

CRISTIANO ALVES DA SILVA

**INTERVENÇÃO MECÂNICA E CONSÓRCIO DE BRAQUIÁRIA COM
CROTALÁRIA EM ÁREA DE PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO**

Botucatu

2023

CRISTIANO ALVES DA SILVA

**INTERVENÇÃO MECÂNICA E CONSÓRCIO DE BRAQUIÁRIA COM
CROTALÁRIA EM ÁREA DE PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO**

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

Orientador(a): Dirceu Maximino Fernandes

Coorientador(a): Rodrigo Arroyo Garcia

Botucatu

2023

S586i

Silva, Cristiano Alves da

Intervenção mecânica e consórcio de braquiária com crotalária em
área de plantio direto consolidado / Cristiano Alves da Silva. --

Botucatu, 2023

100 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Dirceu Maximino Fernandes

Coorientador: Rodrigo Arroyo Garcia

1. Plantio direto. 2. Gramíneas forrageiras. 3. Soja. 4. Ciência do
solo. 5. Agricultura sustentável. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

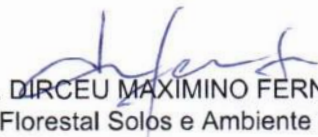
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INTERVENÇÃO MECÂNICA E CONSÓRCIO DE BRAQUIÁRIA E CROTALÁRIA EM ÁREA DE PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO

AUTOR: CRISTIANO ALVES DA SILVA

ORIENTADOR: DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

COORIENTADOR: RODRIGO ARROYO GARCIA

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


Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES (Participação Virtual)
Ciência Florestal Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP

pesquisadora MICHELY TOMAZI (Participação Virtual)
Ciência do Solo / Embrapa


Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Botucatu, 03 de agosto de 2023

*Aos meus amados pais,
Iraci e Nelson,*

dedico

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais que sempre estiveram ao meu lado, incentivando-me a perseguir os meus sonhos e dedicação ao longo de toda a minha vida.

Ao Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes pela orientação, paciência e todas as colaborações.

A Unesp por todos os consentimentos e flexibilizações realizadas durante e após o período de pandemia.

Ao pesquisador e coorientador Dr. Rodrigo Arroyo Garcia, por me acompanhar desde a iniciação científica, por aceitar a coorientação e ceder o experimento, por todos os ensinamentos, pela paciência e parceria de sempre.

A pesquisadora da Embrapa Agropecuária Oeste, Dra. Michely Tomazi, por possibilitar a condução do experimento, pelos ensinamentos e auxílio prestado durante a pesquisa, pelas ferramentas, reagentes e equipamentos.

A Prof. Dra. Elaine Reis Pinheiro Lourente e a Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) por conceder o laboratório de Microbiologia do Solo, equipamentos e reagentes para a avaliação das micorrizas.

Aos técnicos de laboratório e, em especial, aos técnicos de campo da Embrapa, Cleberson Flauzino e Júlio Leal, por acompanhar o experimento, auxiliar nas avaliações, pelo empréstimo de ferramentas e pela amizade.

A Embrapa Agropecuária Oeste por conceder as instalações para avaliação do experimento.

Ao produtor rural e proprietário da Faz. São José, Sr. Luciano Manfio por conceder parte de sua propriedade para a condução do experimento.

Ao Dr. Gustavo Ferreira da Silva pela valiosa contribuição na confecção da análise estatística multivariada e interpretação dos resultados.

Aos demais funcionários da Embrapa que auxiliaram nas avaliações de campo e de laboratório, bem como nos processos legais de validação e documentação.

A Prof. Dra. Mariana Zampar, pela simpatia de sempre e valiosa oportunidade de iniciação científica oferecida nos primórdios da graduação, abrindo as portas do mundo da pesquisa e da pós-graduação.

A minha amiga e parceira de Embrapa, Me. Thainá Casavechia, pela amizade e pelo apoio concedido.

A minha colega Mayara Chaves por ajudar nos procedimentos de avaliação de micorrizas.

Aos meus amigos, Tiago Fanhani, Luis Fernando Rissato e Mayara Oliveira, que sempre estiveram mandando boas energias, concedendo apoio nos momentos difíceis e celebrando as minhas conquistas.

À Fundação Agrisus pelo apoio financeiro concedido ao projeto (Processo N° 3005/20), sendo de grande valia para a condução do experimento.

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

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida posteriormente.

“Thinking is the hardest work there is, which is the probable reason why so few engage in it”. – Henry Ford

FORD, H. My Philosophy of Industry. New York: Coward-McCann, 1929. p. 25.

RESUMO

A prática do consórcio de espécies caracterizadas por sistemas radiculares robustos e alta produção de biomassa com plantas leguminosas apresenta-se como uma alternativa viável para melhorar o ambiente radicular, evitando a necessidade de intervenção mecânica. Objetivou-se estudar o uso de intervenção mecânica por meio de subsolagem (SUB) e o consórcio de Capim-Xaraés (*Brachiaria brizantha* cv. Xaraés) (XS) com *Crotalaria ochroleuca* (CO) substituindo o cultivo de milho (MI) consorciado com *Brachiaria ruziziensis* (RU) sob plantio direto (PD) em um Latossolo Vermelho Distroférrico de textura muito argilosa. O experimento foi conduzido na Faz. São José, município de Rio Brilhante, MS. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições e sete tratamentos, constituídos por: SUB22/XS; SUB22/XS+CO; SUB22/MI+RU; PD/XS; PD/XS+CO; PD/MI+RU (testemunha); e SUB21/XS+CO (SUB em fevereiro/21 e semeadura do consórcio em outubro/21). A intervenção mecânica foi realizada em fevereiro/22, com profundidade de trabalho de 25 cm e, em seguida, semeou-se as culturas. Avaliou-se a resistência do solo à penetração (RP) entre os meses de maio e setembro/22, aferindo-se também a umidade gravimétrica. Determinou-se a matéria seca dos cultivos em diferentes épocas durante o cultivo das forrageiras. Em agosto/22, amostras de solo (0-10 cm) foram coletadas para determinação da atividade enzimática e dos teores totais de C e N. Por ocasião da semeadura da soja em outubro/22, foi determinada a quantidade palha na superfície do solo. Em V3 e R1, foram coletadas raízes (0-10 cm) para observação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Em R5, coletou-se blocos de solo para a determinação do índice de qualidade estrutural do solo (IQE). Com a colheita, determinou-se a produtividade da soja. A SUB só foi eficiente em reduzir a RP até agosto/22. A intervenção mecânica proporcionou maior atividade enzimática. O consórcio de outubro/21 resultou em maior produção de fitomassa e quantidade de palha, mas isso não se refletiu nos teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo. Em contrapartida, a taxa de colonização inicial por FMA foi reduzida sob SUB22, não se diferenciando do PD em R1. Os maiores IQE foram observadas nos tratamentos PD/XS e SUB21/XS+CO. Com base no teste de comparação de médias, a produtividade da soja não apresentou diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos. No entanto, correlações positivas foram encontradas com o plantio direto e com a introdução de *Crotalaria ochroleuca* no sistema de produção. A diversificação de

culturas no sistema de produção é uma estratégia importante para melhorar a qualidade do solo em sistemas de produção baseados na sucessão de culturas. A intervenção mecânica possui eficiência de curta duração em Latossolos Vermelhos de textura muito argilosa, não sendo indicado para as condições do presente estudo.

Palavras-chave: resistência à penetração; soja; forrageiras; leguminosas; gramíneas.

ABSTRACT

The practice of intercropping species characterized by robust root systems and high biomass production with legumes presents itself as a viable alternative for enhancing root environment, thereby obviating the need for mechanical intervention. The objective of this study was to investigate the use of mechanical intervention use through subsoiling (SUB) and Xaraés grass (*Brachiaria brizantha* cv. Xaraés) (XS) intercropped with *Crotalaria ochroleuca* (CO) as a substitute for the cultivation of maize (MI) intercropped with *Brachiaria ruziziensis* (RU) under no-tillage (PD) in a Dystrophic Red Latosol (Oxisol) with very clayey texture. The experiment was carried out at São José farm, located in Rio Brilhante, MS. The experimental design was randomized blocks with four replications and seven treatments: SUB22/XS; SUB22/XS+CO; SUB22/MI+RU; PD/XS; PD/XS+CO; PD/MI+RU (control); e SUB21/XS+CO (SUB in February/21 and intercropping sowing in October/21). The mechanical intervention was executed in February/22 with depth of 25 cm, followed by the sowing of the crops. The soil penetration resistance (RP) was assessed from May to September/22, concurrently measuring the gravimetric moisture content. The dry matter biomass of the cultivated forage species was determined at various time intervals during their growth period. Soil samples (0-10 cm) were collected in August/22 for the purpose of determining enzymatic activity, as well as the total concentrations of carbon (C) and nitrogen (N). During the soybean development in October/22, the amount of straw on the soil surface was measured. At growth stages V3 and R1, root samples (0-10 cm depth) were collected to observe arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). At R5 stage, soil blocks were collected to determine the soil structural quality index (IQE). During the harvest, the soybean yield was measured. Subsoiling (SUB) was only effective in reducing soil penetration resistance (RP) until August/22. The mechanical intervention resulted in higher enzymatic activity. The October/21 intercropping resulted in higher biomass production and straw quantity, but this did not reflect in the soil carbon (C) and nitrogen (N) contents. On the other hand, the initial colonization rate by arbuscular mycorrhizal fungi (FMA) was reduced under SUB22, showing no significant difference compared to no-till (PD) at reproductive stage R1. The highest IQE values were observed in the PD/XS and SUB21/XS+CO treatments. The soybean yield did not display statistically significant differences among the treatments based on the mean comparison test. However, positive correlations were found with no-tillage and the

introduction of *Crotalaria ochroleuca* in the production system. Diversifying crops in the production system is an important strategy to enhance soil quality in crop succession-based production systems. The mechanical intervention has a short-lived efficiency in very clayey Dystrophic Red Latosol (Oxisol) and is not recommended for the conditions of the present study.

Keywords: penetration resistance; soybean; forage crops; legumes; grass.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Temperaturas médias e precipitações pluviométricas mensais durante a condução do experimento. Rio Brilhante, MS.....	42
Figura 2 – Raízes de plantas de soja (estágio reprodutivo R6) coletadas anteriormente a instalação do experimento.....	43
Figura 3 - Mistura de sementes de braquiária com crotalária (A) e semeadura do consórcio de verão (B). Rio Brilhante, MS.....	46
Figura 4 – Coleta de solo para o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES): abertura de trincheiras com mini retroescavadeira (A), desbaste da parede da trincheira (B), coleta do bloco de solo com pá de corte (C) e, armazenamento da amostra em vasilha plástica (D).....	54
Figura 5 – Resistência do solo à penetração (RP) em diferentes sistemas de produção sob subsolagem (SUB) e plantio direto (PD) obtida entre os meses de maio e setembro. Rio Brilhante, MS.....	58
Figura 6 – Matéria seca total da parte aérea das forrageiras sob subsolagem (SUB) e plantio direto (PD) por ocasião do manejo de corte dos tratamentos.....	60
Figura 7 – Estatura de plantas nos consórcios: capim-xaraés com crotalária ochroleuca (A) e milho com braquiária ruziziensis (B).....	61
Figura 8 – Matéria seca de restos culturais sobre a superfície do solo por ocasião da emergência (VE) da cultura da soja. Rio Brilhante, MS.....	62
Figura 9 – Índice de qualidade estrutural do solo (IQE) com base no Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) para a camada de 0-40 cm nos diferentes sistemas de produção empregados. Rio Brilhante, MS	69
Figura 10 – Aspecto visual da estrutura do solo na camada de 0-20 cm, 24 meses (A) e 12 meses (B) após a subsolagem (SUB). Rio Brilhante, MS	70
Figura 11 – Evidência de crescimento radicular em agregados grumosos por meio de bioporos (A) e em agregados com faces lisas (B)	70
Figura 12 – Produtividade de grãos da cultura da soja na safra 2022/23 nos tratamentos sob plantio direto ou intervenção mecânica. Rio Brilhante, MS	73
Figura 13 – Análise de componentes principais em função de subsolagem e plantio direto para as variáveis IQE: Índice de Qualidade Estrutural, FTM: Fitomassa, PSL: Palha no Solo, RP: Resistência do Solo à Penetração (maio e junho), FMA: Colonização Radicular por Fungos Micorrízicos Arbusculares (V3) e PROD: Produtividade de Grãos de Soja	75

Figura 14 - Dispersão dos tratamentos na primeira componente principal das variáveis sobre a produtividade da soja na safra 2022/2023	77
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química antes da instalação do experimento em fevereiro 2021. Rio Brilhante, MS.....	44
Tabela 2 – Caracterização granulométrica do solo por ocasião da instalação do experimento (fevereiro 2021), Rio Brilhante, MS.....	44
Tabela 3 – Sequência de culturas utilizadas no experimento	45
Tabela 4 – Atividade de β -Glicosidase (BETA), Arilsulfatase (SULFA), Carbono (C) e Nitrogênio (N) total na camada de 0-10 cm em diferentes cultivos sob plantio direto (PD) e subsolagem (SUB). Rio Brilhante, MS	63
Tabela 5 – Colonização radicular (%) por micorrizas arbusculares no período vegetativo (V3) e reprodutivo (R1) da cultura da soja, safra 2022/2023. Rio Brilhante, MS.....	66
Tabela 6 - Cargas das componentes principais com as percentagens de explicação da variação nas variáveis RP: Resistência do Solo à Penetração, FTM: Fitomassa, PSL: Palha no Solo, FMA: Colonização Radicular por Fungos Micorrízicos Arbusculares IQE: Índice de Qualidade Estrutural e PROD: Produtividade de Grãos de Soja.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de variância
BETA	β -Glicosidase
CO	Crotalária ochroleuca (<i>Crotalaria ochroleuca</i>)
DRES	Diagnóstico rápido da estrutura do solo
EC	Espessura da camada
ET	Espessura total da amostra
DMS	Diferença mínima significativa
FMA	Fungos micorrízicos arbusculares
FTM	Fitomassa
IQE	Índice de qualidade estrutural
MI	Milho
MOS	Matéria orgânica do solo
MSU	Massa de solo úmida
MSS	Massa de solo seca
MUB	Tampão Universal Modificado
PD	Plantio direto
PLS	Palha no solo
PNG	<i>p</i> -nitrofenil- β -D-glicosídeo
PNS	<i>p</i> -nitrofenil sulfato
PROD	Produtividade de grãos de soja
QEC	Qualidade estrutural da camada
RP	Resistência do solo à penetração
RU	Braquiária ruziziensis (<i>Brachiaria ruziziensis</i>)
SPD	Sistema de plantio direto
SUB	Subsolagem
SULFA	Arilsulfatase
THAM	tris-hidroximetil-aminometano
UG	Umidade gravimétrica
XS	Capim-xaraés (<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Xaraés)

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
μm	Micro
°C	Graus Celsius
C	Carbono
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
cm	Centímetros
g	Gramas
ha	Hectares
HCl	Ácido clorídrico
KOH	Hidróxido de potássio
kg	Quilogramas
L	Litros
M	Molaridade
MPa	Mega Pascal
mm	Milímetros
mL	Mililitros
N	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de sódio
nm	Nanômetro
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico
PD	Plantio direto
t	Toneladas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	27
2.1	Plantio direto (PD)	27
2.2	Monitoramento da qualidade do solo	28
2.3	Compactação e resistência do solo à penetração (RP)	29
2.4	Intervenção mecânica no manejo da compactação	32
2.5	Uso de gramíneas e leguminosas na melhoria da qualidade do solo	33
2.6	Relação entre matéria orgânica e qualidade do solo	35
2.7	Avaliação visual da estrutura do solo	37
2.8	Enzimas relacionadas com a qualidade do solo	38
2.8.1	β -Glicosidase (BETA).....	39
2.8.2	Arilsulfatase (SULFA).....	39
2.9	Fungos micorrízicos arbusculares (FMA)	40
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	42
3.1	Descrição do local e das características climáticas da região.....	42
3.2	Caracterização do solo e histórico do local.....	43
3.3	Tratamentos e delineamento experimental	44
3.4	Cultivo de verão (21/22)	46
3.5	Cultivo de outono-inverno 2022	47
3.6	Soja 22/23.....	48
3.7	Resistência do solo à penetração (RP) e umidade gravimétrica (UG)....	49
3.8	Coleta de solo	50
3.8.1	Atividade de arilsulfatase (SULFA)	50
3.8.2	Atividade de β -Glicosidase (BETA).....	51
3.8.3	Carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) total.....	52
3.9	Colonização por fungos micorrízicos arbusculares (FMA)	52
3.10	Qualidade da estrutura do solo.....	53
3.11	Análise Estatística.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	Resistência do solo à penetração.....	57
4.2	Produção de fitomassa acumulada	59

4.3	Palha no solo.....	61
4.4	Atividade enzimática, carbono (C) e nitrogênio (N) total.....	63
4.5	Taxa de colonização radicular por micorrizas arbusculares	65
4.6	Índice de qualidade da estrutural do solo	68
4.7	Produtividade de grãos de soja.....	72
4.8	Análise multivariada dos dados	74
5	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

O plantio direto é uma prática agrícola que tem como objetivo primordial a conservação da palhada das culturas em superfície, por meio da eliminação do revolvimento do solo. O emprego dessa prática tem sido associado ao sistema soja/milho, sendo amplamente utilizado nas regiões do Centro-Oeste e Sudeste do Brasil e representa o modelo de produção mais proeminente no país.

A ampla adesão à sucessão soja/milho baseia-se no fato de que o sistema agrega duas culturas de valor econômico: a soja, como cultura de verão, e o milho durante o outono-inverno. Embora o sistema soja/milho seja bastante lucrativo e tenha se mostrado eficiente em termos de produção, esse modelo de produção é característico de uma sucessão de culturas, o que contrapõe as premissas básicas da rotação de culturas, preconizada no sistema de plantio direto. O baixo aporte de palha e a desuniformidade de distribuição na cobertura do solo, aliados a fatores como o aumento da circulação de implementos cada vez maiores nas operações agrícolas, podem criar camadas compactadas, resultando na degradação da qualidade física do solo representada pela limitação de produtividade.

A intervenção mecânica tem sido adotada por agricultores com a finalidade de romper camadas de impedimento físico, a fim de reduzir a resistência do solo à penetração das raízes. Nesse sentido, equipamentos como subsoladores têm sido amplamente empregados devido ao menor nível de perturbação causado ao solo em comparação com os arados convencionais, podendo ser uma técnica para melhorar as condições do solo em casos específicos. Entretanto, é comum que o uso desses equipamentos seja realizado sem uma avaliação criteriosa das condições do solo, para verificar a real necessidade da operação, o que eleva os custos e pode resultar em compactações mais profundas no solo.

A semeadura de plantas que visam melhorar o ambiente radicular pode ser uma alternativa para reconstrução do perfil do solo. Essas plantas são escolhidas por sua capacidade de desenvolver um sistema radicular profundo e denso, o que promove o rompimento de camadas compactadas do solo e ajuda a melhorar sua aeração e drenagem. O uso de gramíneas forrageiras no sistema de produção tem ganhado força ao longo do tempo. Na maioria dos casos, realiza-se o consórcio de milho com a forrageira, visando obter rendimento com a cultura de grãos e aproveitar as características agrônômicas da forrageira. Por outro lado, a alta produção de

fitomassa dessas espécies promovem o acúmulo de resíduos em superfície, de forma a manter o equilíbrio entre a transformação e a degradação da matéria orgânica, contribuindo para a manutenção dos estoques de carbono do solo.

No entanto, o acúmulo de matéria orgânica não depende apenas da quantidade de resíduos aportados, mas também da qualidade do material incorporado. Para máxima eficiência de transformação dos resíduos vegetais em matéria orgânica, o sistema de produção precisa ser composto de culturas com alta produção de matéria seca e que incorporam nitrogênio (N) no sistema. Nesse sentido, a inclusão de leguminosas em consórcio com gramíneas emerge como uma alternativa viável para equilibrar a relação C/N do sistema e, simultaneamente, promover a produção de fitomassa. Espécies pertencentes ao gênero *Crotalaria* são consideradas como boas opções a serem utilizadas nesse contexto de consórcio, devido à sua capacidade de se associar a bactérias que fixam o N atmosférico. Essa habilidade permite a incorporação desse elemento no solo, tornando-o disponível para as gramíneas que estão em consórcio, resultando no aumento da produção de matéria seca. O objetivo do trabalho foi analisar a real necessidade de implementar intervenções mecânicas em área de plantio direto consolidado, a sua eficiência e o comportamento dos atributos do solo. Além disso, objetivou-se estudar os impactos da diversificação do sistema de produção com a introdução de gramíneas forrageiras em consórcio crotalária em comparação ao cultivo padrão de milho com braquiária em um Latossolo Vermelho Distroférrico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Plantio direto (PD)

O plantio direto (PD) emergiu como uma solução diante dos desafios e obstáculos enfrentados na agricultura convencional. A prática de semear sem a necessidade de preparo prévio do solo remonta aos primórdios da atividade agrícola. A invenção do arado, por sua vez, surgiu com a finalidade de facilitar o manejo do solo e melhorar as condições para o crescimento das plantas (CASSOL et al., 2007).

Com o progresso da agricultura, pesquisadores começaram a questionar as razões científicas que fundamentavam a necessidade de preparo do solo. No entanto, durante muito tempo, várias tentativas de implementar a semeadura sobre a palhada de culturas anteriores resultaram em fracassos (DERPSCH, 1998). A técnica de PD foi difundida a partir da década de 60, impulsionada pelo avanço científico em herbicidas e por ensaios de demonstração nos EUA e no Reino Unido. O desenvolvimento de máquinas e semeadoras adequadas ao sistema impulsionou sua expansão global, passando de 45 milhões para 111 milhões de hectares em 10 anos (DENARDIN et al., 2011).

No Brasil, a adoção do PD foi impulsionada pelas perdas de solo por erosão. A presença de cobertura morta em superfície foi reconhecida como uma forma de proteger o solo contra os danos causados pelas gotas de chuva, incentivando a adoção dessa prática (PASSOS; ALVARENGA; SANTOS, 2018). Assim, o PD se baseia no princípio de evitar a mobilização do solo e manter uma cobertura de palha como forma de proteção. No entanto, esse conceito não abrange a diversificação de espécies vegetais entre os ciclos produtivos, o que pode ser limitado para as condições brasileiras e a agricultura conservacionista (DENARDIN et al., 2012).

A expansão do PD no Brasil na década de 80 mudou a percepção dessa técnica, que passou a ser vista como um conjunto de princípios para a conservação da qualidade do solo. Isso levou ao surgimento de diversos termos relacionados ao sistema de produção de culturas, entre eles, o Sistema de Plantio Direto (SPD) (POSSAMAI et al., 2022). O SPD envolve a integração de diversas técnicas, com o intuito de minimizar o impacto ambiental e otimizar o potencial das culturas. Para isso, são necessárias três premissas fundamentais: ausência de revolvimento do solo,

diversificação de culturas (rotação de culturas) e uso de culturas que forneçam biomassa para formar a palhada (DERPSCH e FRIEDRICH, 2009).

No entanto, a rotação de culturas não tem sido adotada por boa parte das propriedades rurais. Atualmente, o sistema de produção predominante consiste na semeadura de soja na safra principal, seguida pelo cultivo de milho na safrinha, o que não se caracteriza como SPD, configurando-se apenas em uma sucessão de culturas em PD (PASSOS; ALVARENGA; SANTOS, 2018).

2.2 Monitoramento da qualidade do solo

A degradação do solo consiste na perda da capacidade produtiva ou de utilidade, em função da redução da qualidade e do poder de regulação do ambiente (LAL, 1997). A qualidade do solo é descrita como a capacidade do solo em realizar diversas funções essenciais para o ecossistema. Um solo saudável é eficiente em fornecer nutrientes para as plantas, armazenar e disponibilizar água para a absorção radicular, sequestrar C para a mitigação de gases de efeito estufa e regular os fluxos de MOS (FRANZLUEBBERS, 2012).

O solo sadio permite a exploração pela agricultura, mas mantém a produtividade biológica e a qualidade ambiental, bem como a saúde de vegetais e animais, incluindo os humanos (BÜNEMANN et al., 2018). A qualidade do solo, entretanto, pode decair rapidamente em função das alterações das características naturais, causadas pelo uso e manejo incorreto (OGUIKE e MBAGWU, 2009). Os indicadores de qualidade são ferramentas que permitem avaliar o estado atual do solo em função da sensibilidade às perturbações provocadas pelo sistema manejo (PHAM; NGUYEN e KAPPAS, 2018).

A definição dos valores que indicam a qualidade do solo é obtida através da relação com a produtividade à longo prazo e a qualidade do meio ambiente. A seleção de uma série de indicadores para tomar-se conhecimento da alteração de qualidade requer atenção na escolha do processo a ser utilizado como referência (KARLEN; EASH e UNGER, 1992). Os parâmetros mensurados envolvem as propriedades físicas, químicas e biológicas, baseando-se no princípio de que a qualidade do solo é determinada por processos que ocorrem em um sistema dinâmico e vivo (KARLEN; DITZLER e ANDREWS, 2003).

