

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**BIOMASSA MICROBIANA E RESISTÊNCIA DO SOLO À
PENETRAÇÃO EM FUNÇÃO DO CONSÓRCIO DE MILHO E
Brachiaria spp. NA PRODUTIVIDADE DA SOJA**

MAURÍCIO ROCHA KINTSCHEV

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2021**

**BIOMASSA MICROBIANA E RESISTÊNCIA DO SOLO À
PENETRAÇÃO EM FUNÇÃO DO CONSÓRCIO DE MILHO E
Brachiaria spp. NA PRODUTIVIDADE DA SOJA**

MAURÍCIO ROCHA KINTSCHEV
Engenheiro Agrônomo, Mestre em Produção Vegetal

Orientador: PROF. DR. LUIZ CARLOS FERREIRA DE SOUZA

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

**Dourados
Mato Grosso do Sul
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

K56b Kintschev, Maurício Rocha

Biomassa microbiana e resistência do solo à penetração em função do consórcio de milho e *Brachiaria* spp. na produtividade da soja [recurso eletrônico] / Maurício Rocha Kintschev. -- 2021.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira de Souza.

Coorientadora: Profa. Dra. Elaine Reis Pinheiro Lourente.

Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2021.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Cobertura do solo. 2. Qualidade do solo. 3. *Glycine max* (L.) Merrill. I. Souza, Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira De. II. Lourente, Profa. Dra. Elaine Reis Pinheiro. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo autor.

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

**BIOMASSA MICROBIANA E RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM
FUNÇÃO DO CONSÓRCIO DE MILHO E *Brachiaria* spp. NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

por

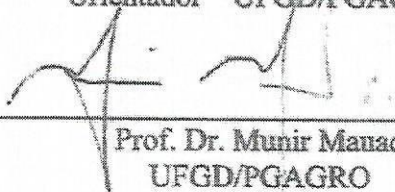
Maurício Rocha Kintschev

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
DOUTOR EM AGRONOMIA

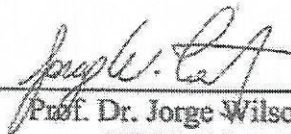
Aprovada em: 01/10/2021



Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira de Souza
Orientador – UFGD/PGAGRO



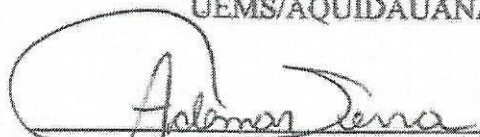
Prof. Dr. Munir Manad
UFGD/PGAGRO



Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez
UFGD/PGAGRO



Prof. Dr. Elói Panachuki
UEMS/AQUIDAUANA



Prof. Dr. Ademar Pereira Serra
EMBRAPA/Gado de Corte

DEDICATÓRIA

A minha esposa, Danieli Nogueira da Silva, as minhas filhas, Aurora e Helena, pelo amor, carinho, apoio, razão de minha vida e sem as quais este esforço não seria realizado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar fé, saúde, força e me guiar nesta jornada e à minha família pelo apoio recebido.

À Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela oportunidade de aperfeiçoamento da minha vida profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e consentimento de bolsa de estudos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira de Souza, um exemplo de profissional, por ter aceitado me orientar e pelo apoio para a realização deste trabalho.

À minha coorientadora, Prof.^a Dr.^a Elaine Reis Pinheiro Lourente, um exemplo de profissional, por ter aceitado me coorientar e pelo apoio para a realização deste trabalho.

Aos colegas de curso, Diandra Pinto Della Flora, Gabriel Luiz Piati, Fabrícia da Silva Ramos, Jucimar Ferreira Neves e Wander Cardoso Valim, pelo auxílio na condução do experimento.

Aos colegas de universidade, Catirene, Guilherme, Eduardo, Viviane, Marcelo, Adama, Natanael e Daniela, pelo auxílio nas coletas e análises em laboratório.

Ao técnico de laboratório, Tiago Ledesma Taira, pelo auxílio nas análises em laboratório.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia, pelos ensinamentos e experiências compartilhados que me fizeram um profissional mais capacitado.

Aos funcionários da Fazenda Experimental da UFGD, que auxiliaram no trabalho de campo.

Aos membros das bancas de qualificação, pré-defesa e defesa, pelas valiosas contribuições.

