respiração basal do solo. Fotos: Ana Clara Britto Anacleto.



Figura 5 – Coleta, separação e identificação da macrofauna do solo. Fotos: Ana Clara Britto Anacleto.

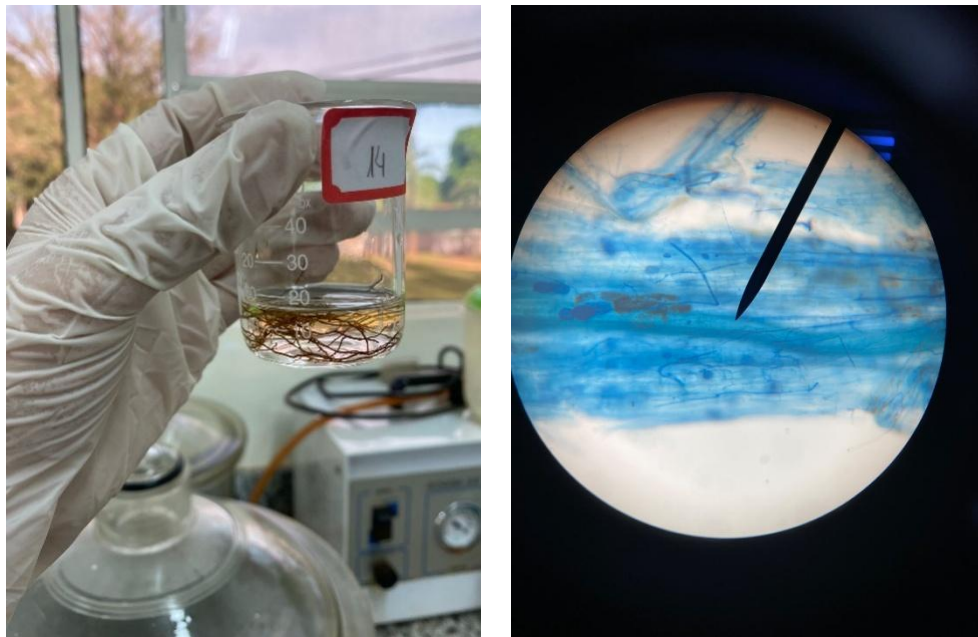


Figura 6 – Colonização radicular fúngica (FMA+DSE). Fotos: Ana Clara Britto Anacleto.



Figura 7 – Determinação da Resistência à penetração, após semeadura da soja. Fotos: Ana Clara Britto Anacleto.



Figura 8 – Carbono da biomassa microbiana (CBM). Fotos: Ana Clara Britto Anacleto.



Figura 9 - Amostras indeformadas coletadas com anel de Kopeck, para determinação de densidade, macro e microporosidade e porosidade total, realizadas pelo método do anel volumétrico após semeadura da soja. Fotos: Ana Clara Britto Anacleto