2.3 Compactação e resistência do solo à penetração (RP)

A compactação do solo é um fenômeno que se caracteriza pela deterioração física do solo, resultante do rearranjo da fase sólida do solo devido a alterações no tamanho dos poros e no volume de solo (Singer, 2006). Em outras palavras, a compactação é definida como o aumento da densidade do solo em função da redução da sua porosidade (ALAOUI et al., 2018). A condição de compactação reduz a taxa de infiltração de água, favorece o escoamento superficial em função da diminuição da porosidade do solo (OSMAN, 2014). Dessa forma, a compactação pode reduzir a aeração do solo de 13 a 36%, com potencial de interferir também na biomassa microbiana do solo (AKANMU et al., 2021; BEYLICH et al., 2010), devido à circulação de ar prejudicada no solo.

A compactação compromete a capacidade de penetração das raízes, reduzindo a profundidade de penetração e densidade radicular, o que leva a redução da absorção de água e nutrientes. Além disso, alguns estudos demonstram que a condição de solo compactado pode agravar doenças radiculares em algumas espécies de plantas (NAWAZ; BOURRIÉ e TROLARD, 2013) ocasionada justamente pelo comprometimento da absorção radicular.

Os reflexos da compactação podem ser notados em respostas fisiológicas das plantas como, mudanças no potencial hídrico (redução do potencial de água e de absorção), fechamento de estômatos e redução da condutância estomática, perda de eficiência fotossintética, aumento da produção de etileno e redução da divisão celular (GRZESIAK et al., 2013; SHAH et al., 2017). Dessa forma, os efeitos da compactação do solo são adversos e têm impacto significativo na produtividade agrícola e no funcionamento dos ecossistemas.

O processo de compactação do solo, seja ele direto ou indireto, é uma consequência das atividades humanas, especialmente quando há uso e manejo inadequado do solo, além do tráfego frequente de máquinas agrícolas (BADALÍKOVÁ, 2010). A perturbação causada pelos implementos pode deformar e mover o solo por meio de desarranjo de partículas. Quando o distúrbio é de caráter compressivo, a massa do solo é forçada contra si, levando ao aumento de densidade. Isso causa a redução de volume ou destruição de fissuras ou macroporos (SPOOR, 2006).

Estudos demonstram que máquinas agrícolas equipadas com rodados de maior largura e com pressão de calibração adequada têm a capacidade de minimizar o

impacto da compactação do solo. Isso ocorre devido à maior área de contato entre o pneu e o solo, permitindo uma distribuição mais uniforme da força de compressão exercida, o que reduz o potencial de compactação (HAMZA e ANDERSON, 2005).

A umidade do solo exerce uma influência significativa no processo de compactação, sendo uma das principais causas desse fenômeno no contexto agrícola. Quando máquinas circulam sobre o solo úmido, aumenta-se o risco de ocorrência de problemas de compactação, uma vez que o aumento da umidade resulta na redução dos espaços macroporosos, comprometendo a capacidade do solo em suportar a pressão gerada por equipamentos pesados (SHAH et al., 2017). Por outro lado, um solo seco demonstra menor suscetibilidade à compactação devido à sua resistência à deformação e à formação de uma matriz rígida decorrente das fortes ligações entre as partículas. À medida que a umidade do solo aumenta, as ligações entre as partículas enfraquecem, facilitando, assim, o processo de compactação (CANILLAS e SALOKHE, 2001; HILLEL, 2003).

Em um estudo realizado por Ahmadi e Ghaur (2015), foi investigado o efeito da umidade do solo e da quantidade de operações com trator na compactação do solo. Os resultados indicaram que a permeabilidade do solo diminui proporcionalmente ao aumento no número de passadas do trator e ao teor de água do solo. Esse efeito afeta negativamente a emergência de plântulas, resultando em uma redução na quantidade de plântulas à medida que a umidade do solo e o número de passadas aumentam.

Consequentemente, a tomada de decisão em relação ao momento adequado para a realização das operações mecanizadas constitui um dos principais desafios na prevenção desses problemas. A falta de conhecimento sobre a capacidade do solo de resistir à carga em determinada condição de umidade pode levar o solo a ser submetido a forças excessivas, resultando em compactação indesejada (DIAS-JUNIOR, 2000).

As alterações nas condições físicas do solo ocasionadas pelo processo de compactação do solo elevam a resistência do solo à penetração (RP). O impedimento do crescimento radicular gera plantas com raízes mais superficiais, interferindo na absorção de água e nutrientes, sobretudo em condições de escassez hídrica (NAWAZ, BOURRIÉ e TROLARD, 2013). Assim, a RP é uma excelente indicadora para a avaliação da compactação.

A RP é comumente mensurada por meio de leituras pontuais, através de penetrômetro. Os penetrômetros são equipamentos compostos por uma haste com

ponta cônica, a qual é inserida verticalmente no solo. A medição ocorre com a força aplicada ao cone enquanto penetra o solo em razão da sua área basal (MORAES et al., 2014). No entanto, alguns fatores devem ser observados durante o uso de penetrômetros, pois a capacidade de compressão do solo varia de acordo com características como textura, teor de MOS e potencial mátrico inicial (GAO et al., 2012). A RP geralmente aumenta com a densidade do solo e com o teor de argila e decai com o aumento da umidade e de MOS (KUANG et al., 2012).

Diversos estudos destacam a importância da faixa ideal de RP para o crescimento radicular das culturas. De modo geral, a literatura relata que valores acima de 2,0 Mpa têm demonstrado impacto negativo no desenvolvimento das raízes, e em determinadas circunstâncias, quando a RP ultrapassa os valores de 2,5 ou 2,8 MPa, o crescimento radicular é significativamente inibido (KUANG et al., 2012; WENDEL et al., 2022).

Em cana-de-açúcar, o crescimento radicular não é afetado até 0,75 Mpa, declinando significativamente entre 0,75 e 2,0 Mpa. O desenvolvimento é rigorosamente prejudicado quando a RP está acima de 2,0 Mpa (OTTO et al., 2011). Já em gramíneas, vários autores têm adotado um valor crítico de RP em torno de 2,5 Mpa (IMHOFF et al., 2000). Para a cultura do trigo, Martino e Shaykewich (1994) observaram crescimento radicular mesmo em solos com RP acima de 2,0 MPa, valor considerado crítico para essa cultura. Esse comportamento tem sido associado a uma adaptação no mecanismo de propagação das raízes no solo, direcionando-se para os espaços porosos disponíveis.

Além do impacto no crescimento radicular, é importante ressaltar que a alta RP também afeta negativamente a produtividade das culturas. Estudos têm demonstrado que valores elevados de RP estão associados a reduções significativas na produtividade das plantas (BEUTLER et al., 2006), devido à restrição no desenvolvimento e na absorção de nutrientes pelas raízes (OLUBANJO e YESSOUFOU, 2019).

Dessa forma, a maioria das literaturas consideram como resistência crítica, valores de RP entre 2,0 e 3,0 MPa e a umidade do solo está próxima à capacidade de campo (SÁ e SANTOS-JUNIOR, 2005). Essa faixa pode indicar um nível em que o crescimento radicular e a absorção de nutrientes pelas raízes são comprometidos, afetando negativamente a produtividade das culturas. Entretanto, é importante destacar que a RP não pode ser utilizada como único indicador para avaliar a

compactação do solo e, por consequência, prever possíveis quedas na produtividade. É fundamental combinar a utilização da RP com outros métodos de avaliação para obter uma compreensão mais abrangente da situação, uma vez que a RP não leva em consideração a presença de poros e canais pré-existentes em solos estruturados.

2.4 Intervenção mecânica no manejo da compactação

A compactação superficial tem se configurado em uma preocupação central na comunidade agrícola devido aos impactos negativos que causa nas raízes das plantas e, conseqüentemente, na produtividade. Diante dessa questão, muitos produtores rurais têm adotado a intervenção mecânica, como medida preventiva, visando evitar problemas associados ao sistema radicular (DEBIASI et al., 2013). Entre esses equipamentos, destaca-se a crescente utilização de escarificadores e subsoladores.

Os escarificadores e subsoladores são equipamentos capazes de romper camadas restritivas ao crescimento radicular. Uma das principais distinções entre esses dois equipamentos está relacionada à profundidade de trabalho que cada um é capaz de alcançar. Os escarificadores são projetados para trabalhar em profundidades de até 30 cm, enquanto a subsolagem é uma operação que permite atingir profundidades superiores a 30 cm (MARTUCCI, 1985). Embora esses equipamentos possuam uma estrutura similar, os subsoladores apresentam partes constituintes, como chassi, hastes e ponteiros, mais robustas devido à necessidade de suportar as maiores profundidades de trabalho (FURLANI e ZERBATO, 2020).

A intervenção mecânica, por meio de subsoladores e escarificadores tem se tornado mais frequente em lavouras onde o PD está consolidado. Essa tendência pode ser atribuída à característica desses equipamentos de não realizar o corte e revolvimento do solo, como observado nas operações de gradagem e aração, o que resulta em menor agressão à estrutura original da camada do solo (SPERA et al., 2018). Além disso, esses equipamentos permitem a manutenção de uma quantidade significativa de resíduos vegetais sobre a superfície do solo, contribuindo para a formação de uma cobertura adequada (RAPER, 2005).

O sucesso na descompactação do solo está diretamente relacionado à seleção adequada do equipamento, ao nível de resistência do solo e ao teor de água durante a operação. Para obter resultados eficientes, é importante que o solo esteja em um estado frágil, de modo que as ponteiros do equipamento sejam capazes de quebrar

as camadas compactadas durante a passagem, atuando ligeiramente abaixo da zona de compactação (BATEY, 2009).

Apesar da intervenção mecânica ser capaz de melhorar algumas propriedades físicas do solo, estudos têm demonstrado que outras características são negativamente afetadas. Por exemplo, Peixoto et al. (2020) constataram que essa prática de manejo reduziu significativamente a estabilidade dos agregados em 12% e o diâmetro médio em 10%, promovendo a redução de C orgânico em 4%. Além disso, diversas pesquisas têm evidenciado que os efeitos dos equipamentos de descompactação do solo são observados à curto prazo (PERALTA; ALVAREZ e TABOADA, 2021). Em muitos casos, esses efeitos assemelham-se aos obtidos pelo PD um ano após a operação de manejo, podendo até mesmo superar as condições encontradas em locais sem preparo do solo (BLANCO-CANQUI e WORTMANN, 2020).

Adicionalmente, as interferências constantes na estrutura do solo podem resultar em compactação em camadas mais profundas, principalmente quando aliadas ao aumento na massa das máquinas (BATEY, 2009). A compactação em profundidade é uma das principais causas da restrição de produtividade em pequenas propriedades agrícolas, podendo reduzir permanentemente a produtividade das culturas (ARVIDSSON e HAKANSSON, 1991).

Portanto, outras práticas agrícolas alternativas devem ser utilizadas como medidas preventivas à compactação. O tráfego controlado de máquinas, a calibração do nível de pressão dos pneus, a manutenção dos níveis de matéria orgânica do solo (MOS) e o uso de espécies com maior poder de penetração são exemplos de ações que podem ser empregadas para evitar ou reduzir a compactação (DIAS-JUNIOR, 2000).

2.5 Uso de gramíneas e leguminosas na melhoria da qualidade do solo

O uso de plantas com sistema radicular vigoroso e alta produção de biomassa é alternativa viável para amenizar os problemas de compactação e melhorar qualidade do solo. Cada espécie vegetal apresenta características distintas que desencadeiam ações específicas no solo, tornando-se uma opção para aprimorar a qualidade e o ambiente radicular das culturas em sucessão.

As gramíneas são plantas reconhecidas por possuírem um sistema radicular vigoroso e produção de matéria seca de forma rápida e contínua. O sistema radicular abundante dessas plantas serve de agente de ligação entre raízes e partículas de solo, colaborando na formação de agregados (GICHANGI et al., 2016), contribuindo para a melhoria da estrutura do solo.

Além disso, a expansão das raízes no solo produz canais que podem ser posteriormente explorados por culturas subsequentes (HAKANSSON e VOORHEES, 1997). Esses canais permanecem no solo mesmo após a morte das plantas de gramíneas, proporcionando vias de transporte para solutos, melhorando a movimentação de água e nutrientes no perfil do solo (GALDOS et al., 2020).

A produção de matéria seca é uma característica crucial para o êxito da cobertura do solo em sucessão. O acúmulo de resíduos vegetais desempenha um papel estratégico na proteção do solo contra a erosão, na redução da variação de temperatura e na conservação da umidade (HERNANI, 1999). Ranaivoson et al. (2017) observaram que a adição de $8,0 \text{ t ha}^{-1}$ de palha resulta em uma redução de 30% da evaporação de água do solo. Ainda de acordo com os autores, a adição de ao menos $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ de resíduos previne perdas de solo e garante máxima infiltração de água.

Outro aspecto relevante é a persistência dos resíduos vegetais como palhada, que está diretamente relacionada com a relação C/N da espécie vegetal. De maneira geral, as gramíneas apresentam uma relação C/N mais elevada do que outras espécies, como as leguminosas, o que resulta em uma maior permanência dos resíduos vegetais na superfície do solo (MENEZES et al., 2009).

As características mencionadas tornam as gramíneas uma opção interessante para o manejo e recuperação de solos compactados, promovendo a melhoria da qualidade e o desenvolvimento das culturas subsequentes (BLANCO-CANQUI e WORTMANN, 2020). No entanto, é importante considerar que essas plantas possuem uma alta demanda por N, e algumas espécies podem desequilibrar a relação C/N do sistema (BRANDAN et al., 2017). Nesse sentido, as leguminosas podem ser acrescentadas nos cultivos com a finalidade de incorporar N e melhorar a qualidade dos resíduos aportados.

Leguminosas, como as crotalárias, são capazes de manter relações C/N ótimas para a atividade dos microrganismos e a manutenção da qualidade do solo (KORNECKI e BALKCOM, 2020). A decomposição do material vegetal dessas plantas

contribui para o aumento do teor de N no sistema (BALKCOM e REEVES, 2005), devido à sua capacidade de associar-se com bactérias fixadoras de N. Isso estimula a biomassa microbiana do solo, especialmente a atividade das bactérias decompositoras (ZHAO et al., 2015). O potencial de fixação de N varia de acordo com a espécie, podendo fixar entre 100 e 300 kg ha⁻¹ de N atmosférico (MATUSSO; MUGEW e MUCHERU-MUNA, 2014).

Como resultado, a promoção da atividade microbiana pela qualidade do material fornecido pelas leguminosas pode levar ao aumento dos teores de MOS. Segundo Blanco-Canqui et al. (2011), a introdução de crotalárias no sistema de produção resulta em um aumento na concentração de MOS em uma profundidade de até 7,5 cm. Esse incremento é de 30% em comparação ao sistema sem essas leguminosas.

O consórcio de gramíneas e leguminosas, portanto, pode auxiliar na recuperação de solos degradados pelo monocultivo intensivo (BERDENI et al., 2021). O cultivo de mais de uma cultura intensifica a atividade radicular, impactando positivamente em propriedades importantes do solo. O efeito do consórcio pode aumentar, em alguns casos, a produtividade das culturas subsequentes, por meio da disponibilização de nutrientes (BEGAM et al., 2020).

2.6 Relação entre matéria orgânica e qualidade do solo

A MOS é um componente originado da diversidade de materiais vegetais e animais presentes no sistema (BOT e BENITES, 2005). É fundamental para o funcionamento correto do ecossistema por atuar nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (DICK et al., 2019). A MOS é tipicamente composta por 58% de C, servindo de fonte de energia para os microrganismos, o que resulta em maior atividade biológica do solo (FRANZLUEBBERS, 2012).

Por outro lado, a comunidade microbiana desempenha um papel fundamental na formação da MOS humificada, por meio de uma série de reações e processos no solo. Esses microrganismos são responsáveis pela decomposição dos resíduos vegetais, promovendo a regulação do processo de decomposição e o fluxo de nutrientes no solo (LEITE, 2004).

De fato, o processo de transformação da MOS envolve a interação complexa entre os resíduos vegetais e a comunidade microbiana. A lignina, um componente importante dos resíduos vegetais, é uma molécula complexa e resistente à

decomposição. No entanto, os microrganismos são capazes de atuar na degradação da lignina, transformando-a em substâncias húmicas, como os ácidos húmicos e fúlvicos, que são compostos mais estáveis e importantes para a formação da MOS humificada (VAZ, 2006).

Nesse contexto, a formação das substâncias húmicas depende inteiramente da comunidade microbiana presente no solo. Dentre os microrganismos decompositores, os fungos assumem um papel proeminente na decomposição da MOS na natureza (AISLABIE e DESLIPPE, 2013).

Entre as funções da MOS, destaca-se a sua capacidade de estabelecer interações com os minerais de argila, microrganismos e material estrutural das plantas, resultando na formação de microagregados estáveis (BALESDENT et al., 2000). Essa associação entre os diferentes componentes contribui para a proteção da MOS contra processos acelerados de biodegradação, bem como contribui para a melhoria de diferentes propriedades mecânicas do solo, sobretudo em solos de textura argilosa (CUNHA; MENDES e GIONGO, 2015; MUJDECI et al., 2017). Assim, a MOS atua na redução da susceptibilidade à compactação do solo por mecanismos de dissipação da energia aplicada contra ao solo pelo efeito amortecedor, pela redução da lubrificação de partículas minerais e pela redução da densidade da mistura entre partícula mineral e MOS (BRAIDA et al., 2007).

Em regiões tropicais, onde os solos geralmente possuem alto grau de intemperização e baixa fertilidade natural, a MOS desempenha um papel ainda mais significativo. Além de suas funções relacionadas à estrutura e à resistência à compactação, a MOS atua como uma reserva de nutrientes no solo. Isso ocorre devido à sua capacidade de troca de cátions, que permite a retenção e disponibilização de nutrientes essenciais para as plantas e à sua capacidade de absorver ânions (CORREIA e OLIVEIRA, 2000).

Preservar bons níveis de MOS nessas regiões não é fácil, uma vez que, as condições ambientais são favoráveis a decomposição dos resíduos orgânicos. A redução dos teores de MOS contribuem para a degradação do solo, uma vez que leva a perda da camada superficial pela ação da atividade erosiva (ROSCOE et al., 2006).

O baixo aporte de biomassa vegetal em sistemas de produção caracterizados como monocultura provoca a diminuição da estabilidade de agregados do solo, devido à baixa produção de agentes ligantes (BRAIDA et al., 2007). Isso leva a exposição e

degradação da MOS por ação microbiana, agravando-se ainda mais em solos sob manejo convencional (COSTA; SILVA e RIBEIRO, 2013).

Nesse sentido, é comum o decréscimo na produtividade em áreas de agricultura com sistemas menos conservacionistas, por conta da transformação da estrutura do solo e da diminuição da MOS (PULROLNIK, 2009) em consequência do balanço negativo entre perda e adição de C no solo ocasionado pelo preparo excessivo e manejo inadequado (BAYER, 1996). Medidas devem ser tomadas para atenuar a perda de C presente na MOS para a atmosfera. A exposição do C à oxidação aumenta a emissão de gás carbônico (CO₂), podendo amplificar os efeitos do efeito estufa pelo aumento da concentração desses gases (FAGERIA, BALIGAR e BAILEY, 2005).

2.7 Avaliação visual da estrutura do solo

O perfil do solo é composto por uma estrutura tridimensional originada da aglomeração de partículas minerais, material vegetal e MOS humificada, denominadas de agregados. O arranjo hierárquico dos agregados permite a criação de fluxos de água e nutrientes que são disponibilizados para plantas e demais organismos (WILPISZESKI et al., 2019), sendo fator determinante para a qualidade do solo.

A manipulação de agregados permite o diagnóstico da qualidade estrutural do solo. Alterações no tamanho e resistência dos agregados, bem como a facilidade de quebra e o formato dos fragmentos resultantes, são indicadores visuais importantes (GUIMARÃES; BALL e TORMENA, 2011). Agregados sob vegetação natural possuem diâmetros menores que 6,0 mm, sendo facilmente fragmentados durante o processo de quebra, com grande quantidade de poros e material radicular agregado. Em solos sob cultivo, os agregados exigem maior resistência no processo de fragmentação, com redução na quantidade de poros e na concentração de raízes (GIAROLA et al., 2010).

A avaliação visual estrutural pode ser utilizada como uma maneira rápida e menos onerosa para identificar restrições na produtividade das culturas (GUIMARÃES et al., 2017). Boas relações podem ser encontradas entre diagnósticos visuais de estrutura do solo e a avaliação de parâmetros físicos do solo em laboratório (MONCADA, 2014). Com isso, os métodos visuais de avaliação do solo são ferramentas eficazes para diagnosticar as alterações na estrutura do solo e podem ser usados em conjunto com

outras técnicas de avaliação. Essa abordagem combinada proporciona uma compreensão mais abrangente da qualidade estrutural do solo.

2.8 Enzimas relacionadas com a qualidade do solo

Enzimas são constituintes importantes para a regulação de diversos processos metabólicos intracelulares nos organismos. Em meio extracelulares, as enzimas são fundamentais em diversos processos que ocorrem no solo (MENDES et al., 2018).

Após a liberação do conteúdo celular, as enzimas são capazes de interagir com coloides orgânicos e inorgânicos, o que contribui para a proteção contra a degradação. Dessa maneira, as enzimas podem ser encontradas adsorvidas à superfície de minerais de argila ou substâncias húmicas, em polímeros que formam as substâncias húmicas e na solução do solo (BALOTA et al., 2013).

Enzimas são ferramentas importantes para avaliar a qualidade biológica do solo, uma vez que a maioria delas é produzida por microrganismos presentes no solo, estando intimamente relacionadas à população microbiana, a MOS e a quantidade total de C orgânico (BALOTA et al., 2004; NOGUEIRA e HUNGRIA, 2013).

Investigações científicas demonstram que do solo podem ser afetadas pelo tipo de manejo utilizado, permitindo identificar alterações em um curto período (1-2 anos). Isso possibilita uma compreensão eficiente dos efeitos das práticas de manejo sobre a atividade microbiana e, conseqüentemente, sobre a qualidade biológica do solo (BATISTA et al., 2018). De modo geral, a atividade de enzimas sob métodos conservacionistas tende a ser maior do que em áreas sob sistema de preparo convencional (LISBOA et al., 2012), devido às melhorias no ambiente proporcionadas por práticas conservacionistas, promovendo uma maior síntese microbiana (SALINAS; MECA e MORAL, 2020).

No entanto, é de suma importância identificar as enzimas que apresentam uma correlação mais significativa com as práticas conservacionistas e compreender sua relevância para a saúde do solo. Portanto, é necessário investigar quais enzimas são mais afetadas e beneficiadas por essas práticas, a fim de entender melhor os processos bioquímicos envolvidos e as conseqüências para a qualidade do solo.

As enzimas SULFA e BETA são, atualmente, os principais indicadores da qualidade biológica do solo, devido à alta relação existente entre sua atividade e a biologia do solo. Além disso, a análise desses bioindicadores está correlacionada com

outros aspectos microbiológicos, como biomassa microbiana, respiração basal, fosfatase ácida, celulase, entre outros (MENDES et al., 2021).

2.8.1 β -Glicosidase (BETA)

A β -Glicosidase (BETA) faz parte do grupo de enzimas que atuam na celulose, juntamente com as endoglucanases e exoglucanases, participando principalmente na hidrólise da celobiose em glicose (CASTRO e PEREIRA-JUNIOR, 2010). Primeiramente, a celulose sofre a ação das endoglucanases liberando pequenos fragmentos. Os produtos da ação das endoglucanases são hidrolisados por exoglucanases, gerando oligossacarídeos de celobiose. Os oligossacarídeos são hidrolisados pela BETA, gerando monômeros de glicose, os quais servem de fonte de energia para microrganismos (PURCENA, 2014).

Essas enzimas têm papel fundamental no ciclo do C, podendo ser encontrada em diversos organismos, como bactérias, fungos, plantas e animais (ALMEIDA; NAVES e MOTA, 2015). Com isso, sua atividade está estritamente ligada com práticas de manejo e alterações de pH (MAKOI e NDAKIDEMI, 2008).

A síntese de BETA, em sua maioria, é proveniente da ação de microrganismos. Métodos que propiciam ambientes equilibrados, favorecendo a população microbiana do solo, como a adição de material orgânico, acabam por beneficiar a atividade dessa enzima (PAZUTTI e CHAER, 2012). Dessa forma, BETA é uma importante enzima relacionada com a qualidade do solo (STOTT et al., 2010).

2.8.2 Arilsulfatase (SULFA)

A arilsulfatase (SULFA) são enzimas que desempenham um papel importante nos processos de transformação do enxofre no solo. Essas enzimas podem ser encontradas tanto na forma extracelular quanto em organismos vivos, incluindo plantas, animais e microrganismos. Sua presença e atividade podem ser utilizadas como indicadores da biomassa fúngica, uma vez que os ésteres de sulfato estão presentes na parede celular desses organismos (BATISTA et al., 2018; GARDNER e SENWO, 2019).

O resultado da atividade de SULFA gera compostos sulfatados disponíveis para a absorção radicular das plantas. Para isso, ésteres aromáticos de sulfato ($R-O-SO_3$)

são hidrolisados extracelularmente ou através da oxidação intracelular da MOS absorvida por microrganismos. Essas reações produzem esqueletos de C e energia, onde fenóis (R-OH) e subprodutos de enxofre (SO_4^{2-} ou $\text{SO}_4\text{-S}$) são liberados no solo (MAKOI e NDAKIDEMI, 2008).