À empresa Germipasto, pela doação das sementes de pastagens para a implantação do experimento.

À empresa Sementes Jotabasso, pela doação de sementes de soja para esta pesquisa.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta etapa da minha vida e contribuíram para a realização deste estudo.

KINTSCHEV, M. R. **Biomassa microbiana e resistência do solo à penetração em função do consórcio de milho e *Brachiaria* spp. na produtividade da soja.** 2021. 72 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2021.

RESUMO

Os benefícios da introdução das *Brachiarias* aos sistemas se devem ao aumento do aporte de palhada e raízes no solo que promovem melhorias nas qualidades físicas, químicas e biológicas do solo. Nesse contexto, a realização deste trabalho teve como objetivo determinar as melhores alternativas para a produção de grãos de soja, forragem e palhada para a cobertura do solo no sistema de plantio direto, por meio da avaliação da biomassa microbiana do solo e sua resistência mecânica à penetração (RP), produtividade de palhada de *Brachiarias* e milho, além da produtividade de grãos de soja subsequentes. O estudo foi realizado tendo como base um experimento instalado em fevereiro de 2014, localizado na Fazenda Experimental da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), em Dourados-MS, durante as safras de soja em 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021; e segundas safras de milho em 2018, 2019 e 2020. O experimento foi constituído por 16 tratamentos e quatro repetições, dispostos em delineamento de blocos ao acaso. Os tratamentos tratavam da produção de soja em sucessão ao milho solteiro, soja em sucessão às *Brachiarias brizantha*: cvs. (Xaraés, Piatã, Marandú e Paiaguás) e à *Brachiaria ruziziensis*, submetidas a três sistemas de cultivo, a saber: a) forrageiras solteiras; b) forrageiras consorciadas com milho e com supressão por herbicida; e c) forrageiras consorciadas com milho e sem supressão por herbicida. A avaliação da produtividade de palhada e de grãos de soja foi executada nos 16 tratamentos. Para examinar a biomassa microbiana e a RP, foram escolhidos 11 tratamentos, os quais corresponderam ao cultivo de soja em sucessão ao milho solteiro, forrageiras solteiras e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida. Nos tratamentos de *B. brizantha* cv. Marandú e cv. Piatã solteiras, foi verificado um maior acúmulo de carbono da biomassa microbiana (C-BMS). A maior produtividade de soja ocorreu quando produzida na palhada de *B. brizantha* cv. Marandú e cv. Piatã solteiras. Nas parcelas semeadas com *B. brizantha* cv. Piatã e cv. Paiaguás e *B. ruziziensis* solteiras, apresentaram nas camadas de 0-10 cm e 30-40 cm, menores médias de RP. A menor produção de palhada, a menor produtividade de grãos da cultura da soja, o menor acúmulo de C-BMS e o maior RP mostraram-se na sucessão milho solteiro/soja.

Palavras-chave: cobertura do solo; qualidade do solo; *Glycine max* (L.) Merrill.

KINTSCHEV, M. R. **Microbial biomass and soil penetration resistance as a result of intercropping maize and *Brachiaria* spp. in soybean productivity.** 2021. 72 p. Thesis (Doctorate in Agronomy) – Federal University of Grande Dourados, Dourados, 2021.

ABSTRACT

The benefits of introducing *Brachiarias* to the systems are due to the increased contribution of straw and roots to the soil that promotes improvements in the soil's physical, chemical, and biological qualities. In this context, the objective of this work was to determine the best alternatives for the production of soybeans, forage, and straw for soil coverage in the no-tillage system by evaluating the microbial biomass of the soil and its mechanical resistance to penetration (RP), the productivity of *Brachiarias* and maize straw, and the subsequent soybean yield. The study was conducted based on an experiment installed in February 2014, located at the Experimental Farm of the Faculty of Agricultural Sciences of the Federal University of Grande Dourados (UFGD), in Dourados-MS, during soybean harvests in 2018/2019, 2019/2020, and 2020/2021; and second maize harvests in 2018, 2019, and 2020. The experiment consisted of 16 treatments and four repetitions, arranged in a randomized blocks design. The treatments dealt with soybean production in succession to maize, soybean in succession to *Brachiarias brizantha*: cvs. (Xaraés, Piatã, Marandú and Paiaguás), and *Brachiaria ruziziensis*, submitted to three cropping systems, as follows: a) single forage crops; b) forage intercropped with maize and with herbicide suppression, and c) forage intercropped with maize and without herbicide suppression. Straw yield and soybean yield assessments were performed on all 16 treatments. To examine the microbial biomass and RP, 11 treatments were chosen, which corresponded to soybean cultivation in succession to single maize, single forage, and maize intercropped with forage with herbicide suppression. In the treatments of *B. brizantha* cv. Marandú and cv. Piatã single, a higher accumulation of microbial biomass carbon (C-BMS) was verified. The highest soybean yield occurred when produced in the straw of *B. brizantha* cv. Marandú and cv. Piatã single. In the areas cultivated with *B. brizantha* cv. Piatã and cv. Paiaguás and *B. ruziziensis* single presented lower averages of RP in the layers of 0-10 cm and 30-40 cm. The lowest straw yield, the lowest soybean yield, the lowest accumulation of C-BMS, and the highest RP were shown in the single maize/soybean succession.