A atividade de SULFA correlaciona-se positivamente com o aumento dos teores de C e N, estimulada principalmente pela microbiota. Os teores de MOS em superfície influenciam diretamente no comportamento da SULFA, dado que o principal substrato dessa enzima são os ésteres de sulfato (BONONI, 2016). Além disso, a formação de agregados pela MOS gera uma proteção física, contribuindo para a atividade de microrganismos (LOPES et al., 2013). Dessa forma, a atividade da SULFA decai proporcionalmente com a redução da MOS (LOPES, 2012). Por outro lado, tem sua atividade favorecida por sistemas conservacionistas, que regulam os teores de MOS.

A mudança pH do solo é outro parâmetro que interfere na atividade de SULFA. Chen et al. (2021) estudaram a atividade de enzimas em três sistemas de plantio. Os autores verificaram que a variação na atividade da SULFA em função do pH foi de 96,3% entre os sistemas de produção. O alto valor de pH encontrado em sistemas de produção conservacionistas proporciona maior atividade dessa enzima. Por outro lado, a atividade de SULFA é influenciada negativamente sob pH ácido.

2.9 Fungos micorrízicos arbusculares (FMA)

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) pertencem ao filo *Glomeromycota* e são considerados uma das espécies mais amplamente distribuídas na natureza. Esses fungos possuem grande capacidade de estabelecer relações simbióticas mutualísticas com as raízes das plantas (SCHÜLER; SCHWARZOTT e WALKER, 2001).

O termo "micorriza" foi inicialmente criado para descrever a associação peculiar entre as raízes e os fungos ectomicorrízicos. Ao longo do tempo, o nome para a simbiose micorrízica arbuscular passou por mudanças, chegando ao termo "micorriza vesículo-arbuscular". No entanto, o reconhecimento de que nem todos os fungos formam vesículas levou ao termo atualmente amplamente aceito "micorriza arbuscular" (KOIDE e MOSSE, 2004).

No processo de infecção por FMA, o esporo fúngico germina e forma um micélio curto. O reconhecimento do hospedeiro ocorre por meio de sinais químicos liberados

pelas raízes. Isso estimula o crescimento e a ramificação das hifas do fungo (BOUWMEESTER et al., 2007). A fase simbiótica se inicia com o desenvolvimento de uma hifa penetrante, que geralmente segue uma rota intracelular nas camadas externas das células da raiz. Em seguida, ocorre a infecção das células do córtex interno por hifas intercelulares ou intracelulares. As hifas intracelulares são circundadas por um compartimento extracelular limitado por uma invaginação da membrana plasmática da planta (BONFANTE e GENRE, 2008).

A associação simbiótica entre FMA e as plantas hospedeiras permite que os FMA forneçam um maior acesso a nutrientes e água presentes no solo, que não seriam diretamente alcançáveis pelas raízes das plantas. Em contrapartida, a planta aloca uma porção significativa, de aproximadamente 4% a 25%, dos produtos da fotossíntese gerados para as raízes micorrízicas (WIPF et al., 2019).

Esse tipo de associação micorrízica envolve vários fungos colonizando as raízes de uma planta e conectando múltiplas plantas através de redes fúngicas. Essas redes desempenham um papel crucial na troca de nutrientes e na interconectividade dos ecossistemas. Além disso, as redes micorrízicas permitem a transferência de C e nutrientes entre as plantas por meio das hifas fúngicas, o que pode afetar positivamente a nutrição e a proteção das plantas (HEIJDEN et al., 2015; HODGE e STORER, 2015).

Os FMA desempenham um papel importante na agregação do solo. A glomalina, produzida pelos FMA atua como uma cola mucilaginosa que contribui para a formação de agregados microscópicos. Além disso, a presença dos FMA no solo influencia os ciclos de C, e a glomalina pode representar uma proporção significativa do C total do solo (WILLIS; RODRIGUES e HARRIS, 2013). Por outro lado, os FMA são capazes de exercer uma influência direta nas comunidades bacterianas, por meio da deposição de produtos do micélio fúngico que servem como substratos para o crescimento bacteriano, bem como promover alterações tanto quantitativas quanto qualitativas na exsudação radicular que também são produtos para a manutenção bacteriana (RILLIG e MUMMEY, 2006). Sendo assim, os FMA estão diretamente relacionados com a saúde do solo e qualidade do ecossistema.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do local e das características climáticas da região

O experimento foi conduzido na Fazenda São José, localizada no município de Rio Brilhante, estado do Mato Grosso do Sul, sob coordenadas 21°41'38" S e 54°29'5" O e altitude média do local de 347 metros. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região se caracteriza como Cfa (clima subtropical mesotérmico úmido), com verão quente e inverno brando. A precipitação anual média varia entre 1.500 mm e 1.750 mm, sendo que os meses com maior precipitação pluviométrica ocorrem de novembro a março e mais secos de julho a agosto. A temperatura média é de 23 °C, com temperatura média do mês mais frio superior a 10 °C e do mês mais quente superior a 22 °C. As precipitações pluviométricas e temperaturas médias mensais durante a condução do experimento, compreendido pelo período de fevereiro de 2021 a fevereiro de 2023, estão apresentadas na Figura 1. Os dados foram obtidos pela plataforma Guia Clima da Embrapa Agropecuária Oeste (<https://clima.cpao.embrapa.br>), referente a estação climática mais próxima, localizada na Fundação Oacir Vidal, sob coordenadas 21°50'46" S e 54°32'18" O, município de Rio Brilhante, MS.

Figura 1 – Temperaturas médias e precipitações pluviométricas mensais durante a condução do experimento. Rio Brilhante, MS

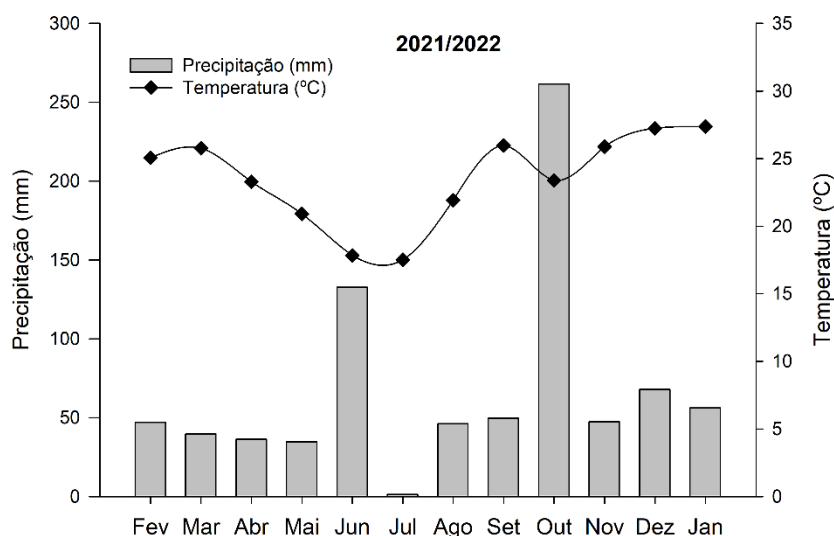
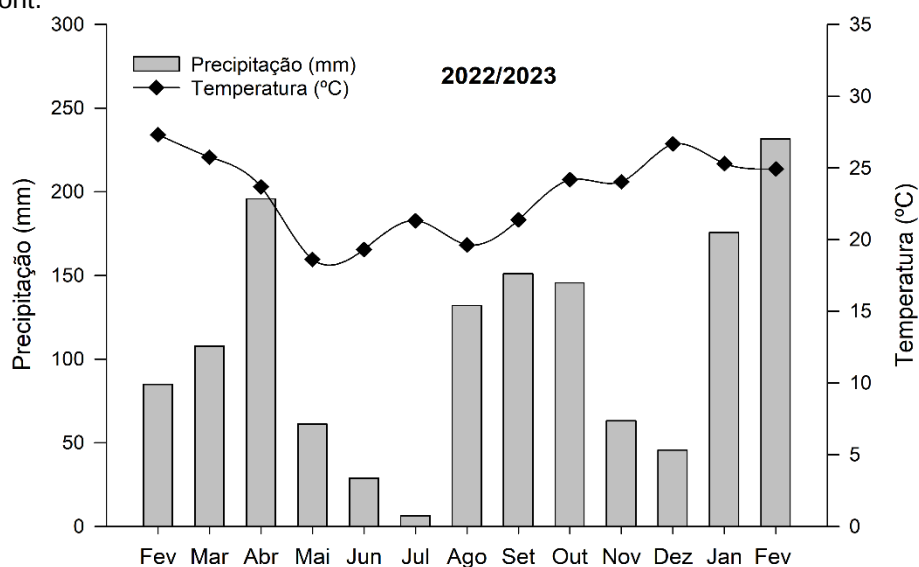


Figura 1, Cont.



3.2 Caracterização do solo e histórico do local

O sistema de produção da propriedade era característico de sucessão de culturas, compreendido pela cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merril.) no período de safra e o milho (*Zea mays* L.) de safrinha sob PD. A área vinha apresentando sintomas característicos de uma camada com impedimento radicular observados pela curvatura e engrossamento da parte superficial das raízes da cultura da soja durante o crescimento (Figura 2).

Figura 2 – Raízes de plantas de soja (estágio reprodutivo R6) coletadas anteriormente a instalação do experimento



Em fevereiro de 2021, por ocasião da demarcação do experimento, procedeu-se a caracterização química do solo de acordo com Raij et al. (2001). Para isso, coletaram-se amostras aleatórias nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, conforme a Tabela 1. Para essas mesmas amostras, uma fração foi separada para a determinação da granulometria, conforme Teixeira et al. (2017).

Tabela 1 – Caracterização química antes da instalação do experimento em fevereiro 2021. Rio Brilhante, MS

Camada (cm)	pH CaCl ₂	P (Mehlich) mg d ⁻³	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	CTC	V
-----cmol _c dm ⁻³ -----										
0-10	5,6	13,5	0,0	1,9	1,2	7,9	2,2	11,3	13,3	85
10-20	5,6	10,0	0,0	3,7	0,7	6,2	1,9	8,8	12,6	70
20-40	5,6	8,4	0,0	3,3	0,6	6,5	2,0	9,1	12,5	73

Tabela 2 – Caracterização granulométrica do solo por ocasião da instalação do experimento (fevereiro 2021), Rio Brilhante, MS

Camada (cm)	Areia	Silte	Argila
-----g kg ⁻¹ -----			
0-10	160,43	118,93	720,64
10-20	144,77	102,26	753,97
20-40	127,10	102,26	770,64

O solo apresentou valores superiores a 70% de argila entre as camadas (Tabela 2), classificando-se como Latossolo Vermelho Distroférico de textura muito argilosa (SANTOS et al., 2018).

3.3 Tratamentos e delineamento experimental

As espécies utilizadas para o cultivo de outono-inverno foram capim-xaraés (*Brachiaria brizantha* cv. Xaraés), crotalaria ochroleuca (*Crotalaria ochroleuca*), milho e braquiária ruziziensis (*Brachiaria ruziziensis*). Cada unidade experimental foi dimensionada em 25 m de largura por 20 metros de comprimento, separados por um corredor de 10 m para facilitar o acesso durante as avaliações. O delineamento experimental consistiu-se em blocos casualizados, com quatro repetições e sete

tratamentos. Os tratamentos foram compostos por milho consorciado com ruziziensis (MI+RU), capim-xaraés (XS) e capim-xaraés consorciado com crotalária ochroleuca (XS+CO), sob subsolagem (SUB) ou plantio direto (PD), além de XS+CO semeado no verão de 2021. A braquiária ruziziensis foi selecionada para o consórcio com o milho por constituir o sistema de produção padrão da propriedade, enquanto o capim-xaraés foi escolhido por ser uma gramínea com alto aporte de biomassa. A soja foi a cultura de verão nos demais tratamentos em 2021 e para todos os tratamentos em 2022, semeada em sucessão as culturas de outono-inverno. A disposição dos tratamentos está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Sequência de culturas utilizadas no experimento

ID ⁽¹⁾	Safr 20/21	Outono/ Inverno 21	Safr 21/22	Outono/ Inverno 22	Safr 22/23
SUB21/ XS+CO	Soja	SUB/Pousio	-----XS+CO-----		Soja
SUB22/MI+RU	Soja	SUB/Pousio	Soja	SUB/MI+RU	Soja
SUB22/XS	Soja	Pousio	Soja	SUB/XS	Soja
SUB22/ XS+CO	Soja	Pousio	Soja	SUB/XS+CO	Soja
PD/XS	Soja	Pousio	Soja	PD/XS	Soja
PD/XS+CO	Soja	Pousio	Soja	PD/XS+CO	Soja
PD/MI+RU	Soja	Pousio	Soja	PD/MI+RU	Soja

¹SUB: subsolagem; PD: plantio direto; MI: milho; RU: braquiária ruziziensis; XS: capim-xaraés; CO: crotalária ochroleuca.

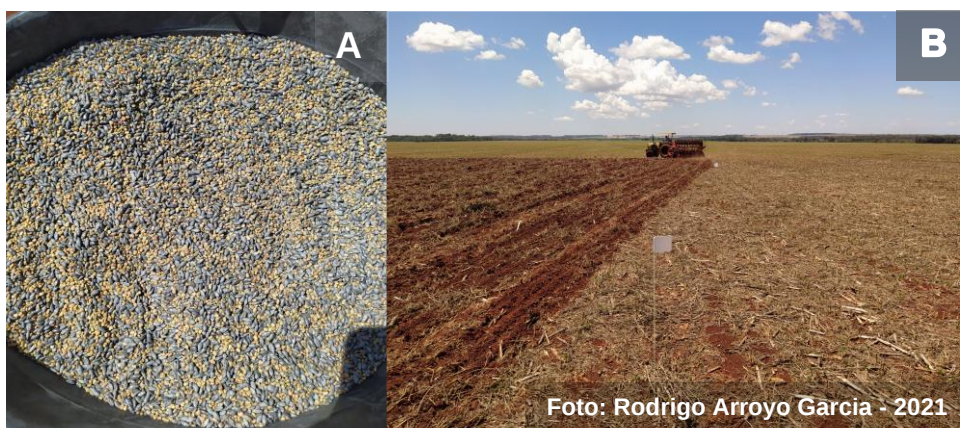
A subsolagem foi realizada antes da semeadura das culturas, por meio de subsolador disponível na propriedade, marca STARA, modelo Asa Laser com 7 hastes, potência requerida de 140 cv e capacidade de profundidade de até 62 cm, sendo tracionado por um trator Valmet modelo 1280 R . Antes da subsolagem, diagnosticou-se por meio da análise visual com o método de Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (RALISCH et al., 2017) que a profundidade da camada com impedimento era de aproximadamente 20 cm. Assim, a regulagem do equipamento foi realizada, a fim de que a profundidade de trabalho atingisse 25 cm. Utilizou-se trator disponível na propriedade para tracionar o subsolador, sendo acoplado ao

sistema hidráulico de três pontos do trator. Em fevereiro de 2021, realizou-se o primeiro manejo mecânico do solo, em apenas dois tratamentos (Tabela 3). A área permaneceu em pousio devido aos baixos índices pluviométricos entre fevereiro e maio de 2021 e a ocorrência de geadas (Figura 1) impossibilitando o estabelecimento de qualquer cultura semeada na época. A subsolagem dos tratamentos SUB22/XS e SUB22/XS+CO foi realizada em fevereiro de 2022, juntamente com SUB22/MI+RU que recebeu uma nova operação, utilizando as mesmas calibragens que no ano anterior. A realização da subsolagem antes do início da safrinha objetivou evitar um rápido rearranjo da estrutura, voltando ao seu estado original, diferentemente do que acontece quando o preparo de solo ocorre antes da semeadura da soja, devido ao intenso tráfego de máquinas durante a safra. O crescimento das forrageiras e a ausência de operações de aplicação de produtos fitossanitários no cultivo das plantas de cobertura permite maior tempo para a recomposição do solo após a perturbação mecânica.

3.4 Cultivo de verão (21/22)

Em outubro de 2021, semeou-se a crotalária consorciada com o capim-xaraés (SUB21/XS+CO) nas parcelas subsoladas. O espaçamento de semeadura do consórcio foi de 20 cm entre linhas, misturando-se as sementes na caixa da semeadora, modelo SHM1517 (Figura 3). Utilizou-se 3 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis para o capim-xaraés e 4 kg ha⁻¹ para a crotalária.

Figura 3 - Mistura de sementes de braquiária com crotalária (A) e semeadura do consórcio de verão (B). Rio Brilhante, MS



A soja foi semeada nos demais tratamentos, seguindo-se o padrão da propriedade. Entre os meses de novembro de 2021 e janeiro de 2022 ocorreu longos períodos de escassez hídrica, afetando o desenvolvimento da cultura. A colheita foi realizada em fevereiro de 2022, coletando-se 3 linhas centrais de 4 metros de comprimento. As amostras foram trilhadas e o teor de água dos grãos foi aferido com medidor de bancada GEHAKA modelo G1000, com posterior correção de umidade para 13%. A produção média da soja pelo sistema de produção da propriedade sob PD foi de aproximadamente 2680 kg ha⁻¹ e 2377 kg ha⁻¹ para as parcelas subsoladas em fevereiro de 2021.

3.5 Cultivo de outono-inverno 2022

A semeadura das plantas de cobertura no período de outono-inverno ocorreu no dia 01 de março de 2022. Utilizou-se o mesmo conjunto semeadora/trator de 2021 para a operação de 2022. O espaçamento de semeadura foi de 20 cm entre linhas, utilizando-se 5 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis para o capim-xaraés solteiro e 3 kg ha⁻¹ de sementes de capim-xaraés com 4 kg ha⁻¹ de sementes de crotalária para o consórcio, utilizando-se a mistura das sementes e sem adição de fertilizantes.

A semeadura do consórcio MI+RU ocorreu no dia 20 de fevereiro de 2022, utilizando-se o trator e a semeadora da propriedade. O espaçamento de semeadura foi de 50 cm entre plantas. O híbrido foi Morgan MG593 PWU com tratamento de sementes padrão da propriedade e adubação de semeadura 130 kg ha⁻¹ de ureia. A braquiária com 5 kg ha⁻¹ de sementes puras e viáveis, utilizando-se 3ª caixa. O manejo fitossanitário foi realizado de acordo com as recomendações técnicas para a região em questão, aliado ao padrão do produtor.

Em função do grande acúmulo de matéria seca dos cultivos e com a finalidade de estimular o rebrote e o enraizamento das gramíneas forrageiras, realizou-se o manejo de corte das forrageiras com Tritton. Esse procedimento impede a conclusão do ciclo da crotalária, o que evita a dispersão de sementes na área e, ao mesmo tempo, permite a incorporação do material vegetal, em função da rápida decomposição da leguminosa. A operação ocorreu com auxílio de roçadeira Tritton Jan modelo 2.300 acoplada ao trator Massey Ferguson modelo 290. A altura de trabalho do equipamento ocorreu de modo que as forrageiras permanecessem com 30 cm de altura. As operações foram realizadas em duas épocas: 10 de março e 18 de maio de 2022. O

primeiro manejo ocorreu apenas no consórcio de verão (SUB21/XS+CO), enquanto o segundo nos tratamentos que não havia milho. No dia 12 de agosto de 2022 foi utilizado um implemento rolo-faca, cuja finalidade foi realizar a manutenção das plantas de cobertura e uniformidade da palhada. Esse manejo foi realizado em todos os tratamentos.

Nos dias do manejo de corte com Tritton e rolo-faca, procedeu-se a coleta de fitomassa da crotalária e das braquiárias para determinação da matéria seca. Para isso, um quadro de aço com dimensões de 50 x 50 cm foi utilizado, arremessando-o duas vezes de forma aleatória. As plantas contidas dentro da área do quadro foram cortadas paralelamente a superfície do solo e armazenadas em sacos plásticos. A primeira coleta (10 de março) foi realizada apenas no tratamento SUB21/XS+CO, separando-se as plantas de crotalária da parte aérea da braquiária. Para a segunda (18 de maio), coletou-se o capim-xaraés proveniente do rebrote do consórcio de verão (SUB21/XS+CO) e das parcelas que não continham milho. A terceira avaliação (12 de agosto) compreendeu a coleta dos tratamentos que continham milho, o segundo rebrote do tratamento SUB21/XS+CO e primeiro rebrote dos demais tratamentos.

As amostras foram transferidas para sacos de papel e submetidas a estufa de circulação forçada por 48 horas a 60 °C. A massa seca (g) foi aferida em balança de precisão. Os dados foram convertidos em kg ha⁻¹, realizando-se a somatória de todas as épocas.

3.6 Soja 22/23

A semeadura da soja foi realizada no dia 04 de outubro de 2022, em todos os tratamentos. A cultivar utilizado foi BMX Fibra IPRO, espaçamento entre linhas de 50 cm e adubação de semeadura padrão da propriedade.

No estágio fenológico Ve - emergência (FEHR e CAVINESS, 1977), coletaram-se os resíduos vegetais em superfície remanescentes das culturas anteriores para determinação da matéria seca. Um quadro de aço com dimensões de 50 x 50 cm foi arremessado de forma aleatória, duas vezes dentro da área útil das parcelas. Para cada vez, foi recolhido todo o material vegetal presente na área do quadro e armazenado em sacos plásticos. As amostras foram submetidas a estufa de circulação forçada por 48 horas a 60 °C e a massa seca foi aferida em balança de precisão, convertendo os dados em kg ha⁻¹.

A colheita foi realizada em meados de fevereiro de 2023, através da amostragem de 3 linhas centrais com 4 metros de comprimento. As amostras foram trilhadas com auxílio da colhedora de parcelas Wintersteiger Classic Plus e a umidade dos grãos foi aferida com medidor de bancada GEHAKA modelo G1000, com posterior correção de umidade para 13%.

3.7 Resistência do solo à penetração (RP) e umidade gravimétrica (UG)

A análise RP ocorreu em 4 épocas entre o desenvolvimento vegetativo das forrageiras até o período de pré-semeadura da soja. As avaliações seguiram de acordo com as épocas em que a umidade do solo estava próxima a capacidade de campo. A primeira avaliação foi realizada no dia 05 de maio de 2022, 48 horas após uma chuva de 20 mm. A segunda leitura ocorreu no dia 21 de junho de 2022, 75 horas após uma chuva de 22,4 mm. A terceira leitura foi realizada no dia 23 de agosto de 2022, 100 horas após uma precipitação de 80 mm. A quarta e última avaliação aconteceu no dia 26 de setembro de 2022, 70 horas após uma chuva de 57 mm.

Em cada unidade experimental, realizou-se a leitura em quatro pontos aleatórios para as forrageiras, formando-se uma amostra composta. Para o milho, foram realizadas duas leituras na linha de semeadura e duas na entrelinha. Utilizou-se o penetrômetro Falker, modelo PenetroLOG PLG2040 para as leituras. O tipo de cone utilizado foi o padrão, Tipo 2, com 12,83 mm de diâmetro e capacidade máxima de 7,70 MPa. Durante as leituras, a base refletora do penetrômetro foi posicionada de forma mais paralela possível à superfície do solo, de modo que não houvesse interferência na identificação da profundidade atingida pela haste de penetração, uma vez que o equipamento identifica a profundidade de penetração da haste por meio da distância entre a base refletora e o sensor do equipamento. Posicionou-se a haste de metal do penetrômetro ao centro da base refletora até o sinal sonoro do equipamento, iniciando-se o processo de leitura. O procedimento consistiu em aplicar uma força no equipamento, com velocidade constante, para que a haste pudesse atingir a máxima profundidade de penetração. O processo de cada leitura se encerrou com o sinal sonoro do próprio penetrômetro.

Por ocasião das leituras de RP, determinou-se a umidade gravimétrica (UG) de acordo com Viana, Teixeira e Donagemma (2017). As amostras foram coletadas com auxílio de trado holandês nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm, sendo

4 subamostras por tratamento, formando-se uma amostra composta. O solo coletado foi armazenado dentro de sacos plásticos e, posteriormente, acondicionado em caixa térmica para evitar a perda de umidade no transporte. Aferiu-se a massa de latas cilíndricas em balança de precisão e uma alíquota de aproximadamente 100 gramas foi adicionada ao recipiente. A massa do recipiente + solo úmido foi aferida novamente e as amostras foram submetidas à estufa de circulação forçada por ao menos 24 horas a 107 °C. Posteriormente, aferiu-se a massa de solo seca + recipiente e a umidade foi calculada conforme a equação: $UG (g\ kg^{-1}) = [(MSU-MSS)/MSS]*1000$, em que MSU corresponde a massa de solo úmida e MSS a massa de solo seca.

3.8 Coleta de solo

A amostragem de solo na camada de 0-10 cm foi realizada no dia 23 de agosto de 2022 para a determinação da atividade enzimática, C e N total, logo após a colheita da cultura do milho. Para isso, foram retiradas 12 subamostras por repetição, conforme Mendes et al. (2021). Para os tratamentos com braquiária, amostrou-se 2 pontos próximos as plantas de braquiária e 2 entre plantas com 3 repetições. Para o milho consorciado, coletou-se uma subamostra próxima a planta de milho, uma subamostra próxima a braquiária e 2 subamostras na entrelinha.