Keywords: soil cover; soil quality; *Glycine max* (L.) Merrill.

LISTA DE QUADROS

	página
Quadro 1 – Tratamentos casualizados nas parcelas experimentais e semeadura da soja sobre a palhada dos tratamentos abaixo, safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021 ...	27
Quadro 2 – Tratamentos do experimento utilizados nas determinações microbiológicas, safras de 2018/2019 e 2019/2020.....	28
Quadro 3 – Regras para interpretação da força do coeficiente de correlação de Person com base em Callegari-Jaques (2011).....	36

LISTA DE TABELAS

	página
Tabela 1 – Características químicas de amostras do solo, em sistemas de cobertura. Milho (Mi), forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R), e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida.....	29
Tabela 2 – Concentrações de carbono e respectivas absorvâncias a 495 nm	32
Tabela 3 – Teor de água no solo (%) nas profundidades avaliadas em diferentes sistemas de cobertura. Milho (M) e forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R), milho consorciado com as forrageiras, safra de 2019/2020.....	34
Tabela 4 – Resistência à penetração do solo obtida sob palhadas de milho (Mi) e forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R), milho consorciado com as forrageiras	47
Tabela 5 – Correlação simples de Pearson entre as variáveis analisadas na palhada (2ª safra de 2018 e 2019), e soja (safra de 2018/19 e 2019/20) com a biomassa microbiana (safra 2018/19 e 2019/20)	56
Tabela 6 – Correlação simples de Pearson entre as variáveis analisadas na palhada (2018 e 2019), e soja (2018/2019 e 2019/2020) com a resistência à penetração.....	57
Tabela 7 – Produtividade de grãos de milho, em Mg ha ⁻¹ , segunda safra do ano de 2018, 2019 e 2020.....	57

LISTAS DE FIGURAS

	página
Figura 1 – Dados de precipitação pluviométrica (mm) e de temperaturas (°C) máxima e mínima por decêndio, no período de outono a fevereiro, safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021.	29
Figura 2 – Valores médios de carbono da biomassa microbiana (C-BMS) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS), nas safras de 2018/2019 e 2019/2020.	37
Figura 3 – Valores médios de respiração microbiana (C-CO ₂) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS), nas safras de 2018/2019 e 2019/2020.	40
Figura 4 – Valores médios do quociente metabólico (<i>q</i> CO ₂) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS), nas safras de 2018/2019 e 2019/2020.	42
Figura 5 – Valores médios do quociente microbiano (<i>q</i> MIC) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS), nas safras de 2018/2019 e 2019/2020.	44
Figura 6 – Valores médios da matéria orgânica (MO) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS), na safra de 2019/2020.	46
Figura 7 – Produtividade de palhada, em Mg ha ⁻¹ de MS. Milho (M) e forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R), milho consorciado com as forrageiras, segunda safra de 2018, 2019 e 2020.	50
Figura 8 – Produtividade de grãos de soja, em Mg ha ⁻¹ , obtida sobre palhadas de milho (Mi) e forrageiras <i>B. brizantha</i> cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e <i>B. ruziziensis</i> (R) solteiras e milho consorciado com as forrageiras com supressão (CS) e sem supressão (SS), média das safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021.	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BMS	Biomassa Microbiana do Solo
BR	Amostra em Branco
C-BMS	Carbono da Biomassa Microbiana
CTC	Capacidade de Troca de Catiônica
Ha	Hectare
ILP	Integração Lavoura-Pecuária
ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
m%	Saturação por Alumínio
MO	Matéria Orgânica
PG	Produtividade de Grãos
pH	Potencial Hidrogeniônico
RP	Resistência do Solo à Penetração
UFGD	Universidade Federal da Grande Dourados
V%	Saturação por Bases
VC	Valor Cultural

SUMÁRIO

	página
1	INTRODUÇÃO 12
2	REVISÃO DE LITERATURA 14
2.1	A importância das <i>Brachiarias</i> nos sistemas de produção conservacionistas 14
2.2	Efeito da palhada de <i>Brachiarias</i> na qualidade do solo 16
2.3	Indicadores de qualidade do solo 17
2.3.1	<i>Indicadores microbiológicos de qualidade do solo</i> 18
2.3.2	<i>Indicadores químicos de qualidade do solo</i> 20
2.3.3	<i>Indicadores físicos de qualidade do solo</i> 21
3	MATERIAL E MÉTODOS 25
3.1	Local do experimento e descrição do clima 25
3.2	Instalação e condução do experimento 25
3.3	Delineamento experimental e tratamentos 27
3.4	Dados climáticos 28
3.5	Avaliações químicas 29
3.6	Avaliações microbiológicas do solo 30
3.6.1	<i>Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (C-BMS)</i> 30
3.6.1.1	<i>Obtenção do carbono das subamostras fumigadas</i> 31
3.6.1.2	<i>Obtenção do carbono das subamostras não fumigadas</i> 32
3.6.2	<i>Respiração microbiana (C-CO₂)</i> 33
3.6.3	<i>Derivados (qCO₂ e qMIC)</i> 34
3.7	Avaliação de Resistência do solo a penetração 34
3.8	Avaliação da Umidade do solo 34
3.9	Avaliação da produtividade de palhada de milho mais forrageira 35
3.10	Avaliação de produção na cultura da soja por ocasião da colheita 35
3.11	Avaliação de produção na cultura do milho por ocasião da colheita 35
3.12	Análise estatística 36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
4.1	Biomassa microbiana do solo 37
4.2	Resistência do solo à penetração 47
4.3	Produtividade de palhada 49
4.4	Produtividade de grãos de soja e milho 53
5	CONCLUSÕES 60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 61

1 INTRODUÇÃO

A produção brasileira de grãos na safra 2020/2021 foi estimada em 250,7 milhões de toneladas, com área semeada de 65,6 milhões de hectares. A estimativa de produção de milho foi de 93,3 milhões de toneladas em 19,8 milhões de hectares, sendo 4,3 milhões de hectares cultivados na primeira safra, 14,8 milhões de hectares na segunda, e 0,7 milhões de hectares cultivados terceira, com produtividade média de 4,70 Mg ha⁻¹. Para a soja, a área cultivada foi estimada em 38,5 milhões de hectares e produção de 135,9 milhões de toneladas de grãos, com produtividade média de 3,52 Mg ha⁻¹, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021).

No Mato Grosso do Sul (MS), em 2007, as culturas econômicas cultivadas na segunda safra totalizavam 49,7% da área com soja e milho na safra, e o milho safrinha abrangeu 86% dessa área, correspondendo a 771.717 hectares (ha). Já para o ano de 2021, a safrinha ocupou 65,2% da área cultivada na safra, onde 96,5% da área foi cultivada com milho safrinha, equivalendo a 2.114.143 ha, com aumento de 274% no período (IBGE, 2021).

Diante dos dados apresentados, a sucessão de soja (safra) e milho na segunda safra sustenta a produção de grãos na região Centro-Oeste do Brasil. No entanto, a referida sucessão contribui pouco para o aumento da Matéria Orgânica do solo (MO).

Além disso, as condições edafoclimáticas do Cerrado dificultam a permanência da cobertura em quantidades suficientes para a proteção da superfície do solo, prejudicando a manutenção da umidade e da temperatura (GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2012). Dessa forma, a ausência de palhada interfere drasticamente nos processos do sistema solo, interferindo na manutenção da MO, atrapalhando o desempenho das funções do solo, provocando desequilíbrios no sistema e, conseqüentemente, desencadeando o processo de degradação. Esse fato reforça a preocupação de produzir palhada com decomposição mais lenta, o que significa mantê-la sobre o solo por um maior período de tempo (TORRES *et al.*, 2005).