As amostras foram secas ao ar e a sombra no laboratório e, em seguida, trituradas e peneiradas com malha de 2,0 mm.

3.8.1 Atividade de arilsulfatase (SULFA)

A determinação da SULFA foi realizada em triplicata, adicionando-se 1,0 g de solo em um Erlenmeyer com capacidade de 50 mL para cada repetição, além do branco. Determinou-se a atividade de SULFA de acordo com a metodologia proposta por Tabatabai e Bremner (1970) e Dick et al. (1996), retirando-se a adição de tolueno na inibição da atividade microbiana, conforme a adaptação proposta por Verchot e Borelli (2005).

O método se baseou na determinação de *p*-nitrofenol liberado pela sulfatase no solo no processo de incubação com solução tampão à base de *p*-nitrofenol sulfato. Para isso, foram adicionados 4,0 mL de solução tampão de acetato de sódio (0,5 mol L⁻¹) a pH 5,8 em todos os frascos, agitando-se levemente. Em seguida, adicionou-se 1,0 mL de *p*-nitrofenil sulfato 0,05M (PNS) apenas para as repetições, excluindo-se o

branco. Os frascos foram tampados, de modo a evitar a evaporação. A solução foi agitada levemente de forma manual e incubada por uma hora a 37 °C.

Posteriormente, adicionou-se 1,0 mL de CaCl₂ 0,5M e 4,0 mL de NaOH 0,5M em todos os frascos. O branco recebeu 1 mL de PNS, agitando-se levemente. A preparação foi filtrada em papel filtro Whatman n. 2 e quantificada pela colorimetria, utilizando-se espectrofotômetro (410 nm) pela identificação da presença de *p*-nitrofenol no filtrado.

O conteúdo de *p*-nitrofenol foi determinado com a realização da curva de calibração. A obtenção da curva ocorreu por meio da leitura de padrões de 0, 25, 50, 100 e 150 µg de *p*-nitrofenol. Para isso, diluiu-se 5,0 mL da solução padrão (solução estoque) de *p*-nitrofenol em 100 mL de água destilada em um balão volumétrico. Alíquotas de 0; 0,5; 1,0; 2,0 e 3,0 mL da solução padrão diluída foram pipetadas em Erlenmeyers de 50 mL. O volume foi completado com água de maneira que o preparado atingisse 5,0 mL. Posteriormente, adicionou-se 1,0 mL de CaCl₂ e 4,0 mL de NaOH, realizando-se a filtração em papel filtro. O filtrado foi levado ao espectrofotômetro para a leitura e a atividade de SULFA foi expressa em µg *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹.

3.8.2 Atividade de β-Glicosidase (BETA)

A quantificação da atividade da BETA foi realizada de acordo com Eivazi e Tabatabai (1988), com a adaptação de Verchot e Borelli (2005). Utilizou-se *p*-nitrofenil-β-D-glicosídeo 0,05M (PNG) como substrato para a determinação da atividade de BETA.

Os Erlenmeyers contendo o solo receberam 4,0 mL de uma solução tampão universal modificado pH 6,0 (MUB) em todos os frascos. Posteriormente, adicionou-se 1,0 mL de solução de PNG, exceto para o branco. Os frascos foram tampados para evitar a evaporação. A solução foi agitada manualmente por alguns segundos e incubada por uma hora a 37 °C. Após esse período, foram adicionados 1,0 mL de CaCl₂ a 0,5 M e 4,0 mL da solução de tris hidroximetil aminometano a pH 12 (THAM 0,1M), seguido de agitação. Os frascos contendo branco receberam 1,0 mL de PNG. A preparação foi filtrada em papel filtro Whatman n. 2 e quantificada pela colorimetria, utilizando-se espectrofotômetro (420 nm), identificando o *p*-nitrofenol liberado.

O conteúdo de *p*-nitrofenol foi determinado através da curva de calibração. Para a obtenção da curva, realizou-se a leitura de padrões de 0, 25, 50, 100 e 150 µg de *p*-nitrofenol. Para isso, diluiu-se 5,0 mL da solução padrão (solução estoque) de *p*-nitrofenol em 100 mL de água destilada em um balão volumétrico. Alíquotas de 0; 0,5; 1,0; 2,0 e 3,0 mL da solução padrão diluída foram pipetadas em Erlenmeyers de 50 mL. Completou-se o volume com água até o preparado atingir 5,0 mL. Adicionou-se 1,0 mL de CaCl₂ e 4,0 mL de THAM (0,1M), seguido de filtração. A atividade de BETA foi expressa em µg *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹.

3.8.3 Carbono orgânico (C) e nitrogênio (N) total

Para a determinação das frações de C e N foi utilizado um analisador via combustão seca Elementar CHNS vario Cube. Uma fração das amostras de solo foi separada e, em seguida, macerada utilizando grau e pistilo. Para cada amostra foi preparada uma cápsula utilizando papel de estanho 37 x 37 mm Elementar Microanalysis D1116 que serviu como recipiente para o solo macerado.

Uma cápsula por vez foi colocada em uma balança de precisão com capela Mettler Toledo modelo NewClassic MS, aplicando-se a tara. Uma porção de solo contendo aproximadamente 100 mg foi colocado cuidadosamente na cápsula com auxílio de uma espátula de aço com colher de diâmetro de 3 mm. Fechou-se a capela protetora da balança, até que a massa de solo se estabilizasse e, com isso, pressionou-se o botão de registro. A balança estava conectada diretamente a interface do programa do analisador, permitindo o registro da massa da amostra. As cápsulas foram fechadas manualmente e colocadas de forma ordenada no “carrossel” do analisador. Por fim, iniciou-se o processo de análise dos elementos pelo equipamento, salvando os dados de forma automática pelo computador.

3.9 Colonização por fungos micorrízicos arbusculares (FMA)

A avaliação da colonização de raízes de soja por micorrizas arbusculares ocorreu nos dias 03 de novembro, com a soja em V3 e 15 de dezembro de 2022, em estágio fenológico R1 (florescimento). Para isso, foram amostrados 3 pontos aleatórios em cada unidade experimental. Mini trincheiras foram abertas com auxílio de enxada e a coleta consistiu na retirada de um bloco de solo contendo plantas de soja, com

aproximadamente 5 cm na linha de semeadura e profundidade de 10 cm. As amostras foram levadas ao laboratório, prosseguindo-se da separação das raízes agregadas ao solo e lavagem em água corrente. Em seguida, selecionou-se as raízes laterais mais finas para a avaliação, colocando-se em tubos de ensaio com álcool 50% até o momento da preparação.

A descoloração das raízes ocorreu de acordo com o método proposto por Brundrett et al. (1996), através do clareamento com KOH em banho-maria e tratamento com HCl, com adaptações através de testes realizados em subamostras em função do tipo de raiz e estágio da cultura, com finalidade de preservação das estruturas vegetais e fúngicas. Para isso, retirou-se o álcool adicionado anteriormente e acrescentou-se a solução de KOH 5% até completar o volume do tubo de ensaio. As amostras foram submetidas a banho-maria a 90 °C por 30 min. As raízes foram lavadas em água corrente utilizando-se peneira comum e, em seguidas, submergidas em HCl a 2% por uma hora. Posteriormente, o ácido foi descartado sem lavar as raízes, adicionou-se corante Trypon Blue 0,05% aos tubos e as amostras foram submetidas novamente a banho-maria por 40 min a 60°C. As raízes coletadas no estágio reprodutivo permaneceram apenas 30 minutos em HCl.

A determinação da taxa de colonização micorrízica foi realizada com auxílio de microscópio estereoscópio (lupa) com aumento mínimo de 40x, utilizando o método da intercessão de linhas cruzas, conforme Giovannetti e Mosse (1980). Para isso, as raízes foram dispostas em uma placa de Petri com 8,5 cm de diâmetro contendo papel quadriculado 0,5 x 0,5 cm. Observou-se 100 intersecções de raízes com a linha horizontal do *grid*, anotando a presença ou ausência de colonização micorrízica (hifas extra e intraradiculares, vesículas e arbúsculos) do segmento de raiz em contato com a linha do *grid*. A taxa de colonização radicular foi obtida pela equação: taxa de colonização micorrízica (%) = [pontos com raízes colonizadas / (pontos com raízes colonizadas + pontos com raízes não colonizadas)] * 100 (PAULA, 2016).

3.10 Qualidade da estrutura do solo

O índice de qualidade da estrutura do solo foi obtido com base no Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), conforme Ralisch et al. (2017). No dia 17 de janeiro de 2023, com a soja em R5 (FEHR e CAVINESS, 1977), trincheiras foram escavadas para avaliar a qualidade da estrutura do solo. Utilizou-se uma mini

escavadeira Yanmar SV08, abrindo as trincheiras de forma paralela à linha de semeadura (Figura 4A). A profundidade da trincheira foi de aproximadamente de 80 cm, sendo uma por unidade experimental.

Figura 4 – Coleta de solo para o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES): abertura de trincheiras com mini retroescavadeira (A), desbaste da parede da trincheira (B), coleta do bloco de solo com pá de corte (C) e, armazenamento da amostra em vasilha plástica (D)



Para isso, a parede da trincheira foi desbastada com enxadão (Figura 4B) e uma fatia do solo foi coletada com auxílio de pá de corte (Figura 4C), observando para que não houvesse deformação da amostra. A profundidade amostral foi de 0-20 e 20-40 cm. O bloco de solo foi diretamente colocado em vasilhas plásticas de 5 litros, com dimensões externas de 28 cm de comprimento x 21,8 cm largura x 10,3 cm de altura

(Figura 4D). As vasilhas foram devidamente vedadas e levadas para câmara fria com temperatura regulada para -3 °C até o momento da avaliação.

As amostras foram colocadas em bandeja de 30 cm de largura e 50 cm de comprimento, cuidando-se para que a deposição da amostra fosse de tal forma que a largura da bandeja coincidissem com o comprimento da amostra. O bloco foi fragmentado com as mãos, no sentido do centro para as laterais da bandeja (sentido horizontal), aplicando-se força para a identificação de pontos com superfícies mais frágeis, com intuito de romper ou fragmentar os agregados. A fragmentação ocorreu somente até o ponto em que a força utilizada para obter a quebra dos agregados fosse maior do que a utilizada no início do processo de fragmentação e o rompimento nas bordas dos agregados. Com isso, realizou-se a identificação e delimitação de camadas, através da observação de tamanho, grumosidade, coesão entre agregados, presença de solo fina e orientação das faces de ruptura.

Cada camada recebeu uma pontuação, atribuindo-se uma qualidade estrutural da camada (QEC) que serviu de base para o cálculo e definição do índice de qualidade estrutural da amostra (IQE). Para a definição do QEC, os critérios avaliados se basearam em indicadores de degradação ou conservação do solo e tamanho de agregado. No primeiro critério, observou-se como indício de degradação a transição abrupta entre camadas, sendo soltas na superfície e compactada na sequência; e a concentração de raízes na camada superficial. O segundo critério foi a classificação do tamanho dos agregados, classificando-os em: menores que 1,0 cm, entre 1,0 e 4,0 cm e maiores que 7,0 cm. Com isso, cada camada recebeu uma nota que variou de 1 a 6, sendo 1 para a amostra com sinal de degradação avançado e 6 para amostra com indício de conservação do solo. O IQE foi calculado com base na Equação 1.

$$IQE = \frac{[(EC1 \times QEC1) + (EC2 \times QEC2) + (EC3 \times QEC3)]}{ET} \quad (1)$$

Onde EC é a espessura da camada, em centímetros; QEC a nota de qualidade estrutural da camada; ET corresponde a espessura total da amostra (40 centímetros).

3.11 Análise Estatística

Os dados de RP foram inseridos no programa estatístico Minitab versão 19.1, observando-se a existência de pontos *outliers* através da ferramenta Box Plot e pelo

teste de Grubbs a 5% de significância. No entanto, considerou-se a presença de dados subjacentes ao conjunto que representavam as reais características da estrutura do solo, evitando, assim, a sua eliminação. Os dados de taxa de colonização radicular foram transformados utilizando arcoseno $\sqrt{x}$ (CALVET et al., 2001; JANSÁ; SMITH e SMITH, 2001; PRIMIERI; SANTOS e ANTUNES, 2021).

A normalidade dos dados foi averiguada pelo teste de Anderson-Darling. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância e, quando significativas, as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), através do programa AgroEstat (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2015).

Para RP, a estatística foi realizada com objetivo de comparar os tratamentos entre as camadas, separando-se de 5 em 5 cm, considerando-se a Diferença Mínima Significativa (DMS) do teste de médias na construção dos gráficos. Os gráficos foram elaborados por meio do programa Sigmaplot 14.5.

Realizou-se uma análise multivariada para avaliar o comportamento das variáveis em função dos tratamentos empregados (HAIR JR et al, 2009), utilizando-se o programa estatístico Minitab. Com o objetivo de avaliar a influência das variáveis e dos tratamentos na produtividade da soja, empregou-se uma análise de componentes principais por meio do algoritmo de mínimos quadrados parciais iterativos não-lineares (NIPALS), utilizando-se o programa R para a estatística e o programa Sigmaplot para elaboração do gráfico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resistência do solo à penetração

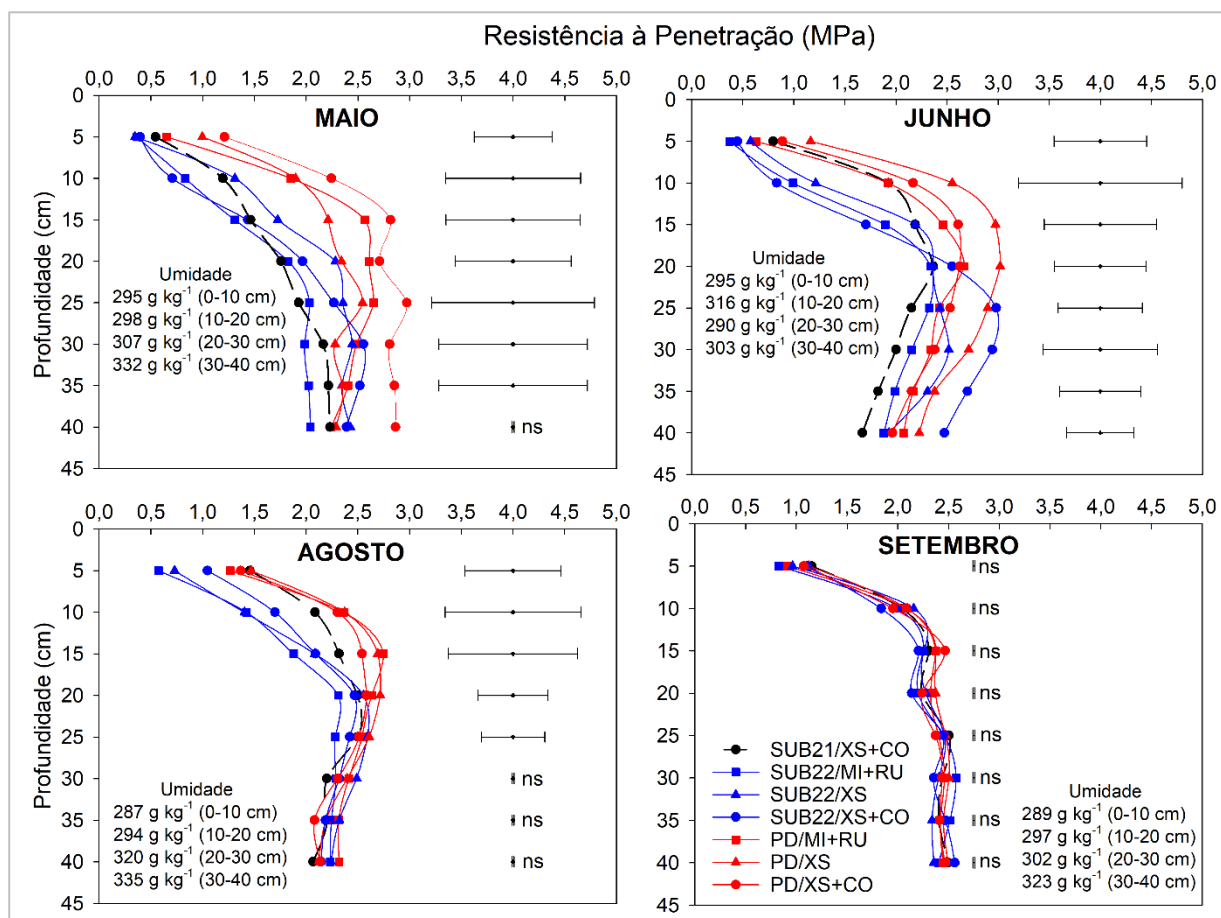
Observou-se nos tratamentos em PD, a existência de uma camada com maiores níveis de RP entre 10 e 20 cm (Figura 5). Em solos com elevados teores de argila, é frequentemente observada a presença de camadas superficiais com maior RP, devido aos efeitos cumulativos das práticas agrícolas associadas à falta de mobilização do solo no PD (MAHL et al., 2008). A formação de uma camada superficial com maior resistência no PD modifica o grau de suscetibilidade do solo à deformação, resultando em um aumento da resistência a uma nova compactação. Como consequência, a compactação superficial encontrada no PD, tem o potencial de impedir a transmissão de tensões para camadas mais profundas do solo, evitando, assim, uma compactação do subsolo (VEIGA et al., 2007). No entanto, é importante ressaltar que a resistência apresentada por essa camada não deve restringir o crescimento adequado das raízes das plantas, nem prejudicar o fluxo natural de gases e água.

A primeira leitura de RP aconteceu em maio, 90 dias após a subsolagem em 2022. Nesta avaliação, todas áreas subsoladas apresentavam redução da RP até aproximadamente 15 cm (Figura 5). A profundidade mencionada não reflete a profundidade total de regulagem do equipamento, a qual foi ajustada previamente à operação, podendo ser fruto de um rearranjo natural das partículas e das operações de campo até o momento da primeira avaliação. Comportamento semelhante ocorreu em junho e agosto para as parcelas subsoladas em 2022. A partir de 20 cm, SUB21/XS+CO apresentou menor RP do que SUB22/XS+CO e PD/XS, enquanto os demais tratamentos não se diferiram pelo teste de médias. Como observado, subsoladores possuem grande capacidade em romper camadas restritivas no solo, resultando na redução da resistência mecânica à penetração. Entretanto, o grau de perturbação e a eficiência da subsolagem está sujeita às características específicas de cada equipamento, bem como das condições do solo durante a operação (SCHNEIDER et al., 2017; VANDERHASSELT et al., 2023).

Em setembro de 2022, as áreas com subsolagem e as mantidas em PD apresentaram RP semelhante, não havendo diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de médias ($p < 0,05$), conforme a Figura 5. O comportamento observado neste estudo está em consonância com Vanderhasselt et al. (2023) que

notaram um aumento significativo na RP em um intervalo relativamente curto após a realização da subsolagem. Isso demonstra que a técnica de subsolagem não é eficiente a longo prazo para melhoria das condições físicas do solo, mesmo com associação de plantas de cobertura.

Figura 5 – Resistência do solo à penetração (RP) em diferentes sistemas de produção sob subsolagem (SUB) e plantio direto (PD) obtida entre os meses de maio e setembro. Rio Brilhante, MS



SUB21/XS+CO: subsolagem (fev. 2021) e capim-xaraés + crotalária ochroleuca de verão 2021; SUB22/MI+RU: subsolagem (fev. 2022) e milho + braquiária ruziziensis; SUB22/XS: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés solteiro; SUB22/XS+CO: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés + ochroleuca; PD/XS: capim-xaraés solteiro em plantio direto; PD/XS+CO: capim-xaraés + crotalária ochroleuca em plantio direto; PD/MI+RU: milho + ruziziensis em plantio direto. Barras horizontais comparam os valores de resistência à penetração para cada profundidade pela Diferença Média Significativa (DMS) do teste de Tukey ($p < 0,05$), ns: não significativo.

Solos com teores elevados de argila possuem uma propensão a retornar ao seu estado original após sofrerem perturbações, o que pode resultar em uma redução dos efeitos da subsolagem nas propriedades físicas (ZHANG et al., 2020). A fração argila de solos de regiões tropicais é predominada por minerais contendo óxidos de Fe e Al.

A alta capacidade de ligação desses minerais e interação com frações orgânicas aumentam a resiliência (capacidade de retornar ao estado original), evidenciando sua habilidade em reorganizar as partículas (BONETTI et al., 2017) e promover a formação de novos agregados após uma intervenção mecânica (ANDRUSCHKEWITSCH; KOCH e LUDWIG, 2014). Entretanto, o retorno aos valores mais elevados de RP pode não estar exclusivamente associada a processos naturais, podendo ser atribuída à formação de agregados oriundos da pressão mecânica exercida pelos rodados das máquinas durante as operações agrícolas (BRAIDA et al., 2007), que ocorre principalmente em estações chuvosas (THORSØEA et al., 2019), como no caso do presente trabalho (Figura 1).

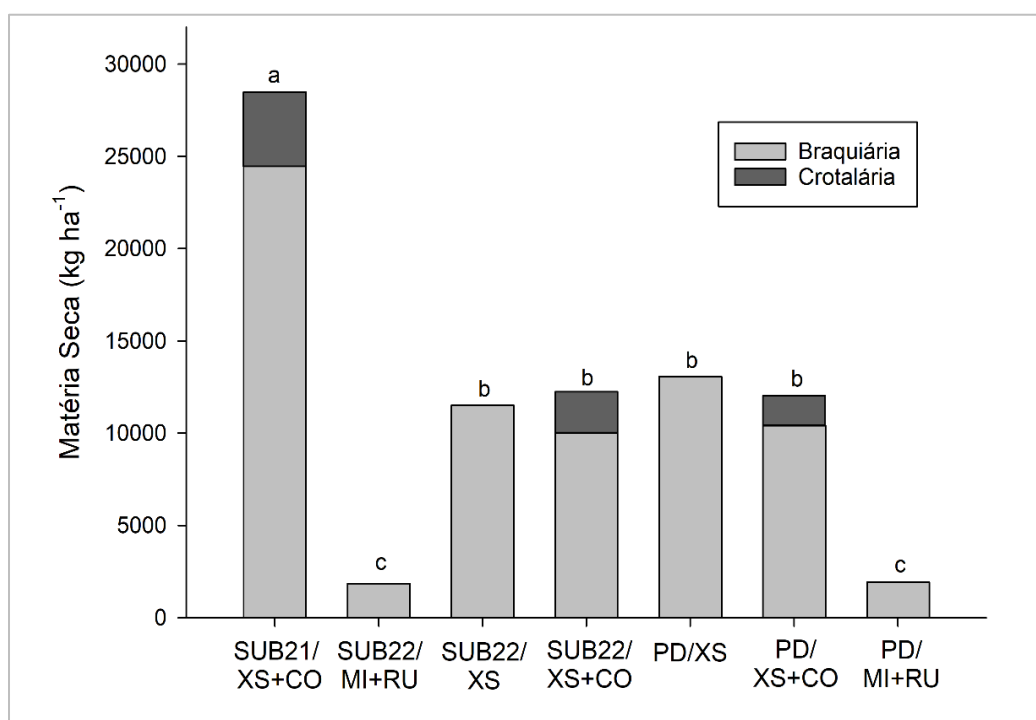
4.2 Produção de fitomassa acumulada

A produção de fitomassa acumulada (FTM) foi obtida a cada manejo de corte das forrageiras até o manejo de dessecação. Observou-se que a matéria seca acumulada produzida pelo consórcio semeado em 2021 (SUB21/XS+CO) foi maior do que os demais tratamentos, atingindo 28.000 kg ha⁻¹ (Figura 6). Esses resultados eram esperados, devido ao maior tempo de permanência da cultura e dos sucessivos rebrotes ocasionados pelo manejo de corte até a dessecação para a semeadura da soja.

O desempenho dos consórcios não se diferiu do cultivo solteiro, independente da prática agrícola empregada (Figura 6). Apesar da fitomassa produzida pela braquiária ser menor quando consorciada, em função da redução da população de plantas, a matéria seca total do consórcio é compensada pelas crotalárias. Crotalárias são espécies de rápido crescimento inicial e de porte alto (MOSJIDIS e WEHTJE, 2011; TRIPATHI et al., 2013), o que permitir fornecer biomassa de qualidade nos primeiros meses e, ao mesmo tempo, evitar a competição por luz com as braquiárias (Figura 7A). Além disso, o aporte do material vegetal proveniente das crotalárias permite a incorporação de N no solo, em função da assimilação desse nutriente pela fixação biológica de N proveniente a associação simbiótica com bactérias fixadoras. Estudos demonstram que as crotalárias são capazes de aportar N em maior quantidade do que outras leguminosas (TAURO et al., 2009), destacando-se a crotalária ochroleuca com capacidade de fixar o equivalente a 83 kg ha⁻¹ de N (SAMBA et al., 2002), o que permite melhorar a relação C/N da palhada.

Quando comparada com a braquiária, as crotalárias forneceram 15% da fitomassa total do consórcio (Figura 6). As braquiárias possuem alta capacidade de produção de biomassa em função metabolismo fotossintético ser do tipo C4 (GLAZE-CORCORAN et al., 2020), enquanto as crotalárias são do tipo C3. Plantas C4 eliminam amplamente a fotorrespiração, o que possibilita utilização mais eficiente da energia luminosa disponível, convertendo-a em energia armazenada, em comparação com as plantas C3 (HEATON; VOIGT; LONG, 2004). Além disso, as braquiárias são gramíneas perenes que apresentam capacidade de rebrote após o manejo de corte. Essas características permitem o acúmulo de biomassa longo do tempo, o que não acontece no caso das crotalárias que são plantas anuais (MEZA et al., 2022).

Figura 6 – Matéria seca total da parte aérea das forrageiras sob subsolagem (SUB) e plantio direto (PD) por ocasião do manejo de corte dos tratamentos

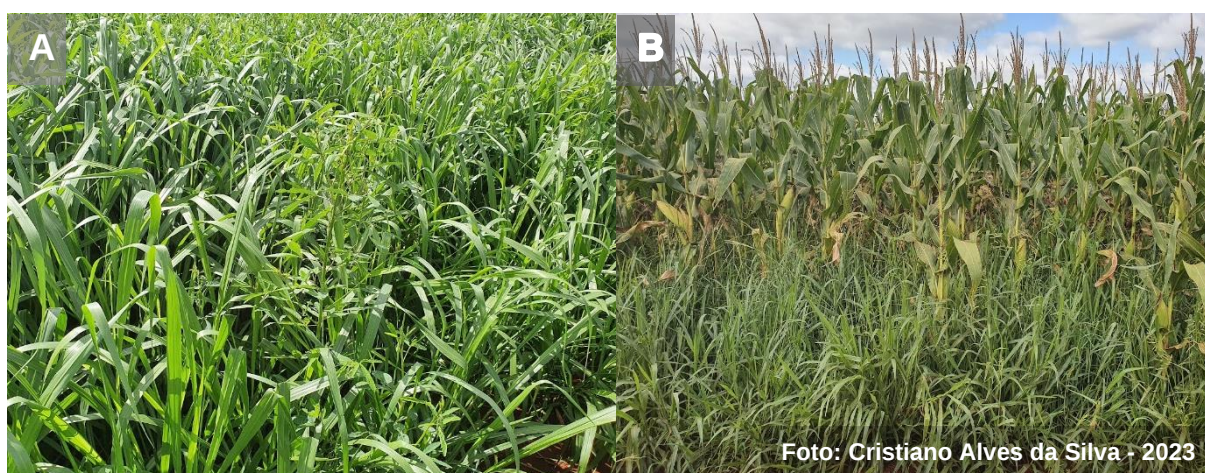


SUB21/XS+CO: subsolagem (fev. 2021) e capim-xaraés + crotalária ochroleuca de verão 2021; SUB22/MI+RU: subsolagem (fev. 2022) e milho + braquiária ruziziensis; SUB22/XS: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés solteiro; SUB22/XS+CO: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés + ochroleuca; PD/XS: capim-xaraés solteiro em plantio direto; PD/XS+CO: capim-xaraés + crotalária ochroleuca em plantio direto; PD/MI+RU: milho + ruziziensis em plantio direto. Letras iguais não se diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

A matéria seca do milho não foi aferida e, por isso, as médias apresentadas são apenas da braquiária ruziziensis, que produziu menor quantidade de matéria seca em comparação aos demais tratamentos (Figura 6). A produção de matéria seca da

braquiária em consórcio com o milho evidencia a competição entre plantas. É inevitável a competição por luz incidente em consórcios com espécies de diferentes arquiteturas (DUCHENE; VIAN e CELETTE, 2017). Quando culturas de maior estatura são plantadas próximas de culturas de menor estatura (Figura 7B), ocorre uma redução na qualidade e a disponibilidade de luz para a cultura de menor estatura. Essa condição tem um impacto significativo na taxa fotossintética e, consequentemente, no rendimento da cultura de menor estatura (GLAZE-CORCORAN et al., 2020).

Figura 7 – Estatura de plantas nos consórcios: capim-xaraés com crotalária ochroleuca (A) e milho com braquiária ruziziensis (B)



No entanto, espera-se que a braquiária produza menos fitomassa que o milho no consórcio, pois o objetivo é que a forrageira não entre em competição com a cultura principal, evitando interferências na produtividade.

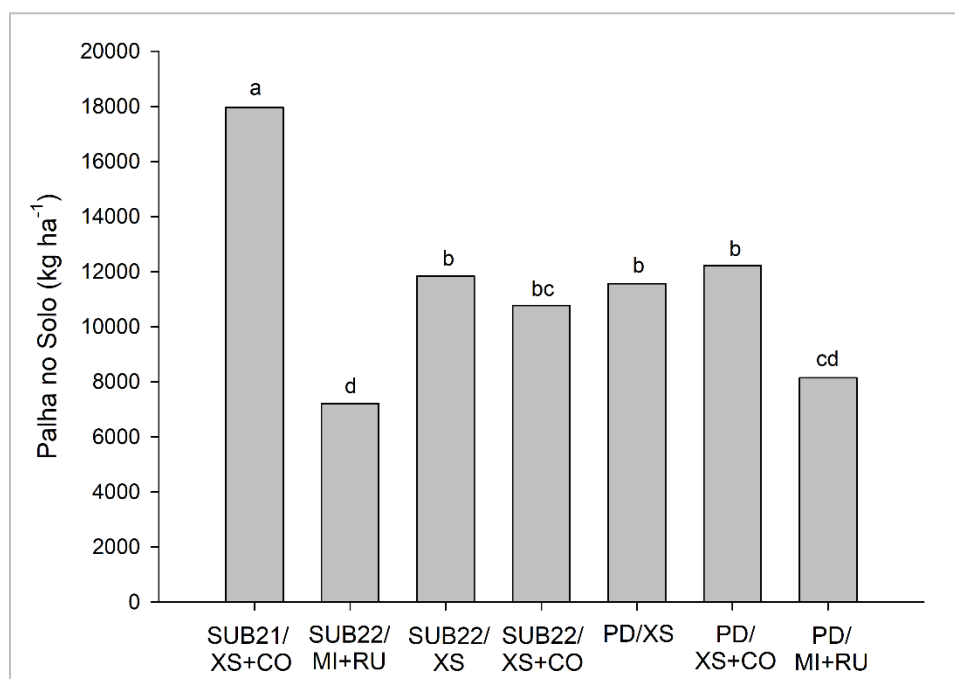
4.3 Palha no solo

A maior quantidade de palha na superfície (PSL), por ocasião da emergência da cultura da soja (VE) foi observado no tratamento SUB21/XS+CO, atingindo aproximadamente 18.000 kg ha⁻¹ (Figura 8). De toda a fitomassa produzida pelos cultivos ao longo dos manejos de corte (Figura 6), houve redução de 36% da matéria seca presente no solo. Em regiões de clima tropical, onde as temperaturas são mais quentes e a umidade mais elevada, é comum a rápida decomposição do material e

vegetal, uma vez que essas condições favorecem a atividade de agentes decompositores (GMACH et al., 2020; KHATOON et al., 2017; SUL et al., 2013).

Não houve diferenças estatísticas entre o cultivo solteiro ou consorciado das plantas de cobertura (XS e XS+CO) sob PD ou subsolagem em 2022 (Figura 8), comportamento semelhante a produção total de fitomassa (Figura 6). A diversificação do sistema de produção com plantas de cobertura no ano de 2022, possibilitou a adição de 11.000 kg ha⁻¹ de palha no solo, em contraste ao sistema padrão da propriedade (PD/MI+RU), que obteve por volta de 8.000 kg ha⁻¹.

Figura 8 – Matéria seca de restos culturais sobre a superfície do solo por ocasião da emergência (VE) da cultura da soja. Rio Brilhante, MS



SUB21/XS+CO: subsolagem (fev. 2021) e capim-xaraés + crotalária ochroleuca de verão 2021; SUB22/MI+RU: subsolagem (fev. 2022) e milho + braquiária ruziziensis; SUB22/XS: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés solteiro; SUB22/XS+CO: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés + ochroleuca; PD/XS: capim-xaraés solteiro em plantio direto; PD/XS+CO: capim-xaraés + crotalária ochroleuca em plantio direto; PD/MI+RU: milho + ruziziensis em plantio direto. Letras iguais não se diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

O aporte constante de resíduos em superfície é uma prática importante para a manutenção dos teores de C do solo. O cultivo com baixa produção de fitomassa associado a práticas de preparo de solo acelera a mineralização da matéria orgânica, resultando na redução dos estoques de C (BATIONO et al., 2007). A manutenção dos teores de MOS está associada a adição de cerca 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ de restos culturais

(RAFFA et al., 2015). Essa quantidade visa manter o equilíbrio entre degradação e transformação do material orgânico em formas mais estáveis.

É importante destacar que nem sempre quantidades muito elevadas de fitomassa e, conseqüentemente, de palha sobre o solo resultará somente em benefícios. Isso porque uma camada excessiva de palha pode dificultar a abertura de sulcos para a semeadura e o contato das sementes com o solo, refletindo diretamente no estabelecimento das plântulas, ocasionando falhas no estande e na produtividade.

4.4 Atividade enzimática, carbono (C) e nitrogênio (N) total

A atividade enzimática foi responsiva às práticas agrícolas, expressando maior atividade de BETA e SULFA sob subsolagem (Tabela 4).

Tabela 4 – Atividade de β -Glicosidase (BETA), Arilsulfatase (SULFA), Carbono (C) e Nitrogênio (N) total na camada de 0-10 cm em diferentes cultivos sob plantio direto (PD) e subsolagem (SUB). Rio Brilhante, MS

Tratamentos ⁽¹⁾	Atividade enzimática (mg <i>p</i> -nitrofenol kg ⁻¹ solo h ⁻¹)		Fração Total (g kg ⁻¹)	
	BETA	SULFA	C	N
SUB21/XS+CO	121,02 a ⁽²⁾	119,60 ab	17,6	1,6
SUB22/MI+RU	128,79 a	113,44 b	18,7	1,8
SUB22/XS	123,12 a	96,37 cd	19,2	1,7
SUB22/XS+CO	126,25 a	127,80 a	19,0	1,7
PD/XS	90,11 b	88,53 d	18,6	1,6
PD/XS+CO	105,35 b	100,44 c	19,9	1,7
PD/MI+RU	93,48 b	88,51 d	20,0	1,7
CV (%)	6,75	6,75	6,61	6,74
<i>p</i> -valor	<0,01**	<0,01**	0,19 ^{ns}	0,36 ^{ns}

⁽¹⁾ SUB21/XS+CO: subsolagem (fev. 2021) e capim-xaraés + crotalária ochroleuca de verão 2021; SUB22/MI+RU: subsolagem (fev. 2022) e milho + braquiária ruziziensis; SUB22/XS: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés solteiro; SUB22/XS+CO: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés + ochroleuca; PD/XS: capim-xaraés solteiro em plantio direto; PD/XS+CO: capim-xaraés + crotalária ochroleuca em plantio direto; PD/MI+RU: milho + ruziziensis em plantio direto. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura, no entanto, relatam atividade enzimática semelhante ou superior quando em PD (JIN et al., 2009; LÓPEZ-

GARRIDO et al., 2014; PANETTIERI et al., 2013), mas os resultados apresentados expressam respostas de longa duração e após sucessivas operações de subsolagem, enquanto o presente trabalho, demonstra a atividade de enzimas poucos meses após a primeira intervenção mecânica em uma área que vinha sendo conduzida sob PD por muitos anos. Segundo Yang et al. (2022), a subsolagem pode facilitar a atividade enzimática no solo por aumentar a porosidade, melhorando as trocas gasosas, a infiltração de água e a atividade radicular. De fato, a perturbação ocasionada por subsoladores é menor do que outros equipamentos por não promover o revolvimento total de solo. Assim, a subsolagem não expõe grande quantidade de solo ao ambiente externo como os arados, o que promoveria maior perda de C para a atmosfera, devido ao solo ser fraturado e invertido (SHUKLA et al., 2020).

De acordo com Li et al. (2020), a intervenção mecânica pode melhorar o ambiente de desenvolvimento microbiano, aumentando a eficiência do uso do C pelos microrganismos, elevando a atividade de várias enzimas extracelulares. Ainda, de acordo com os autores, fungos são mais vulneráveis as perturbações ocasionadas pelo preparo de solo e, comumente mineralizam fontes de C mais recalcitrantes, enquanto bactérias são menos sensíveis ao preparo de solo e mais responsivas a adição de resíduos, degradando substratos no estágio inicial de decomposição. O aumento da atividade enzimática quando houve subsolagem (Tabela 4) pode estar associado, portanto, a rápida mudança qualitativa da comunidade microbiana proporcionada e pela rapidez com que a celobiose é decomposta no solo (MENDES e REIS-JUNIOR, 2004), representada pela ativação da biota com a intervenção mecânica, levando a degradação de compostos da celobiose e ao aumento da atividade das enzimas. Vale ressaltar que a menor atividade enzimática observada pelos tratamentos em PD, não refletem em uma atividade microbiana comprometida. De acordo com Dou et al. (2016), em solos cultivados por longo tempo, a atividade enzimática pode reduzir em comparação ao seu estado original, em função do acúmulo de material humificado e redução de matéria orgânica lábil. Mais estudos, ao longo do tempo, em solos sob subsolagem, são necessários para concluir se esse comportamento se mantém.

Conforme a Tabela 4, observou-se que a introdução de uma leguminosa no consórcio com capim-xaraés (XS+CO) proporcionou maior atividade de SULFA quando comparado ao cultivo solteiro (XS). O aumento da atividade enzimática com a adição de crotalária ao sistema de produção pode estar relacionado com interações

entre P e S do solo. O cultivo de crotalária tende a aumentar a disponibilidade de P em superfície, uma vez que, bactérias solubilizadores desse nutriente estão presentes com maior expressão nos tecidos de leguminosas e, com a baixa a relação C/N desses vegetais, a mineralização é mais acelerada do que nas gramíneas (ROSOLEM e CALONEGO, 2013). O aumento no teor de P, entretanto, provoca uma deficiência de S ocasionada pela competição entre H_2PO_4^- e SO_4^- , dada a preferência do ânion de fosfato durante o processo de adsorção coloidal. Assim, a deficiência de S promove a atividade e produção da SULFA, aumentando os teores no solo (MENDES e REIS-JUNIOR, 2004).

Ainda de acordo com a Tabela 4, não houve influência significativa teores de C e N do solo. Alterações nos estoques de C e N podem ser difíceis de detectar em solos de textura argilosa, como observado por Grandy e Robertson (2006), onde não houve mudanças nos teores de C, após o terceiro ano de emprego de arados em um solo previamente não cultivado. Esses resultados também corroboram com Satiro et al. (2017), onde não foi possível constatar alterações nos teores de C e N após a remoção de resíduos em superfície. De acordo com os autores, isso ocorreu por não houver tempo suficiente para reduzir os estoques no solo.

Por outro lado, o tratamento SUB21/XS+CO evidencia que nem sempre a maior quantidade de resíduos aportados no solo (Figura 8) resulta no aumento imediato dos teores de C (Tabela 4), sendo o balanço de N crucial para a manutenção da dinâmica da MOS (ROSCOE, BODDEY e SALTON, 2006). Sendo assim, enzimas são mais sensíveis às alterações do sistema de culturas e práticas agrícolas nas regiões dos subtrópicos, quando comparada aos teores orgânicos de C e N (DOU et al., 2016).

4.5 Taxa de colonização radicular por micorrizas arbusculares

Conforme a Tabela 5, a colonização radicular por FMA com a soja no período vegetativo (V3) foi maior para o PD, com média geral de 24%, indiferentemente da espécie utilizada, enquanto a subsolagem realizada em 2022 apresentou média de 14,5%. Entre os tratamentos, a subsolagem realizada em 2022 proporcionou redução de 44%, 40%, e 34% na taxa de infecção inicial para XS, MI+RU e XS+CO em relação ao PD.

Tabela 5 – Colonização radicular (%) por micorrizas arbusculares no período vegetativo (V3) e reprodutivo (R1) da cultura da soja, safra 2022/2023. Rio Brilhante, MS.

Tratamentos ⁽¹⁾	Colonização radicular (%)	
	Vegetativo (V3)	Reprodutivo (R1)
SUB21/XS+CO	24,50 a ⁽²⁾	60,25
SUB22/MI+RU	13,75 c	64,50
SUB22/XS	13,50 c	63,00
SUB22/XS+CO	16,25 bc	62,25
PD/XS	24,25 a	55,25
PD/XS+CO	24,75 a	60,25
PD/MI+RU	23,00 ab	56,75
CV (%)	9,08	6,56
p-valor	<0,01**	0,28 ^{ns}

⁽¹⁾ SUB21/XS+CO: subsolagem (fev. 2021) e capim-xaraés + crotalária ochroleuca de verão 2021; SUB22/MI+RU: subsolagem (fev. 2022) e milho + braquiária ruziziensis; SUB22/XS: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés solteiro; SUB22/XS+CO: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés + ochroleuca; PD/XS: capim-xaraés solteiro em plantio direto; PD/XS+CO: capim-xaraés + crotalária ochroleuca em plantio direto; PD/MI+RU: milho + ruziziensis em plantio direto. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fungos são bastante sensíveis às perturbações ocasionadas pelas práticas agrícolas, afetando negativamente esses organismos com a quebra de redes hifas fúngicas e propágulos formados no solo (MANGALASSERY et al., 2015, SHUKLA et al., 2020). Quando o solo sofre uma perturbação, por implemento agrícola, a rede de micélio é rompida, afetando negativamente a diversidade de fungos micorrízicos no solo (SÁNCHEZ; CANABAL e ARMBRECHT, 2022). Para garantir a infecciosidade micorrízica, as estruturas fúngicas devem ser suficientemente robustas para sobreviver no solo e iniciar novas infecções (ROLDÁN et al., 2007). Sendo assim, se a rede de micélio permanece inalterada, as culturas em sucessão são conectadas mais rapidamente aos propágulos remanescentes no solo, aprimorando a colonização de plantas (KABIR, 2005).

Práticas conservacionistas, como o PD, tendem a preservar as estruturas fúngicas, mantendo uma boa relação entre glomalina e estabilidade de agregados (WILKES et al., 2021). A glomalina é uma glicoproteína originada de hifas intrarradiculares e na superfície de hifas extrarradiculares, sendo liberada da superfície micelial para o solo (GAO; WANG e WU, 2019). Essa proteína é um

composto estável, resistente a degradação por calor, insolúvel em água, com grande capacidade de se fixar às superfícies do solo, o que configura em uma característica cimentante, isto é, que permite ligar partículas de solo entre si (SINGH; SINGH e TRIPATHI, 2013). Além disso, seus ciclos de renovação no solo são prolongados, podendo abranger períodos de anos ou mais. Essas características possibilitam sua acumulação em elevadas concentrações no solo, constituindo uma porção significativa da MOS (AGNIHOTRI et al., 2022; HOLÁTKO et al., 2021). Sendo assim, a agregação do solo mediada pela glomalina protege compostos derivados do C contra a degradação (HOSSAIN, 2021). Por outro lado, em solos desestruturados nos quais se emprega manejo mecânico, verifica-se uma redução nos níveis de glomalina (VLCE e POHANKA, 2020) e, então, na estabilidade de agregados e qualidade estrutural do solo.

Por outro lado, não foram observadas diferenças estatísticas no que se diz respeito ao tipo de espécie cultivada (Tabela 5). A diversificação de espécies em áreas de monocultivo tende a estimular um aumento na população de FMA pré-existentes no solo (OLANDINI et al., 2021). O aporte de diferentes resíduos vegetais pode atuar na modificação da comunidade microbiana ou nos teores de nutrientes nas camadas próximas a superfície, o que poderia levar a uma mudança na composição da comunidade de FMA no solo (GU et al., 2020; HYDBOM e OLSSON, 2021; WILLEKENS et al., 2014) e, conseqüentemente, na colonização radicular por parte desses indivíduos, não sendo observado no presente trabalho.

Ainda de acordo com o estágio V3, a subsolagem em 2021 apresentou maior taxa de colonização radicular do que a realizada em 2022, não se diferenciando do PD (Tabela 5). O cultivo de verão de 2021 permaneceu com capim-xaraés em rebrote até o momento do manejo de dessecação para a semeadura da soja, sem qualquer tipo de intervenção mecânica. Conseqüentemente, a falta de significância da colonização radicular na subsolagem de 2021 em relação ao PD indica que os microrganismos possuem uma capacidade notável de se recuperar após uma intervenção mecânica. No entanto, essa recuperação demanda um intervalo sem mobilização do solo. Além disso, essa relação pode ser melhorada quando há a presença de gramíneas no sistema. Isso ocorre porque as gramíneas têm alta afinidade com a colonização de FMA devido ao seu sistema radicular robusto. Com isso, o comprimento do micélio externo e a quantidade de esporos aumentam, promovendo a produção de glomalina e a abundância do micélio fúngico no solo (MOITINHO et al., 2020).

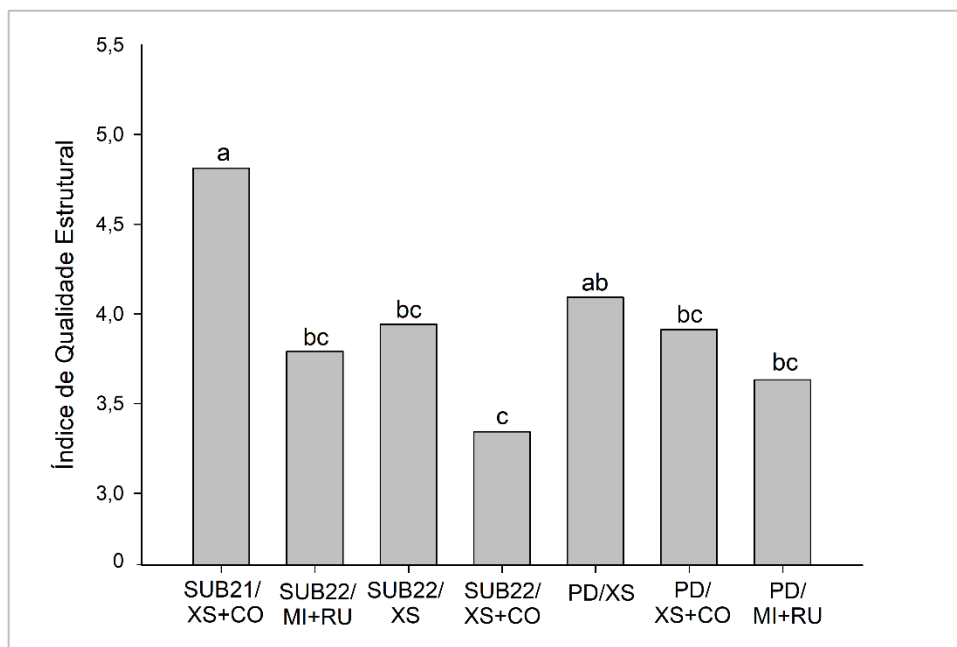
Observou-se maior taxa de colonização por FMA no período reprodutivo (R1) do que em V3, mas não houve diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 5). Semelhantemente ao presente trabalho, Buade et al. (2021) verificaram aumento na taxa de colonização radicular ao passo que a soja avança os estádios fenológicos, sendo 21% durante o estágio vegetativo e 74% no período de maturação. Segundo os autores, isso ocorre em função do tempo necessário para a germinação dos esporos, crescimento do tubo germinativo e penetração no tecido radicular. Ainda de acordo com os autores, é possível observar um leve declínio da colonização radicular nos estádios finais da cultura da soja, demonstrando que a infecção atinge um pico máximo em determinado momento do ciclo da cultura. Assim, a ausência de significância da ANOVA em R1 provavelmente ocorreu, primeiramente, pela colonização radicular ter atingido um ponto máximo nos tratamentos em PD e na subsolagem em 2021. Em um segundo instante, microrganismos tem alta capacidade de recuperação após uma perturbação (GU et al., 2020) e, como a subsolagem não tem o mesmo impacto de equipamentos que causam o revolvimento do solo, permitiu a recomposição natural das estruturas fúngicas em R1.

4.6 Índice de qualidade da estrutural do solo

Conforme a Figura 9, SUB21/XS+CO apresentou maior IQE do solo (próximo de 5) com a soja em R5. De acordo com as observações realizadas, foi possível identificar a presença de um perfil mais uniforme, quase 2 anos após a subsolagem realizada em 2021 (Figura 10A), em contraste com a subsolagem realizada em 2022, que apresentava uma transição abrupta entre camadas (Figura 10B).

O PD/XS se diferiu apenas de SUB22/XS+CO, cujo IQE foi próximo de 3, enquanto os demais tratamentos obtiveram notas próximas de 4 (Figura 9). Na escala de avaliação, a nota 4 é considerada intermediária e transitória entre a degradação e conservação do solo. A obtenção de notas que indicam predomínio de feições de degradação é proveniente de perfis apresentando solo altamente pulverizado (na forma de pó) nas camadas superficiais e com agregados grandes nas camadas subjacentes (Figura 10B) ou ainda, com agregados grandes em todo o perfil. Esses resultados corroboram com Çelik et al. (2020), onde as notas de qualidade estrutural do solo foram menores sob o preparo do solo, devido a alteração estrutural ocasionada por esse tipo de manejo.