Como alternativa, a introdução de *Brachiarias* em sistemas de sucessão ou rotação de culturas, consorciadas ou não com o milho na segunda safra, assume um importante papel, pois contribui para aumentar os índices de cobertura do solo, amplia a retenção da umidade e minimiza a amplitude térmica (FRANCHINI *et al.*, 2014). Para Kichel *et al.* (2018) e Ceccon e Concenço (2014), as *Brachiarias* constituem a principal escolha para o consócio com o milho e/ou solteiro, visando intensificar os índices de cobertura do solo antecedendo a cultura da soja, devido a características como: fácil manejo, produção de forragem de alta

qualidade, significativo acúmulo de massa seca, boa cobertura vegetal, excelente reciclagem de nutrientes, baixa resistência ao herbicida *glyphosate*, suporta o estresse hídrico e altas temperaturas durante o inverno/primavera no Cerrado e favorece a semeadura subsequente, além de auxiliar na formação de raízes com diferentes geometrias e diversificados espaços de solo explorados (CECCON, 2007).

Dessa maneira, os benefícios com a utilização das *Brachiarias* propiciam a atividade biológica que é responsável pelos processos de decomposição de resíduos orgânicos e participa diretamente da ciclagem de nutrientes, conseqüentemente, medindo sua disponibilidade no solo (MATSUOKA; MENDES; LOUREIRO, 2003). Esse indicador biológico relaciona-se diretamente com o indicador MO, fazendo parte de um ciclo no sistema solo alimentado pelos resíduos das culturas e o material de origem do solo (ROSCOE; MERCANTE; SALTON, 2006).

Como resultado, nesse ciclo tem-se o incremento no grau de ordenação do solo e de complexidade das relações no sistema solo, com a formação dos micro e macroagregados, conferindo maior capacidade ao sistema para resistir às perturbações, como melhor infiltração e armazenamento de água, maior aeração, menor resistência ao crescimento de raízes, melhores condições para o desenvolvimento da biota do solo e das próprias plantas (SALTON *et al.*, 2008).

Nesse contexto, a realização deste trabalho teve como objetivo determinar as melhores alternativas para a produção de grãos de soja, de forragem e de palhada para a cobertura do solo no sistema de plantio direto, por meio da avaliação da biomassa microbiana, resistência mecânica do solo à penetração (RP), produtividade de palhada de *Brachiarias* e milho, e produtividade de grãos de soja subsequentes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A importância das *Brachiarias* nos sistemas de produção conservacionistas

As *Brachiarias* podem ser inseridas, nos sistemas de produção, em consórcio com milho ou até mesmo solteiras, em sucessão ou rotação de culturas na segunda safra, objetivando o aumento de palhada sobre o solo pelo crescimento de massa seca, proporcionando melhorias na qualidade e na produtividade do sistema, sendo uma alternativa importante para a formação, a recuperação e a reforma de pastagens, e ainda a melhoria da cobertura do solo em plantio direto (SILVA *et al.*, 2015).

Essas forrageiras se caracterizam pela rusticidade e adaptação a solos de baixa fertilidade e ácidos, além de serem facilmente estabelecidas (ZIMMER, 2015), são utilizadas para a produção de palhada ou pasto durante o período seco na região do Cerrado (MACHADO; ASSIS, 2010). Ademais, são excelentes alternativas para os sistemas de sucessão e/ou rotação de culturas, até mesmo em consórcio com outras culturas.

Dentre as espécies/cultivares mais usadas em consórcio com as culturas de grãos, principalmente na produção de palhada e forragem para a alimentação animal são as forrageiras *B. brizantha* cv. Marandú, Piatã, Paiáguas, Xaraés e *B. Ruziziensis* cv. Ruziziensis (SEREIA *et al.*, 2012; MACHADO *et al.*, 2017).

De maneira geral, as espécies *B. ruziziensis* e a *B. brizantha* se desenvolvem em solos de média a alta fertilidade e, por serem espécies de clima tropical, têm crescimento reduzido com a diminuição da temperatura e não toleram geadas. Nos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), várias espécies desse gênero são utilizadas com sucesso.