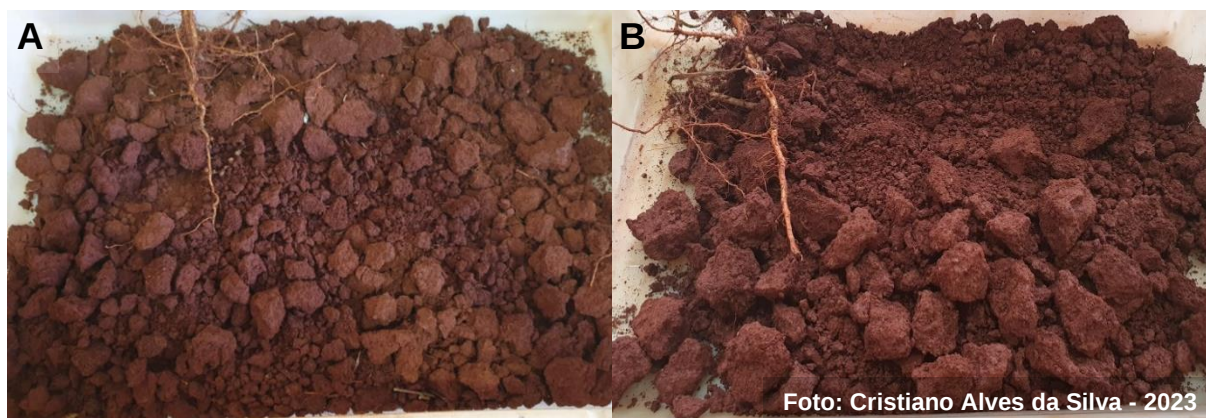
Figura 9 – Índice de qualidade estrutural do solo (IQE) com base no Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) para a camada de 0-40 cm nos diferentes sistemas de produção empregados. Rio Brilhante, MS



SUB21/XS+CO: subsolagem (fev. 2021) e capim-xaraés + crotalária ochroleuca de verão 2021; SUB22/MI+RU: subsolagem (fev. 2022) e milho + braquiária ruziziensis; SUB22/XS: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés solteiro; SUB22/XS+CO: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés + ochroleuca; PD/XS: capim-xaraés solteiro em plantio direto; PD/XS+CO: capim-xaraés + crotalária ochroleuca em plantio direto; PD/MI+RU: milho + ruziziensis em plantio direto. Letras iguais não se diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

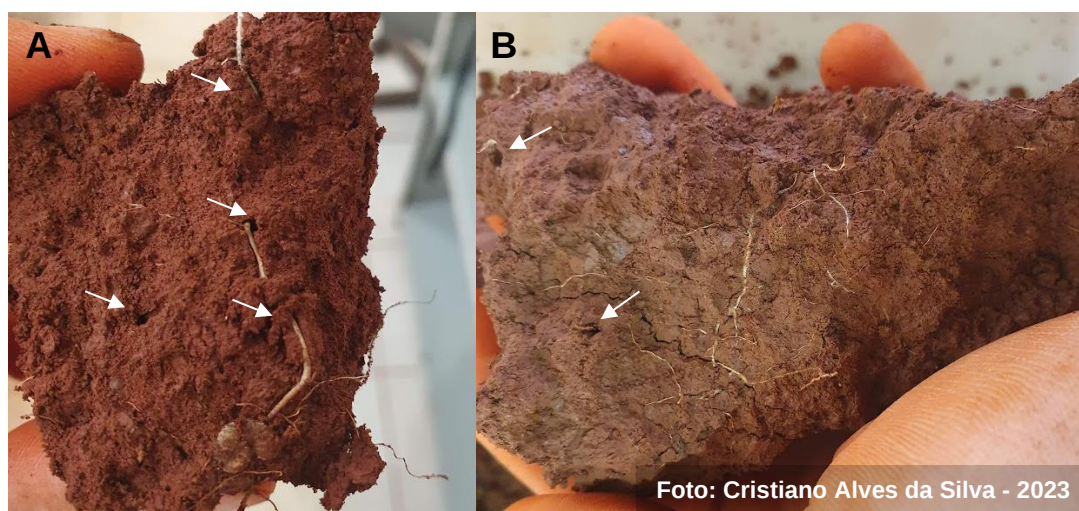
O comportamento observado em SUB21/XS+CO (Figura 9) evidencia a importância de se introduzir culturas com sistema radicular robusto e alta produção de biomassa após uma subsolagem. No entanto, a recomposição da estrutura do solo pela ação radicular demanda tempo, como pode ser observado na comparação entre a subsolagem realizada em fevereiro de 2021 e a de fevereiro de 2022, onde o IQE de SUB21/XS+CO foi maior do que SUB22/XS+CO. Gramíneas possuem um sistema radicular denso e fibroso, o que facilita a proliferação no perfil do solo (MEZA et al., 2022). Essas características permitem a recomposição da estrutura, uma vez que a atividade radicular promove a ação de agentes de agregação, como exsudatos radiculares, atividade de hifas fúngicas e polissacarídeos (NUNES; KARLEN e MOORMAN, 2020; ZHANG et al., 2020; ZHENG et al., 2021).

Figura 10 – Aspecto visual da estrutura do solo na camada de 0-20 cm, 24 meses (A) e 12 meses (B) após a subsolagem (SUB). Rio Brilhante, MS



A recomposição da estrutura, por meio da ação radicular favorece a formação natural de bioporos, o que facilita a penetração radicular e o crescimento natural das raízes (Figura 11A). Esses poros são originados da atividade de organismos vivos, como minhocas ou de canais radiculares provenientes de culturas anteriores que, normalmente se orientam verticalmente no perfil do solo (JIN et al., 2013; PULIDO-MONCADA et al., 2020).

Figura 11 – Evidência de crescimento radicular em agregados grumosos por meio de bioporos (A) e em agregados com faces lisas (B)



Setas sinalizam a presença de poros no agregado.

Durante o crescimento, as raízes tendem a seguir zonas de fácil penetração e, como são órgãos flexíveis, possuem a capacidade de percorrer caminhos tortuosos, através de rachaduras ou bioporos (ATKINSON et al., 2020; HODGE et al., 2009). A

resistência mecânica a penetração em bioporos tende a ser praticamente nula, constituindo-se em vias naturais alternativas para o crescimento das raízes na busca de água e nutrientes em direção a horizontes mais profundos (MEROTTO-JUNIOR e MUNDSTOCK, 1999; WENDEL et al., 2022).

A ocorrência de agregados com faces mais lisas (Figura 11B) está de acordo com o que foi observado na curva de RP (Figura 5), demonstrando a existência de uma camada com maior RP em função das operações agrícolas. Penetrômetros são bons indicadores empíricos para simular a penetração radicular, mas são incapazes de levar em consideração a existência de bioporos (Figura 11B) ou o atrito entre a haste de metal e o solo comparado ao atrito entre raiz e solo (JIN et al., 2013). Isso pode resultar em uma supervalorização dos reais impactos RP no desenvolvimento radicular e na capacidade real das raízes em explorar o solo. Nesse contexto, a preservação de bioporos no PD é ainda mais significativa para a manutenção da qualidade estrutural do solo e da atividade radicular das culturas (OLIVEIRA et al., 2020). Assim, o uso de técnicas visuais da estrutura do solo são alternativas eficazes para avaliação mais precisa da qualidade estrutural do solo e dos impactos ocasionados pelas práticas agrícolas no desenvolvimento das culturas.

A presença de uma camada desagregada nos primeiros centímetros da amostra, conforme a Figura 10B, é correspondente do processo de semeadura da cultura da soja. Nas camadas subjacentes foram observados agregados maiores, caracterizados por ângulos formados em suas faces. Essa observação fortalece a constatação do aumento da RP nos tratamentos subsolados em 2022 a partir do mês de setembro (Figura 5). Isso ocorre porque as estruturas formadas pelo manejo mecânico são frágeis e tendem a retornar ao seu estado original.

Fica evidente que a intervenção mecânica pode até auxiliar na criação de poros artificiais pela quebra de agregados, o que pode elevar a macroporosidade, mas seus efeitos são ineficientes em promover qualidade estrutural do solo (GIAROLA et al., 2013, PIRES et al., 2017). Estruturas oriundas da atividade biológica são considerados mais estáveis, sendo menos suscetíveis à deformação, o que permite resistir às forças aplicadas ao solo (REICHERT et al., 2010). Quando um solo é continuamente coberto por resíduos vegetais, sem o revolvimento do solo, ocorre um favorecimento para a formação de um sistema poroso que apresenta uma grande capacidade de retenção e transmissão de água. Esses poros são formados devido à decomposição gradual dos resíduos vegetais, formando canais contínuos no perfil

(STEPONAVIČIENĖ et al., 2022), ao contrário de poros formados com a intervenção mecânica que não permitem um fluxo ao longo do perfil do solo. Os danos ocasionados à estrutura do solo pelo manejo de preparo podem ser identificados pela redução na proporção de poros de transmissão, uma vez que essas estruturas são bastante sensíveis às práticas agrícolas (GUO et al., 2020; PAGLIAI; VIGNOZZI e PELLEGRINI, 2004).

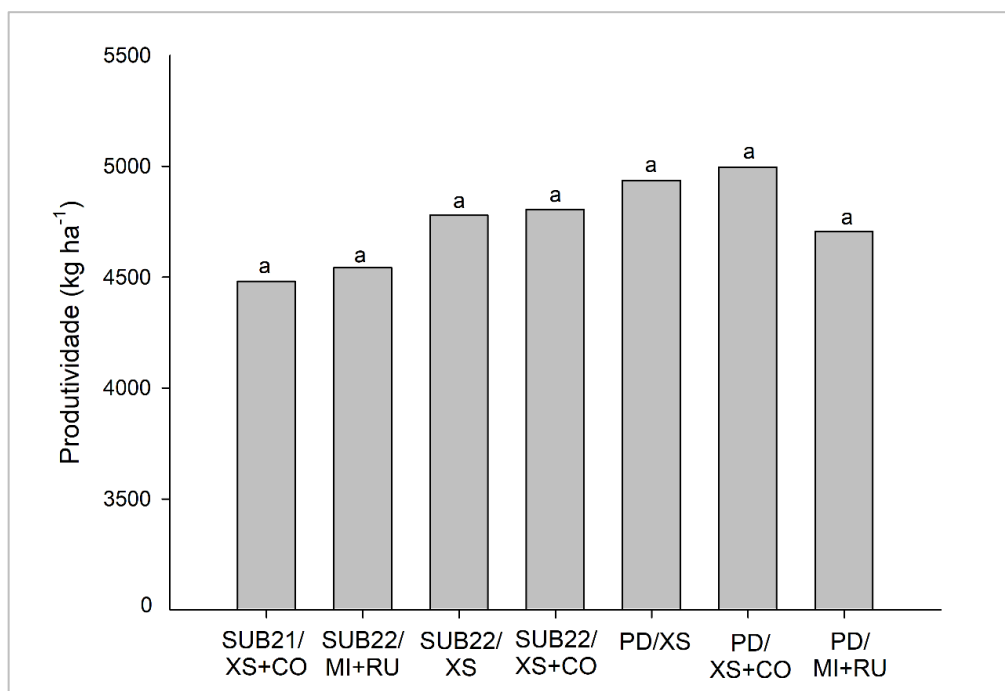
O sistema radicular das gramíneas desempenha, portanto, um papel fundamental na agregação de partículas em Latossolos Vermelhos muito argilosos, tanto pela liberação de exsudatos radiculares quanto ao entrelaçamento de pequenos agregados (SALTON e TOMAZI, 2014). A intensificação da atividade radicular no solo, através da inclusão de plantas com sistema radicular vigoroso no sistema de produção, é uma alternativa viável para melhorar a estrutura de solos que possuem um IQE próximo a 4, pelo fato de que esses solos apresentam uma estrutura moderadamente boa (RALISCH et al., 2017). O emprego prolongado de gramíneas, como no caso de SUB21/XS+CO, permite maior tempo de atividade radicular na estrutura do solo. No entanto, nem sempre é possível adotar essa prática em propriedades que visam apenas a produção de grãos, uma vez que seria necessário abdicar da semeadura duas culturas de valor econômico, a soja durante a safra e do milho na safrinha. Assim, esse modelo de produção se enquadraria melhor em sistemas integrados de produção, como a Integração-Lavoura-Pecuária (ILP), onde a formação de pastagem possibilita a introdução de animais na área, garantindo retorno econômico também com a parte animal. Portanto, a inclusão de gramíneas somente durante o período da safrinha e em uma porção da área, sem qualquer intervenção mecânica, pode ser uma estratégia para promover a criação de poros e melhorar a agregação do solo. Contudo, estudos posteriores devem ser realizados para validar essas informações e averiguar o comportamento a longo prazo.

4.7 Produtividade de grãos de soja

Conforme apresentado na Figura 12, observou-se elevada produtividade de grãos (PROD) para a safra 2022/23, mas não houve diferenças significativas entre os tratamentos. A obtenção de altas produtividades (4705 kg ha⁻¹ para subsolagem e 4879 kg ha⁻¹ para PD) na safra 2022/23 é fruto das boas condições climáticas durante o ciclo da soja (Figura 1), principalmente durante os períodos de maior requerimento

de água pela cultura, como o enchimento de grãos (BASAL; SZABÓ e VERES, 2020; DU et al., 2020). Isso pode ter contribuído para que os efeitos dos tratamentos não se pronunciassem de forma marcante.

Figura 12 – Produtividade de grãos da cultura da soja na safra 2022/23 nos tratamentos sob plantio direto ou intervenção mecânica. Rio Brilhante, MS



SUB21/XS+CO: subsolagem (fev. 2021) e capim-xaraés + crotalária ochroleuca de verão 2021; SUB22/MI+RU: subsolagem (fev. 2022) e milho + braquiária ruziziensis; SUB22/XS: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés solteiro; SUB22/XS+CO: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés + ochroleuca; PD/XS: capim-xaraés solteiro em plantio direto; PD/XS+CO: capim-xaraés + crotalária ochroleuca em plantio direto; PD/MI+RU: milho + ruziziensis em plantio direto. Letras iguais não se diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apesar de não significativa, SUB21/XS+CO apresentou a menor média entre os tratamentos (Figura 12), podendo ser fruto da alta quantidade de palhada no solo. A presença de elevadas quantidades de palha remanescente sobre a superfície (Figura 8) pode ter um impacto negativo na eficiência de semeadura, dificultando o estabelecimento das plantas e resultando em falhas no estande de plantas (FRANCHINI et al., 2015). Essa condição pode ter consequências diretas na PROD da cultura da soja. Dessa forma, o cultivo de verão pode se adequar mais a sistemas de ILP, onde a introdução de animais promoveria a redução do excesso de material vegetal em superfície pelo consumo da parte aérea das forrageiras, facilitando a implantação da cultura da soja em sucessão. O uso de Triton, por sua vez, não é

capaz de realizar a remoção desse excesso, pois deposita todo o resíduo na superfície após o corte.

Por outro lado, algumas alterações estruturais ocasionadas pelo subsolador tendem a ser poucos duradouras (Figura 5), o que pode também ter levado a um nivelamento dos tratamentos. Rosolem e Pivetta (2017) não observaram diferenças significativas na produtividade da soja em um determinado tempo após a intervenção mecânica. Os autores justificaram esse resultado pela capacidade de recuperação do solo após o manejo mecânico.

4.8 Análise multivariada dos dados

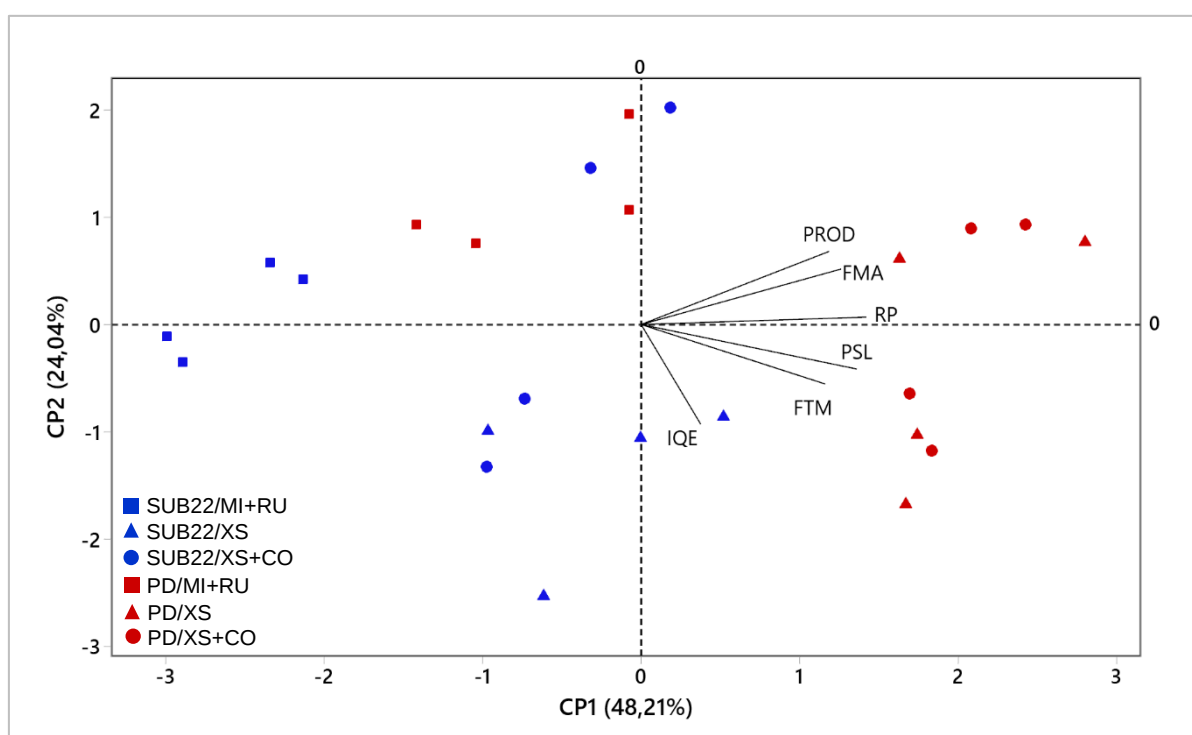
De acordo com a análise multivariada, as duas primeiras componentes explicaram 72,25% da variância total, sendo 48,21% da variância pela componente PC1 e 24,04% pela segunda componente PC2 (Tabela 6 Figura 13). A primeira componente demonstra um comportamento geral das variáveis, enquanto a segunda componente reflete a qualidade estrutural do solo.

Tabela 6 - Cargas das componentes principais com as percentagens de explicação da variação nas variáveis RP: Resistência do Solo à Penetração, FTM: Fitomassa, PSL: Palha no Solo, FMA: Colonização Radicular por Fungos Micorrízicos Arbusculares IQE: Índice de Qualidade Estrutural e PROD: Produtividade de Grãos de Soja

Variáveis	CP1	CP2	CP1 (NIPALS)
RP	0,491	0,048	>0,010
FTM	0,401	-0,385	0,948
PSL	0,470	-0,288	0,316
FMA	0,436	0,358	>0,010
IQE	0,129	-0,644	>0,010
PROD	0,410	0,473	-
Autovalores	2,892	1,442	-
Proporção (%)	48,2	24,0	94,71
Acumulado (%)	48,2	72,2	-

As variáveis PROD, FMA, RP, PSL e FTM foram fortemente influenciadas pelo PD associado à diversificação do sistema de produção, caracterizado pelos tratamentos PD/XS e PD/XS+CO (Figura 13).

Figura 13 – Análise de componentes principais em função de subsolagem e plantio direto para as variáveis IQE: Índice de Qualidade Estrutural, FTM: Fitomassa, PSL: Palha no Solo, RP: Resistência do Solo à Penetração (maio e junho), FMA: Colonização Radicular por Fungos Micorrízicos Arbusculares (V3) e PROD: Produtividade de Grãos de Soja



SUB22/MI+RU: subsolagem (fev. 2022) e milho + braquiária ruziziensis; SUB22/XS: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés solteiro; SUB22/XS+CO: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés + ochroleuca; PD/XS: capim-xaraés solteiro em plantio direto; PD/XS+CO: capim-xaraés + crotalária ochroleuca em plantio direto; PD/MI+RU: milho + ruziziensis em plantio direto.

Em condições severas de limitação radicular (compactação), a RP pode interferir no desenvolvimento de FMA (OHTOMO et al., 2023) e na produtividade das culturas, o que não aconteceu no presente trabalho (Figura 5). Como era esperado, verificou-se maior taxa de colonização radicular por FMA em PD (Tabela 5), o que, por sua vez, pode ter refletido positivamente na produtividade (MHLANGA et al., 2022). As contribuições dos FMA para a produtividade estão comumente relacionadas à otimização da absorção de nutrientes do solo pelas plantas, promovida por esses fungos. No entanto, em solos de alta fertilidade, o papel dos FMA nesse processo

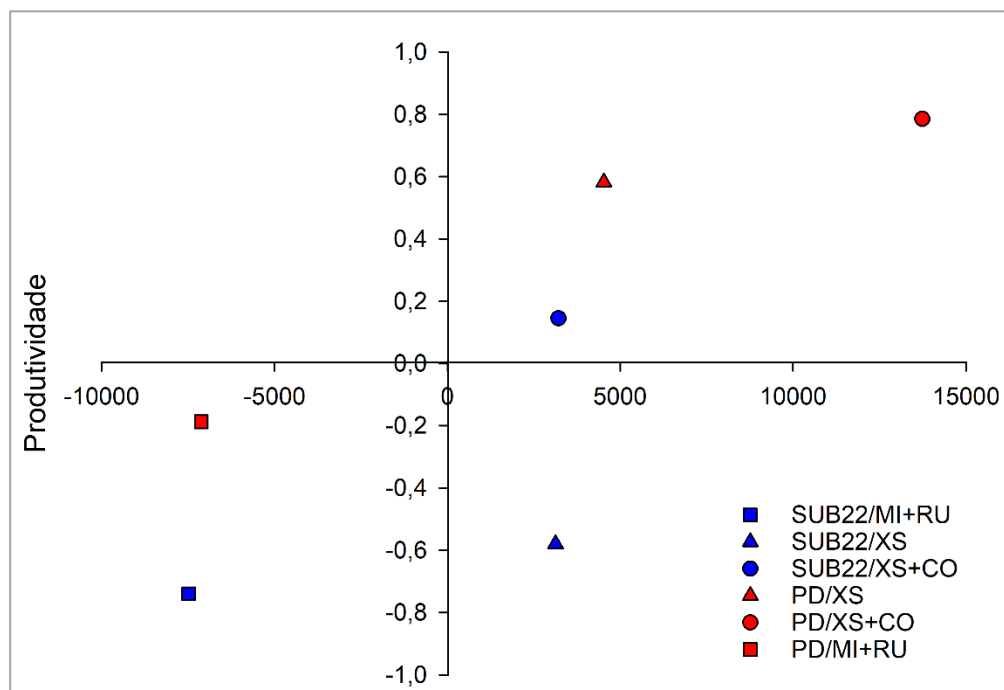
pode ser menos relevante. Nesse contexto, é provável que a correlação entre PROD, a diversidade de FMA, RP e os demais parâmetros esteja associada a serviços ecossistêmicos, como a estruturação do solo, manutenção da rede de hifas e a melhoria da qualidade do solo (PELLEGRINO et al., 2020).

A subsolagem, por sua vez, altera a estrutura do solo, podendo alterar a dinâmica de infiltração de água no solo. Bertollo et al. (2021) também não observaram aumento de produtividade sob intervenção mecânica, com a redução da RP. No entanto, os autores relatam que esse tipo de prática altera a proporção de macroporos e microporos do solo, o que pode comprometer a dinâmica de absorção de água no solo e, como consequência, a produtividade. Segundo Vanderhasselt et al. (2023), a intervenção mecânica rompe canais porosos pré-existentes no solo, mudando o comportamento de infiltração e retenção de água. Isso pode levar a redução de produtividade, especialmente quando períodos de seca coincidem com estágios nos quais a cultura é mais suscetível ao estresse hídrico. Essas evidências reiteram o fato de que em solos não manejados mecanicamente, as estruturas fúngicas são preservadas garantindo a infecção inicial e colonização radicular, mantendo também os canais naturais presentes no solo e de outros atributos estruturais, quando comparada às alterações promovidas pela subsolagem.

Ainda de acordo com a Figura 13, o IQE correlacionou-se fortemente com SUB/XS, podendo ser uma resposta às características radiculares das gramíneas, bem como o aumento no aporte de resíduos da parte aérea que levam ao processo de agregação e estruturação do solo.

Para avaliar a relação dos tratamentos com a produtividade da soja, foi utilizada apenas a primeira componente principal da análise de componentes principais pelo algoritmo de NIPALS, uma vez que essa representou 94,71% da variabilidade total (Tabela 6). Observou-se que FTM e PSL foram as características que mais explicaram a componente.

Figura 14 - Dispersão dos tratamentos na primeira componente principal das variáveis sobre a produtividade da soja na safra 2022/2023



SUB22/MI+RU: subsolagem (fev. 2022) e milho + braquiária ruziziensis; SUB22/XS: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés solteiro; SUB22/XS+CO: subsolagem (fev. 2022) e capim-xaraés + ochroleuca; PD/XS: capim-xaraés solteiro em plantio direto; PD/XS+CO: capim-xaraés + crotalária ochroleuca em plantio direto; PD/MI+RU: milho + ruziziensis em plantio direto.

Verificou-se que os tratamentos PD/XS+CO e PD/XS resultaram em um melhor comportamento das variáveis analisadas (Figura 13), sobretudo em quantidade de FTM e acúmulo de PSL, influenciando positivamente a produtividade da soja conforme a estatística multivariada (Figura 14). A introdução de uma crotalária no sistema de produção, mesmo sob subsolagem (SUB22/XS+CO) também favoreceu a produção de grãos de soja com o aumento no teor de FTM produzida e PSL. A braquiária solteira com subsolagem (SUB22/XS), por sua vez, influenciou no IQE do solo (Figura 13) e na quantidade de FTM e PSL, mas não foi o suficiente para resultar em aumento de produtividade da soja, conforme a análise multivariada (Figura 14).

A combinação de diferentes características dos vegetais (quantidade de resíduos retornados ao solo, composição bioquímica e produtos liberados pelas plantas) afetam a estruturação do solo (BRONICK e LAL, 2005). A acelerada decomposição de resíduos permite a disponibilização de nutrientes para as raízes, bem como aumenta as fontes de energia para os microrganismos. A intensificação da atividade radicular e de microrganismos leva a liberação de exsudatos que contribuem para a ligação entre partículas orgânicas e inorgânicas e, conseqüentemente, a formação de

macroagregados estáveis (WANG et al., 2019). Agregados são unidades básicas da estrutura do solo e a estabilidade é uma característica importante de qualidade estrutural do solo (ZHOU et al., 2020), pois a formação de complexos com partículas minerais, constituindo-se em uma proteção físico-química contra a degradação da MOS (XU et al., 2021).

Por outro lado, o consórcio de milho com *ruziziensis*, sob subsolagem e em PD (SUB22/MI+RU e PD/MI+RU), comportou-se de forma negativa em relação às variáveis estudadas (Figura 13), apresentando menor quantidade de FTM e PSL (Figura 6 e Figura 8). Isso pode ter contribuído para o comportamento negativo na produtividade de grãos de soja (Figura 14), apesar da estatística univariada não ter conseguido detectar diferenças estatísticas, devido à rigorosidade do teste de médias utilizado (Figura 12). Os resultados observados pela análise estatística reforçam a importância de se realizar a diversificação de espécies em sistemas de produção baseados na sucessão de culturas. A diversificação do sistema de produção e o consórcio de espécies distintas promove a liberação de exsudatos radiculares no solo e o aporte de biomassa com diferentes propriedades. Essas características estimulam biota do solo, promovem a interação de raízes com hifas fúngicas, a secreção de compostos orgânicos, a formação de agregados, a criação de bioporos, a ciclagem de nutrientes e, conseqüentemente, a melhoria da qualidade do solo e da produtividade das culturas (SHAH et al., 2021).

Dessa forma, fica evidente que a subsolagem não é uma prática indicada para as condições observadas no presente trabalho. A intervenção mecânica implica em custos adicionais ao produtor, bem como pode gerar uma nova compactação. Isso leva a processos de degradação do solo e impactos ambientais adversos (SHAHEB; VENKATESH e SHEARER, 2021). Além disso, a diversificação de espécies é uma estratégia importante para melhorar a qualidade do solo e promover a produtividade das culturas.

5 CONCLUSÕES

O cultivo de braquiária solteira ou consorciada com crotalária no período de entressafra da soja é uma estratégia para melhorar a qualidade estrutural do solo, podendo ser utilizado com o propósito de diversificar o modelo atual de produção (padrão da propriedade), que envolve uma sucessão de culturas.

Parâmetros físicos e biológicos são altamente sensíveis a alterações de manejo e devem ser empregados de forma conjunta para fornecer uma avaliação mais precisa dos impactos das práticas agrícolas na qualidade do solo.

O crotalária de braquiária cultivado no período de um ano contribui para a melhoria da qualidade estrutural do solo, mas gera quantidades elevadas de palha, dificultando o estabelecimento de plântulas de soja e podendo interferir negativamente na produtividade. Esse modelo de produção pode ser adequadamente aplicado em sistemas de ILP, nos quais a introdução de animais permite mitigar a quantidade excessiva de palha depositada no solo, facilitando a semeadura da soja em sucessão.

O cultivo de soja em anos com índices pluviométricos bem distribuídos não permite identificar diferenças marcantes de produtividade entre a subsolagem e plantio direto. Esse comportamento pode não ser replicado em situações de menor disponibilidade de água.

O consórcio de braquiária com crotalária influencia positivamente na produtividade da soja em função da melhoria da qualidade da palhada.

A análise integrada das variáveis possibilita a identificação dos principais fatores que afetam o rendimento de grãos de soja, em contraste com os testes univariados, os quais podem não detectar essas influências de forma abrangente.

As alterações ocasionadas pela subsolagem são poucos persistentes, com duração média de seis meses, em Latossolos Vermelhos Distroférricos de textura muito argilosa. O uso da subsolagem não é justificado para esse tipo de solo, por alterar a estrutura do solo e não pronunciar maior produtividade de soja, o que irá resultar num aumento do custo de produção.

REFERÊNCIAS

- AGNIHOTRI, R.; SHARMA, M. P.; PRAKASH, A.; RAMESH, A.; BHATTACHARJYA, S.; PATRA, A. K.; MANNA, M. C.; KURGANOVA, I.; KUZYAKOV, Y. Glycoproteins of arbuscular mycorrhiza for soil carbon sequestration: Review of mechanisms and controls. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 806, p. 1-13, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150571.
- AHMADI, I.; GHOUR, H. Effects of soil moisture content and tractor wheeling intensity on traffic-induced soil compaction. **Journal of Central European Agriculture**, Zagreb, v. 16, n. 4, p. 489–502, 2015.
- AKANMU, A. O.; BABALOLA, O.O.; VENTURI, V.; AYILARA, M. S.; ADELEKE, B.S.; AMOO, A. E.; SOBOWALE, A. A.; FADIJI, A. E.; GLICK, B. R. Plant disease management leveraging on the plant-microbe-soil interface in the biorational use of organic amendments. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, n. 700507, p. 1-13, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.700507.
- ALAOUI, A.; ROGGER, M.; PETH, S.; BLÖSCHL, G. Does soil compaction increase floods? A review. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 557, p. 631-642, 2018. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.12.052
- ANDRUSCHKEWITSCH, R.; KOCH, H. J.; LUDWIG, B. Effect of long-term tillage treatments on the temporal dynamics of water-stable aggregates and on macro-aggregate turnover at three German sites. **Geoderma**, Amsterdam, v. 217–218, p. 57–64, 2014. DOI:10.1016/j.geoderma.2013.10.022.
- AISLABIE, J.; DESLIPPE, J. R. Soil microbes and their contribution to soil services. In: DYMOND, J. R. (ed.). **Ecosystem services in New Zealand: conditions and trends**. Lincoln: Manaaki Whenua Press, 2013. p. 143-161.
- ALMEIDA, R. F. de; NAVES, E. R.; MOTA, R. P. da. Soil quality: Enzymatic activity of β -glucosidase. **Global Journal of Agricultural Research and Reviews**, v. 3, n. 2, p. 146-150, 2015.
- ATKINSON, J. A.; HAWKESFORD, M. J.; WHALLEY, W. R.; ZHOU, H.; MOONEY, S. J. Soil strength influences wheat root interactions with soil macropores. **Plant Cell and Environment**, Chichester, v. 43, n. 1, p. 235–245, 2020.
- ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 4, p. 319–332, 1991.
- BADALÍKOVÁ, B. Influence of Soil Tillage on Soil Compaction. In: DEDOUSIS, A.P.; BARTZANAS, T. (eds.). **Soil Engineering**. Springer: Berlin, 2010. p. 19-30.

BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 53, p. 215-230, 2000.

BALKCOM, K. S.; REEVES, D. W. Sunn-hemp utilized as a legume cover crop for corn production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 1, p. 26–31, 2005.

BALOTA, E. L.; KANASHIRO, M.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 300-306, 2004.

BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. J. de. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. In: ARAÚJO, A.P.; ALVES, B.J.R. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 189-249..

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. AgroEstat: **Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: FCAV/Funep, 2015. 396 p.

BASAL, O.; SZABÓ, A.; VERES, S. Physiology of soybean as affected by PEG-induced drought stress. **Current Plant Biology**, Amsterdam, v. 22, n. 100135, p. 1-8, 2020. DOI: 10.1016/j.cpb.2020.100135.

BATEY, T. Soil compaction and soil management - A review. **Soil Use and Management**, Chichester, v. 25, n. 4, p. 335–345, 2009.

BATIONO, A.; KIHARA, J.; VANLAUWE, B.; WASWA, B.; KIMETU, J. Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 94, n. 1, p. 13–25, 2007. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.08.011.

BATISTA, E. R. B.; ZANCHI, C. S.; FERREIRA, D. A.; SANTIAGO, F. L. de A.; PINTO, F. A.; SANTOS, J. V. dos; PAULINO, H. B.; CARNEIRO, M. A. C. Atributos biológicos do solo em sistema integrado de produção agropecuária. In: SOUZA, E. D.; SILVA, F. D. da; ASSMAN, T. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, P. C. de F.; PAULINO, H. B. (eds.). **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. Tubarão: Copiart, 2018. p. 71-90.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). 1996. 240p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BEGAM, A.; MONDAL, R.; DUTTA, S.; BANERJEE, H. Impact of Cereal+legume Intercropping Systems on Productivity and Soil Health -A Review. **International**

Journal of Bio-resource and Stress Management, Kolkata, v. 11, n. 3, p. 274–286, 2020.

BERDENI, D.; TURNER, A.; GRAYSON, R. P.; LLANOS, J.; HOLDEN, J.; FIRBANK, L. G.; LAPPAGE, M. G.; HUNT, S. P. F.; CHAPMAN, P. J.; HODSON, M. E.; HELGASON, T.; WATT, P. J.; LEAKE, J. R. Soil quality regeneration by grass-clover leys in arable rotations compared to permanent grassland: Effects on wheat yield and resilience to drought and flooding. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 212, p. 1-14, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2021.105037.

BERTOLLO, A. M.; MORAES, M. T. de; FRANCHINI, J. C.; SOLTANGHEISI, A.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; LEVIEN, R.; DEBIASI, H. Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 206, n. 104820, p. 1-11, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104820.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. da C.; SILVA, A. P. da. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 787-794, 2006.

BEYLICH, A.; OBERHOLZER, H.; SCHRADER, S.; HÖPER, H.; WILKE, B. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 109, p. 133-143, 2010. DOI: 10.1016/j.still.2010.05.010

BLANCO-CANQUI, H.; MIKHA, M. M.; PRESLEY, D. R.; CLAASSEN, M. M. Addition of Cover Crops Enhances No-Till Potential for Improving Soil Physical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, n. 4, p. 1471–1482, 2011.

BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 198, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2019.104534.

BONETTI, J. de A.; ANGHINONI, I.; MORAIS, M.T. de; FINK, J.R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, n.174, p. 104-112, 2017.

BONFANTE, P.; GENRE, A. Plants and arbuscular mycorrhizal fungi: an evolutionary-developmental perspective. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 13, n. 9, p. 492-498, 2008. DOI: 10.1016/j.tplants.2008.07.001.

BONONI, L. **Impacto da umidade do solo sobre a estrutura das comunidades bacterianas e sobre as atividades enzimáticas em solo da Caatinga e da Mata Atlântica**. Dissertação (Mestrado em Ciências: Microbiologia Agrícola). 2016. 83 p.

Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba.

BOT, A.; BENITES, J. **The importance of soil organic matter:** Key to drought-resistant soil and sustained food production. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005. 78 p.

BOUWMEESTER, H. J.; ROUX, C.; LOPEZ-RAEZ, J. A.; BÉCARD, G. Rhizosphere communication of plants, parasitic plants and AM fungi. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 12, n. 5, p. 224-230, 2007. DOI: 10.1016/j.tplants.2007.03.009.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. *In*: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. da; REICHERT, J. M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 221-267.

BRANDAN, C. P.; CHAVARRÍA, D.; HUIDOBRO, J.; MERILES, J. M.; BRANDAN, C. P.; VARGAS GIL, S. Influence of a tropical grass (*Brachiaria brizantha* cv. Mulato) as cover crop on soil biochemical properties in a degraded agricultural soil. **European Journal of Soil Biology**, Paris, v. 83, p. 84–90, 2017. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2017.10.009.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1–2, p. 3–22, 2005. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005.

BRUNDRETT, M.; BOUGHER, N.; DELL, B.; GROVE, T.; MALAJCZUK, N. **Working with Mycorrhizas in Forest and Agriculture**. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 1996. 374 p.

BUADE, R.; CHOURASIYA, D.; PRAKASH, A.; SHARMA, M. P. Changes in Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community Structure in Soybean Rhizosphere Soil Assessed at Different Growth Stages of Soybean. **Agricultural Research**, Heidelberg, v. 10, n. 1, p. 32–43, 2021. DOI: 10.1007/s40003-020-00481-4.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 120, p. 105–125, 2018. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

CALVET, C.; PINOCHET, J.; CAMPRUBÍ, A.; ESTAÚN, V.; RODRÍGUEZ-KÁBANA, R. Evaluation of natural chemical compounds against root-lesion and root-knot nematodes and side-effects on the infectivity of arbuscular mycorrhizal fungi. **European Journal of Plant Pathology**, Dordrecht, v. 107, p. 601-605, 2001.

CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. Regression analysis of some factors influencing

soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3–4, p. 167–178, 2001.

CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Sistema de plantio direto: Evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. *In*: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. da; REICHERT, J. M. Tópicos em ciência do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 5, p. 333-370, 2007.

CASTRO, A. M. de; PEREIRA-JUNIOR, N. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 181-188, 2010. DOI: 10.1590/s0100-40422010000100031.

ÇELİK, İ.; GÜNAL, H.; ACAR, M.; ACIR, N.; BEREKET BARUT, Z.; BUDAK, M. Evaluating the long-term effects of tillage systems on soil structural quality using visual assessment and classical methods. **Soil Use and Management**, Chichester, v. 36, n. 2, p. 223–239, 2020. DOI: 10.1111/sum.12554.

CHEN, Y.; TSAI, C.; REKHA, P. D.; GHATE, S. D.; HUANG, H.; HSU, H.; LIAW, L.; YOUNG, C. Agricultural management practices influence the soil enzyme activity and bacterial community structure in tea plantations. **Botanical Studies**, Taipei, v. 62, n. 8, p. 1-13, 2021. DOI: 10.1186/s40529-021-00314-9.

CORREIA, M. E. F.; OLIVEIRA, L. C. M. de. Fauna de solo: aspectos gerais e metodológicos. **Embrapa Agrobiologia**, Seropédica, n. 112, 2000. 46 p.

COSTA, E. M. da; SILVA, H. F.; RIBEIRO, P. R. de A. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. **Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1842-1860, 2013.

CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. Matéria orgânica do solo. *In*: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Org.). **Recurso solo: propriedades e usos**. São Carlos: Cubo, 2015. p. 273-293.

DEBIASI, J. C. F.; FRANCHINI, J. C.; CONTE, O.; BALBINOT-JUNIOR, A. A.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; OLIVEIRA, M. C. N. de. Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja. **Embrapa Soja**, Londrina, n. 342, p. 1-72, 2013. ISSN 2176-2937.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; SILVA JUNIOR, J. P. da; WIETHÖLTER, S.; FAGANELLO, A.; SATTLER, A.; SANTI, A. *In*: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. da (Ed.). **Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. p.185-216.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FANANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N. D.; WIETHÖLTER, S. Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista. **Embrapa Trigo**, Passo Fundo, n. 141, p. 1-15, 2012.

DERPSCH, R. Historical review of no-tillage cultivation of crops. *In: THE 1st JIRCAS SEMINAR ON SOYBEAN RESEARCH*, 1., 1998, Foz do Iguassu. **Anais...** Foz do Iguassu: JIRCAS Working Report, 1998.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T. Development and current status of no-till adoption in the world. *In: 18th TRIENNIAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANIZATION*, 18., 2009, Izmir. **Anais...** Izmir: Soil Tillage Research Organization, 2009.

DIAS-JUNIOR, M. de S.; Compactação do solo. *In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (eds.). Tópicos em ciência do solo*. Vol. 1. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 54-94.

DICK, R. P.; BREACKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. *In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (eds.). Methods for assessing soil quality*. Madision: SSSA, 1996. p. 247-271.

DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica. *In: MELO, V. de F.; ALLEONI, R. F. (ed.). Química e mineralogia do solo. Conceitos básicos e aplicações*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 697-763.

DOU, F.; WRIGHT, A. L.; MYLAVARAPU, R. S.; JIANG, X.; MATOCHA, J. E. Soil Enzyme Activities and Organic Matter Composition Affected by 26 Years of Continuous Cropping. **Pedosphere**, Beijing, v. 26, n. 5, p. 618–625, 2016. DOI: 10.1016/S1002-0160(15)60070-4.

DU, Y.; ZHAO, Q.; CHEN, L.; YAO, X.; XIE, F. Effect of drought stress at reproductive stages on growth and nitrogen metabolism in soybean. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 2, p. 1-21, 2020.

DUCHENE, O.; VIAN, J. F.; CELETTE, F. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 240, p. 148–161, 2017. DOI: 10.1016/j.agee.2017.02.019.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 20, n. 5, p. 601-606, 1988.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; BAILEY, B. A. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, n. 20, p. 2733–2757, 2005.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of Soybean Development. **Special Report**, Ames, n. 80, p. 1-12, 1977.

FRANCHINI, J. C.; BALBINOT-JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; CONTE, O. Desempenho da soja em consequência de manejo de pastagem, época de dessecação e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 12, p.1131-1138, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015001200002.

FRANZLUEBBERS, A. J. Grass roots of soil carbon sequestration. **Carbon Management**, Abingdon, v. 3, n. 1, p. 9–11, 2012.

FURLANI, C. E. A.; ZERBATO, C. **Operações e manutenção de escarificadores e subsoladores**. Curitiba: SENAR AR-PR, 2020. 67 p.

GALDOS, M. V.; BROWN, E.; ROSOLEM, C. A.; PIRES, L. F.; HALLETT, P. D.; MOONEY, S. J. Brachiaria species influence nitrate transport in soil by modifying soil structure with their root system. **Scientific Reports**, London, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2020.

GAO, W.; REN, T.; BENGOUGH, A. G.; AUNEAU, L.; WATTS, C. W.; WHALLEY, W. R. Predicting Penetrometer Resistance from the Compression Characteristic of Soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, n. 2, p. 361–369, 2012.

GAO, W.; WANG, P.; WU, Q. Functions and Application of Glomalin-Related Soil Proteins: A Review. **Sains Malaysiana**, Bangi, v. 48, n. 1, p. 111-119, 2019.

GARDNER, T. G.; SENWO, Z. N. Enzymatic hydrolysis of an organic sulfur compound. **Advances in Enzyme Research**, Irvine, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2019. DOI: 10.4236/aer.2019.71001.

GIAROLA, N. F. B.; DA SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; BALL, B.; ROSA, J. A. Avaliação visual da qualidade da estrutura do solo em Latossolos sob sistema plantio direto. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 479–482, 2010.

GIAROLA, N. F. B.; DA SILVA, Álvaro P.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C. On the Visual Evaluation of Soil Structure: The Brazilian experience in Oxisols under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 127, p. 60–64, 2013. DOI: 10.1016/j.still.2012.03.004.

GICHANGI, E. M.; NJARUI, D. M. G.; GHIMIRE, S. R.; GATHERU, M.; MAGIROI, K. W. N. Effects of cultivated Brachiaria grasses on soil aggregation and stability in the semi-arid tropics of Kenya. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, Merida, v. 19, n. 2, p. 205–217, 2016.

GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. **New Phytologist**, Oxford, v. 84, n. 3, p. 489-500, 1980.

GLAZE-CORCORAN, S.; HASHEMI, M.; SADEGHPOUR, A.; JAHANZAD, E.; KESHAVARZ AFSHAR, R.; LIU, X.; HERBERT, S. J. Understanding intercropping to improve agricultural resiliency and environmental sustainability. **Advances in Agronomy**, Maryland Heights, v. 162, p. 200-256, 2020. DOI: 10.1016/bs.agron.2020.02.004.

GMACH, M. R.; CHERUBIN, M. R.; KAISER, K.; CERRI, C. E. P. Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 77, n. 3, 2020. DOI: 10.1590/1678-992X-2018-0164.

GRANDY, A. S.; ROBERTSON, G. P. Aggregation and Organic Matter Protection Following Tillage of a Previously Uncultivated Soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 4, p. 1398–1406, 2006. DOI: 10.2136/sssaj2005.0313.

GRZESIAK, S.; GRZESIAK, M.T.; HURA, T.; MARCINSKA, I.; RZEPKA, A. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 88, p. 2-10, 2013. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.01.010.

GU, S.; WU, S.; GUAN, Y.; ZHAI, C.; ZHANG, Z.; BELLO, A.; GUO, X.; YANG, W. Arbuscular mycorrhizal fungal community was affected by tillage practices rather than residue management in black soil of northeast China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 198, n. 104552, p. 1-9, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2019.104552

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, Chichester, v. 27, n. 3, p. 395–403, 2011.

GUIMARÃES, R. M. L.; NEVES JUNIOR, A. F.; SILVA, W. G.; ROGERS, C. D.; BALL, B. C.; MONTES, C. R.; PEREIRA, B. F. F. The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 173, p. 75–82, 2017. DOI: 10.1016/j.still.2016.10.014.

GUO, Y.; FAN, R.; ZHANG, X.; ZHANG, Y.; WU, D.; MCLAUGHLIN, N.; ZHANG, S.; CHEN, X.; JIA, S.; LIANG, A. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 703, n. 4888, p. 1-9, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134617.

HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil Compaction. *In*: LAL, R.; BLUM, W.E.H.; VALENTIN, C.; STEWART, B.A. **Methods for Assessment of Soil Degradation**. CRC Press: Boca Raton, 1997. p. 167-179.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2005.

HEATON, E.; VOIGT, T.; LONG, S. P. A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 27, n. 1, p. 21–30, 2004. DOI: 10.1016/j.biombioe.2003.10.005.

HEIJDEN, M. G. A. van der; MARTIN, F. M.; SELOSSE, M. A.; SANDERS, I. R. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. **New Phytologist**, Chichester, v. 205, p. 1406-1423, 2015. DOI: 10.1111/nph.13288.

HERNANI, L. C. Perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão: dez anos de pesquisa. **Embrapa Agropecuária Oeste**, Dourados, n. 2, 1999. 14 p.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 2003. 493 p.

HODGE, A.; BERTA, G.; DOUSSAN, C.; MERCHAN, F.; CRESPI, M. Plant root growth, architecture, and function. **Plant Soil**, Dordrecht, n. 321, p. 153-187, 2009.

HODGE, A.; STORER, K. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: implications for individual plants through to ecosystems. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 386, p. 1-19, 2015. DOI: 10.1007/s11104-014-2162-1.

HOLÁTKO, J.; BRTNICKÝ, M.; KUCERÍK, J.; KATIONAVÁ, M.; ELBL, J.; KINTL, A.; KYNICKÝ, J.; BENADA, O.; DATTA, R.; JANSÁ, J. Glomalin – Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 153, p. 1-11, 2021. DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.108116.

HOSSAIN, M. B. Glomalin and contribution of glomalin to carbon sequestration in soil: a review. **Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 191-196, 2021. DOI: 10.24925/turjaf.v9i1.191-196.3803.

HYDBOM, S.; OLSSON, P. A. Biochemical signatures reveal positive effects of conservation tillage on arbuscular mycorrhizal fungi but not on saprotrophic fungi and bacteria. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 157, p. 1-8, 2021. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103765.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. DA; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493–1500, 2000.

JANSÁ, J.; SMITH, F.A.; SMITH, S.E. Are there benefits of simultaneous root colonization by different arbuscular mycorrhizal fungi? **New Phytologist**, Chichester, v. 177, p. 779-789, 2008.

JIN, K.; SLEUTEL, S.; BUCHAN, D.; DE NEVE, S.; CAI, D. X.; GABRIELS, D.; JIN, J. Y. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 115–120, 2009. DOI: 10.1016/j.still.2009.02.004.

JIN, K.; SHEN, J.; ASHTON, R. W.; DODD, I. C.; PARRY, M. A.; WHALLEY, R. How do roots elongate in a structured soil? **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 64, n. 15, p. 4761-4777, 2013. DOI: 10.1093/jxb/ert286.

KABIR, Z. Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 85, n. 1, p. 23-29, 2005. DOI: 10.4141/P03-160.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: Why and how?. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, n. 4, p. 145–156, 2003.

KARLEN, D. L.; EASH, N. S.; UNGER, P. W. Soil and crop management effects on soil quality indicators. **American Journal of Alternative Agriculture**, Cambridge, v. 7, n. 1–2, p. 48–55, 1992.

KHATOON B, H. G.; KHATOON, H.; SOLANKI, P.; NARAYAN, M.; TEWARI, L.; RAI, J.; HINA KHATOON, C. Role of microbes in organic carbon decomposition and maintenance of soil ecosystem. **International Journal of Chemical Studies**, New Delh, v. 5, n. 6, p. 1648–1656, 2017.

KOIDE, R. T.; MOSSE, B. A history of research on arbuscular mycorrhiza. **Mycorrhiza**, Heidelberg, v. 14, p. 145-163, 2004. DOI: 10.1007/s00572-004-0307-4.

KORNECKI, T. S.; BALKCOM, K. S. Organic kale and cereal rye grain production following a sunn hemp cover crop. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 12, p. 1-16, 2020.

KUANG, B.; MAHMOOD, H. S.; QURASHI, M. Z.; HOOGMOED, W. B.; MOUAZEN, A. M.; VAN HENTEN, E. J. Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line. A review. **Advances in Agronomy**, Maryland Heights, v. 114, p. 155-223, 2012. DOI: 10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1.

LAL, R. Degradation and resilience of soils. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, London, v. 352, n. 1356, p. 997–1010, 1997.

LEITE, L. F. C. **Matéria Orgânica do solo**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2004. 31p.

LI, Y.; ZHANG, Q.; CAI, Y.; YANG, Q.; CHANG, S. X. Minimum tillage and residue retention increase soil microbial population size and diversity: Implications for conservation tillage. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 716, p. 1-9, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137164.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O. da; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 45-55, 2012. DOI: 10.1590/s0100-06832012000100004.

LOPES, A. A. de C. **Interpretação de indicadores microbiológicos em função da matéria orgânica do solos e dos rendimentos de soja e milho**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). 2012. 96 p. Universidade de Brasília, Faculdade e Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília.

LOPES, A. A. de C.; SOUSA, D. M. G. de; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. de C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 2, p. 461-472, 2013. DOI: 10.2136/sssaj2012.0191.

LÓPEZ-GARRIDO, R.; MADEJÓN, E.; LEÓN-CAMACHO, M.; GIRÓN, I.; MORENO, F.; MURILLO, J. M. Reduced tillage as an alternative to no-tillage under Mediterranean conditions: A case study. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 40–47, 2014. DOI: 10.1016/j.still.2014.02.008.

MAHL, D.; DA SILVA, R. B.; GAMERO, C. A.; SILVA, P. R. A. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto escarificado. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 5, p. 741–747, 2008. DOI: 10.4025/actasciagron.v30i5.5976.

MAKOL, J. H. J. R.; NDAKIDEMI, P. A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem. **African Journal of Biotechnology**, Sapele, v. 7, n. 3, p. 181-191, 2008.

MANGALASSERY, S.; MOONEY, S. J.; SPARKES, D. L.; FRASER, W. T.; SJÖGERSTEN, S. Impacts of zero tillage on soil enzyme activities, microbial characteristics and organic matter functional chemistry in temperate soils. **European Journal of Soil Biology**, Paris, v. 68, p. 9–17, 2015. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2015.03.001.

MARTINO, D. L.; SHAYKEWICH, C. F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 74, n. 2, p. 193–200, 1994.

MARTUCCI, F.C. Escarificador no preparo do solo. **A Granja**, Porto Alegre, v.16, n. 6, p. 44-46, 1985.

MATUSSO, J. M. M.; MUGWE, J. N.; MUCHERU-MUNA, M. Potential role of cereal-legume intercropping systems in integrated soil fertility management in smallholder farming systems of Sub-Saharan Africa. **Research Journal of Agriculture and Environmental Management**, Abuja, v. 3, n. 3, p. 162–174, 2014.

MENDES, I. de C.; REIS JUNIOR, F. B. dos. Uso de parâmetro microbiológicos como indicadores para avaliar a qualidade do solo e a sustentabilidade dos agroecossistemas. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, n. 112, p. 1-34, 2004.

MENDES, I. de C.; SOUSA, D. M. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; LOPES, A. A. de C. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, n. 38, p 1-23, 2018.

MENDES, I de C.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; SOUSA, D.M. de S.; DANTAS, O.D.; MALAQUIAS, J.V. Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, n. 369, p. 1-50, 2021.

MENEZES, L. A. S.; LEANDRO, W. M.; DE OLIVEIRA, J. P.; DE FERREIRA, A. C. B.; DAS SANTANA, J. G.; BARROS, R. G. Produção de fitomassa de diferentes espécies, isoladas e consorciadas, com potencial de utilização para cobertura do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 25, n. 1, p. 7–12, 2009.

MEROTTO-JUNIOR., A.; MUNDSTOCK, C. M. Crescimento de raízes de trigo afetado pela resistência mecânica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 197–202, 1999.

MEZA, K.; VANEK, S. J.; SUELDO, Y.; OLIVERA, E.; SCURRAH, M.; FONTE, S. J. Grass – Legume Mixtures Show Potential to Increase Above- and Belowground Biomass Production for Andean Forage-Based Fallows. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 142, p.1-20, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12010142.

MHLANGA, B.; PELLEGRINO, E.; THIERFELDER, C.; ERCOLI, L. Conservation agriculture practices drive maize yield by regulating soil nutrient availability, arbuscular mycorrhizas, and plant nutrient uptake. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 277, p. 1-14, 2022. DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108403

MOITINHO, M. R.; FERNANDES, C.; TRUBER, P. V.; MARCELO, A. V.; BICALHO, S. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation in a no-tillage system with crop rotation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 189, p. 482–491, 2020. DOI: 10.1002/jpln.201900456.

MONCADA, M. A. P. **Integrated assessment of soil structural quality**. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas Aplicadas). 2014. 214 p. Universidade de Ghent, Bélgica.

MORAES, M. T. de; SILVA, V. da; ZWIRTES, A. L.; CARLESSO, R. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 179-193, 2014.

MOSJIDIS, J. A.; WEHTJE, G. Weed control in sunn hemp and its ability to suppress weed growth. **Crop Protection**, Amsterdam, v. 30, n. 1, p. 70–73, 2011. DOI: 10.1016/j.cropro.2010.08.021.

MUJDECI, M.; ALI ISILDAR, A.; UYGUR, V.; ALABOZ, P.; UNLU, H.; SENOL, H. Cooperative effects of field traffic and organic matter treatments on some compaction-related soil properties. **Solid Earth**, Goettingen, v. 8, n. 1, p. 189–198, 2017.

NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 33, n. 2, p. 291–309, 2013.

NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Indicadores microbiológicos da qualidade do solo. In: REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, 3., 2013, Londrina. Sistemas conservacionistas de produção e sua interação com a Ciência do Solo. **Resumos...** Londrina: IAPAR, 2013. p.539-544.

NUNES, M. R.; KARLEN, D. L.; MOORMAN, T. B. Tillage intensity effects on soil structure indicators – A US meta-analysis. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 2071, p. 1-17, 2020. DOI: 10.3390/su12052071.

OGUIKE, P. C.; MBAGWU, J. S. C. Variations in Some Physical Properties and Organic Matter Content of Soils of Coastal Plain Sand under Different Land Use Types. **World Journal of Agricultural Sciences**, Dubai, v. 5, n. 1, p. 63–69, 2009.

OHTOMO, R.; MORIMOTO, S.; NAGAOKA, K.; KARASAWA, T.; NAKAMURA, T.; OKA, N. Predicting arbuscular mycorrhizal fungal colonization of soybean in farmers' fields by using infection unit density. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 69, n. 1, p. 10–18, 2023. DOI: 10.1080/00380768.2022.2153345.

OLANDINI, É.; NASCIMENTO, M. M. B.; MACEDO, R. S.; SOUZA, R. F. S.; SOUZA, S. L.; SOUSA, C. S.; LAMBAIS, G. R.; BAKKER, A. P. Atividade microbiana e carbono orgânico do solo em agroecossistemas sob diferentes manejos no semiárido paraibano. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, Aquidaba, v. 12, n. 8, p. 412-427, 2021. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0035.

OLIVEIRA, F. C. C.; FERREIRA, G. W. D.; SOUZA, J. L. S.; VIEIRA, M. E. O.; PEDROTTI, A. Soil physical properties and soil organic carbon content in northeast Brazil: long-term tillage systems effects. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 77, n. 4, p. 1-6, 2020.

OLUBANJO, O. O.; YESSOUFOU, M. A. Effect of Soil Compaction on the Growth and Nutrient Uptake of Zea Mays L. **Sustainable Agriculture Research**, Beaver Creek, v. 8, n. 2, p. 46, 2019.

OSMAN, K. T. Physical Deterioration of Soil. Soil. In: OSMAN, K.T. **Degradation, Conservation and Remediation**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 45-67.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 201–210, 2011. DOI: 10.1016/j.still.2011.10.005.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 131–143, 2004.

PANETTIERI, M.; KNICKER, H.; BERNIS, A. E.; MURILLO, J. M.; MADEJÓN, E. Moldboard plowing effects on soil aggregation and soil organic matter quality assessed by ^{13}C CPMAS NMR and biochemical analyses. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 177, p. 48–57, 2013. DOI: 10.1016/j.agee.2013.05.025.

PASSOS, A. M. A. dos; ALVARENGA, R. C.; SANTOS, F. C. dos. Sistema de Plantio Direto. In: NOBRE, M. M.; OLIVEIRA, I. R. de (Ed.). **Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação**. Brasília: Embrapa, 2018. p. 61-104.

PAULA, A. M. de. Micorrizas arbusculares. In: DIONÍSIO, J. A.; PIMENTEL, I. C.; SIGNOR, D.; PAULA, A. M. de; MACEDA, A.; MATTANA, A. L. **Guia prático de biologia do solo**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2016. p. 33-42.

PAZUTTI, L. V. B.; CHAER, G. M. Desenvolvimento de metodologia de baixo custo para análise de β -glicosidase em solos. **Embrapa Agrobiologia**, Seropédica, n. 92, 23 p., 2012.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, L. de C. M. da; MELO, L. B. B. de; AZEVEDO, R. P.; ARAÚJO, B. C. L.; CARVALHO, T. S. de; MOREIRA, S. G.; CURI, N.; SILVA, B. M. Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 745, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140887.

PELLEGRINO, E.; GAMPER, H. A.; CICCOLINI, V.; ERCOLI, L. Forage Rotations Conserve Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Soil Fertility. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, n. 2969, p. 1-17, 2020. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02969.

PERALTA, G.; ALVAREZ, C. R.; TABOADA, M. A. Soil compaction alleviation by deep non-onversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 211, p. 1-12, 2021.

PHAM, T. G.; NGUYEN, H. T.; KAPPAS, M. Assessment of soil quality indicators under different agricultural land uses and topographic aspects in Central Vietnam. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 6, n. 4, p. 280–288, 2018. DOI: 10.1016/j.iswcr.2018.08.001.

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; ROSA, J. A.; COOPER, M.; HECK, R. J.; PASSONI, S.; ROQUE, W. L. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 165, p. 66–79, 2017. DOI: 10.1016/j.still.2016.07.010.

POSSAMAI, E. J.; CONCEIÇÃO, P. C.; AMADORI, C.; BARTZ, M. L. C.; RALISCH, R.; VICENSI, M.; MARX, E. F. Adoption of the no-tillage system in Paraná State: A (re)view. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, p. 1-24, 2022. DOI: 10.36783/18069657rbc20210104.

PRIMIERY, S.; SANTOS, J. C. P.; ANTUNES, P. M. Nodule-associated bacteria alter the mutualism between arbuscular mycorrhizal fungi and N_2 fixing bacteria. **Soil**

Biology and Biochemistry, Oxford, v. 154, p. 1-7, 2021. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108149.

PULIDO-MONCADA, M.; KATUWAL, S.; REN, L.; CORNELIS, W.; MUNKHOLM, L. Impact of potential bio-subsoilers on pore network of a severely compacted subsoil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 363, p. 1-11, 2020. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114154.

PULROLNIK, K. Transformações do carbono no solo. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, n. 264, p. 1-36, 2009.

PURCENA, L. L. A. **Prospecção de enzimas de solo de Cerrado sob cultivo de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Biologia). 2014. 103 p. Universidade Federal de Goiás, Instituto de Ciências Biológicas, Goiânia.

RAFFA, D. W.; BOGDANSKI, A.; TITTONELL, P. How does crop residue removal affect soil organic carbon and yield? A hierarchical analysis of management and environmental factors. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 81, p. 345-355, 2015. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.07.022.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELHO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A.L. da S.; BONA, F.D. de. Diagnóstico rápido da estrutura do solo – DRES. **Embrapa Soja**, Londrina, n. 390, 2017. 64 p.

RANAIVOSON, L.; NAUDIN, K.; RIPOCHE, A.; AFFHOLDER, F.; RABEHARISOA, L.; CORBEELS, M. Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 37, n. 26, p. 1-17, 2017.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v. 42, n. 4, p. 259–280, 2005.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: LIER, Q. de J. (ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 29-102.

RILLIG, M. C.; MUMMEY, D. L. Mycorrhizas and soil structure. **New Phytologist**, Chichester, v. 171, p. 41-53, 2006. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x.

ROLDÁN, A.; SALINAS-GARCÍA, J. R.; ALGUACIL, M. M.; CARAVACA, F. Soil sustainability indicators following conservation tillage practices under subtropical maize and bean crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 2, p. 273–282, 2007. DOI: 10.1016/j.still.2006.05.001.

ROSCOE, R.; BODDEY, R. M.; SALTON, J. C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M.; SALTON, J.C. **Dinâmica da**

Matéria Orgânica em Sistema Conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 17-42.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C. Phosphorus and potassium budget in the soil–plant system in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 126, p. 127–133, 2013. DOI:10.1016/j.still.2012.08.003.

ROSOLEM, C. A.; PIVETTA, L. A. Mechanical and biological approaches to alleviate soil compaction in tropical soils: assessed by root growth and activity (Rb uptake) of soybean and maize grown in rotation with cover crops. **Soil Use and Management**, Chichester, v. 33, n. 1, p. 141–152, 2017. DOI: 10.1111/sum.12313.

SÁ, M. A. C. de; SANTOS-JUNIOR, J. de D. G. dos. Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, n. 136, p. 1-25, 2005.

SALINAS, J.; MECA, D.; DEL MORAL, F. Short-term effects of changing soil management practices on soil quality indicators and crop yields in greenhouses. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 4, p. 1-18, 2020.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. Sistema radicular de plantas e qualidade do solo. **Embrapa Agropecuária Oeste**, Dourados, n. 198, p. 1-5, 2014.

SAMBA, R. T.; SYLLA, S. N.; NEYRA, M.; GUEYE, M.; DREYFUS, B.; NDOYE, I. Biological nitrogen fixation in *Crotalaria* species estimated using the ¹⁵N isotope dilution method. **African Journal of Biotechnology**, Sapele, v. 1, n. 1, p. 17-22, 2002.

SÁNCHEZ, J. D. L.; CANABAL, V. A. G.; ARMBRECHT, I. Longitud del micélio y glomalina de micorrizas arbusculares: agregación del suelo em bosques y agroecosistemas andinos. **Acta Agronómica**, Palmira, v. 71, n. 2, p. 139-147, 2022. DOI: 10.15446/acag.v71n2.101536.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO-FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018. 356 p.

SATIRO, L. S.; CHERUBIN, M. R.; SAFANELLI, J. L.; LISBOA, I. P.; ROCHA JUNIOR, P. R. da; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 11, p. 86–95, 2017. DOI: 10.1016/j.geodrs.2017.10.005.

SCHNEIDER, F.; DON, A.; HENNINGS, I.; SCHMITTMANN, O.; SEIDEL, S. J. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know?. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 174, p. 193–204, 2017. DOI: 10.1016/j.still.2017.07.005.

SCHÜLER, A.; SCHWARZOTT, D.; WALKER, C. A new fungal phylum, the *Glomeromycota*: phylogeny and evaluation. **Mycological Research**, London, v. 105, n. 12, p. 1413-1421, 2001.

SHAH, A. N.; TANVEER, M.; SHAHZAD, B.; YANG, G.; FAHAD, S.; ALI, S.; BUKHARI, M. A.; TUNG, S. A.; HAFEEZ, A.; SOULIYANONH, B. Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 24, n. 11, p. 10056–10067, 2017.

SHAH, K. K.; MODI, B.; PANDEY, H. P.; SUBEDI, A.; ARYAL, G.; PANDEY, M.; SHRESTHA, J. Diversified Crop Rotation: An Approach for Sustainable Agriculture Production. **Advances in Agriculture**, London, v. 21, p. 1-9, 2021. DOI: 10.1155/2021/8924087

SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S. A. A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. **Journal of Biosystems Engineering**, Heidelberg, v. 46, n. 4, p. 417–439, 2021. DOI: 10.1007/s42853-021-00117-7

SHUKLA, S. K.; JAISWAL, V. P.; SHARMA, L.; PATHAK, A. D.; SINGH, A. K.; GUPTA, R.; AWASTHI, S. K.; GAUR, A.; ZUBAIR, A.; TIWARI, R. Sugarcane yield using minimum tillage technology through subsoiling: beneficial impact on soil compaction, carbon conservation and activity of soil enzymes. **Sugar Tech**, New Delh, v. 22, n. 6, p. 987-1006, 2020.

SINGH, P. K.; SINGH, M.; TRIPATHI, B. N. Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. **Protoplasma**, Vienna, v. 250, p. 663-669, 2013. DOI 10.1007/s00709-012-0453-z.

SINGER, M. Physical degradation of soils. In: SCALENGHE, R.; CERTINI, G. **Soils: basic concepts and future challenges**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. p. 223-234. DOI:10.1017/CBO9780511535802.017.

SPERA, S. T.; MAGALHÃES, C. A. S.; CHITARRA, L. G.; GALBIERI, R.; ZOLIN, C. A. Escarificação em áreas de lavouras e pastagens em Mato Grosso: quando e como efetuar. **Embrapa Agrossilvipastoril**, Sinop, n. 4, p. 1-23, 2018.

SPOOR, G. Alleviation of soil compaction: Requirements, equipment and techniques. **Soil Use and Management**, Chichester, v. 22, n. 2, p. 113–122, 2006.

STOTT, D. E.; ANDREWS, S. S.; LIEBIG, M. A.; WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L. Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 74, n. 1, p. 107-119, 2010. DOI: 10.2136/sssaj2009.0029.

STEPONAVIČIENĖ, V.; BOGUŽAS, V.; SINKEVICIENE, A.; SKINULIENE, L. VAISVALAVICIUS, R.; SINKEVICIUS, A. Soil water capacity, poro size distribution, and CO₂ emission in different soil tillage systems and straw retention. **Plants**, Basel, v. 11, n. 614, p. 1-14, 2022.

SUL, W. J.; ASUMING-BREMPONG, S.; WANG, Q.; TOURLOUSSE, D. M.; PENTON, C. R.; DENG, Y.; RODRIGUES, J. L. M.; ADIKU, S. G. K.; JONES, J. W.; ZHOU, J.; COLE, J. R.; TIEDJE, J. M. Tropical agricultural land management

influences on soil microbial communities through its effect on soil organic carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 65, p. 33–38, 2013. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.05.007.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 225-229, 1970.

TAURO, T. P.; NEZOMBA, H.; MTAMBANENGWE, F.; MAPFUMO, P. Germination, field establishment patterns and nitrogen fixation of indigenous legumes on nutrient-depleted soils. **Symbiosis**, Dordrecht, v. 48, p. 92-101, 2009.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Empresa Solos, 2017. 574 p.

THORSØEA, M. H.; NOE, E. B.; LAMANDÉ, M.; FRELIH-LARSEN, A.; KJELDSSEN, C.; ZANDERSEN, M.; SCHJØNNING, P. Sustainable soil management - Farmers' perspectives on subsoil compaction and the opportunities and barriers for intervention. **Land Use Policy**, Oxford, v. 86, p. 427-437, 2019. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.05.017.

TRIPATHI, M. K.; CHAUDHARY, B.; SINGH, S. R.; BHANDARI, H. R. Growth and yield of sunnhemp (*Crotalaria juncea* L.) as influenced by spacing and topping practices. **African Journal of Agricultural Research**, Sapele, v. 8, n. 28, p. 3744–3749, 2013. DOI: 10.5897/AJAR12.6919.

VANDERHASSELT, A.; COOL, S.; D'HOSE, T.; CORNELIS, W. How tine characteristics of subsoilers affect fuel consumption, penetration resistance and potato yield of a sandy loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 228, p. 1-12, 2023. DOI: 10.1016/j.still.2022.105631.

VAZ, D. de O. **Estudo das interações de íons metálicos divalente com ácidos fúlvicos extraídos das águas do rio Suwannee**. Tese (Doutorado em Química). 2006. 79 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

VEIGA, M. da; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 104-113, 2007. DOI: 10.1016/j.still.2006.01.008.

VERCHOT, L. V.; BORELLI, T. Application of para-nitrophenol (pNP) enzyme assays in degraded tropical soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 37, p. 625-633, 2005.

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Umidade atual. *In*: Teixeira, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 29-31.

VLCEK, V.; POHANKA, M. Glomalin – an interesting protein part of the soil organic matter. **Soil and Water Research**, Prague, v. 15, n. 2, p. 67-74, 2020. DOI: 10.17221/29/2019-SWR.

WANG, X.; QI, J. Y.; ZHANG, X. Z.; LI, S. S.; LATIF VIRK, A.; ZHAO, X.; XIAO, X. P.; ZHANG, H. L. Effects of tillage and residue management on soil aggregates and associated carbon storage in a double paddy cropping system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, p. 1-9, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.104339.

WENDEL, A. S.; BAUKE, S. L.; AMELUNG, W.; KNIEF, C. Root-rhizosphere-soil interactions in biopores. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 475, n. 2, p. 253–277, 2022. DOI: 10.1007/s11104-022-05406-4.

WILKES, T. I.; WARNER, D. J.; EDMONDS-BROWN, V.; DAVIES, K. G.; DENHOLM, I. Zero tillage systems conserve arbuscular mycorrhizal fungi, enhancing soil glomalin and water stable aggregates with implications for soil stability. **Soil Systems**, Basel, v. 5, n. 1, p. 1–13, 2021. DOI: 10.3390/soilsystems5010004.

WILLIS, A.; RODRIGUES, B. F.; HARRIS, P. J. C. The ecology of arbuscular mycorrhizal fungi. **Critical reviews in plant sciences**, v. 32, n. 1, p. 1-20, 2013. DOI: 10.1080/07352689.2012.683375.

WILLEKENS, K.; VANDECASTEELE, B.; BUCHAN, D.; DE NEVE, S. Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 82, p. 61–71, 2014. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.05.009.

WIPF, D.; KRAJINSKI, F.; TUINEN, D. van; RECORBET, G.; COURTY, P.E. Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks. **New Phytologist**, Chichester, v. 223, p. 1127-1142, 2019. DOI: 10.1111/nph.15775.

WILPISZESKI, R. L.; AUFRECHT, J. A.; RETTERER, S. T.; SULLIVAN, M. B.; GRAHAM, D. E.; PIERCE, E. M.; ZABLOCKI, O. D.; PALUMBO, A. V.; ELIAS, D. A. Soil Aggregate Microbial Communities: Towards Understanding Microbiome Interactions at Biologically Relevant Scales. **Applied and environmental microbiology**, Washington, v. 85, n. 14, p. 1-18, 2019.

XU, P.; ZHU, J.; WANG, H.; SHI, L.; ZHUANG, Y.; FU, Q.; CHEN, J.; HU, H.; HUANG, Q. Regulation of soil aggregate size under different fertilizations on dissolved organic matter, cellobiose hydrolyzing microbial community and their roles in organic matter mineralization. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 755, p. 1-11, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142595.

YANG, P.; DONG, W.; HEINEN, M.; QIN, W.; OENEMA, O. Soil Compaction Prevention, Amelioration and Alleviation Measures Are Effective in Mechanized and Smallholder Agriculture: A Meta-Analysis. **Land**, Basel, v. 11, n. 5, p. 1-18, 2022.

ZHANG, W.; LI, S.; XU, Y.; WANG, Y.; LIU, X.; PENG, C.; WANG, J. Residue incorporation enhances the effect of subsoiling on soil structure and increases SOC accumulation. **Journal of Soils and Sediments**, Heidelberg, v. 20, p. 3537-3547, 2020. DOI: 10.1007/s11368-020-02680-6.

ZHAO, J.; ZENG, Z.; HE, X.; CHEN, H.; WANG, K. Effects of monoculture and mixed culture of grass and legume forage species on soil microbial community structure under different levels of nitrogen fertilization. **European Journal of Soil Biology**, Paris, v. 68, p. 61–68, 2015. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2015.03.008.

ZHENG, J. Y.; ZHAO, J. S.; SHI, Z. H.; WANG, L. Soil aggergates are key factors that regulate erosion-related carbon loss in citrus orchards of southern China: Bare land vs. grass-covered land. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 309, p. 1-9, 2021. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107254.

ZHOU, M.; LIU, C.; WANG, J.; MENG, Q.; YUAN, Y.; MA, X.; LIU, X.; ZHU, Y.; DING, G.; ZHANG, J.; ZENG, X.; DU, W. Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. **Scientific Reports**, London, v. 10, n. 1, p. 1–13, 2020. DOI: 10.1038/s41598-019-57193-1.