Nesse sentido, Pacheco *et al.* (2011) observaram em seus estudos que as forrageiras do gênero *Bracharia* apresentam alta produção de massa seca em média de 10,00 Mg ha⁻¹, podendo ser maior em determinadas épocas do ano, atingindo uma produtividade acima de 15,00 Mg ha⁻¹. O alto acúmulo de material vegetal fornecido pela *Bracharia* amplia o aporte de carbono ao solo, por meio da decomposição da parte aérea e das raízes das plantas (SALTON *et al.*, 2011).

Pesquisas realizadas por Salton, Kichel e Costa (2012), sobre o cultivo simultâneo de milho com forrageiras na safrinha, mostraram a produtividade de massa seca variando de 7,46 a 16,00 Mg ha⁻¹ para o consórcio de milho com *B. ruziziensis* e *B. brizantha* cv. Piatã, por ocasião da dessecação, para a semeadura direta da soja. Os autores ressaltam ainda que as

fornageiras, além de produzirem massa seca em quantidade suficiente para a semeadura direta, têm permanecido no solo durante o ciclo das culturas sucessoras.

Dessa forma, as *Brachiarias* demonstram alta densidade de raízes, com renovações periódicas que promovem a aproximação das partículas de solo pela constante absorção da água e nutrientes do solo, liberando secreções (exsudatos) que estimulam a atividade microbiana e a produção de micorrizas, aumentando a formação de agregados com maior estabilidade (GARCIA; ROSOLEM, 2010; LOURENTE *et al.*, 2016). Na avaliação do cultivo de pastagem por dois anos, seguido do cultivo de soja por um ano, Salton *et al.* (2013) notaram um aumento no tamanho médio de agregados, carbono da biomassa microbiana e na produtividade de grãos de soja, quando comparados às áreas com preparo convencional e plantio direto sem cobertura.

Por isso, a utilização das *Brachiarias* possibilita uma efetiva manutenção da MO do solo, surgindo como uma alternativa interessante capaz de modificar o perfil do solo (ROSCOE; MERCANTE; SALTON, 2006). Vilela *et al.* (2011), considerando sistemas de ILP bem manejados, obtiveram incremento de 15% na MO do solo e ganhos de 10% na produtividade de soja, quando cultivada em sucessão a pastagens recuperadas e adubadas.

O aumento dos teores da MO do solo tem sido percebido em sistemas com a introdução das forrageiras, uma vez que a MO se relaciona a múltiplos aspectos do ambiente e da qualidade do solo, o que a torna um dos principais responsáveis pela sustentabilidade dos sistemas agropecuários (CARVALHO *et al.*, 2010).

Assim, as *Brachiarias* representam ainda um grande potencial de manutenção da palhada sobre o solo, devido à sua alta relação C/N e lignina/N total, o que retarda sua decomposição e aumenta a possibilidade de utilização em regiões mais quentes, como o Cerrado (TEIXEIRA *et al.*, 2011).

A cobertura do solo com palhada formada pela *Brachiaria* pode diminuir os efeitos de doenças como o mofo branco, podridão de *Fusarium* e podridão de *Rhizoctonia*, por ação isolante ou alelopática causada pela microflora do solo sobre os patógenos (CHIODEROLI *et al.*, 2010). Além disso, aumenta o controle de plantas daninhas, com maior aproveitamento dos insumos (SILVA *et al.*, 2015).

O uso de sistemas de produção em que a manutenção de palhada e resíduos vegetais são mantidos sobre a superfície do solo ou incorporados, como é caso das forrageiras em cobertura, comprovam diversos benefícios, como a conservação e a melhoria dos solos em relação aos atributos físicos, químicos e biológicos (LOURENTE *et al.*, 2016).

Portanto, as principais vantagens do uso das *Brachiarias* mencionadas por Kichel *et al.* (2014) são: recuperação mais eficiente da fertilidade do solo, facilidade da aplicação de práticas de conservação do solo, recuperação de pastagens com custos mais baixos, facilidade na renovação das pastagens, melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, e diversificação do sistema produtivo.

2.2 Efeito da palhada de *Brachiarias* na qualidade do solo

A produtividade de forragem e palhada para a cobertura do solo, por meio do cultivo de forrageiras solteiras ou em consórcio com a cultura do milho, na segunda safra, contribui para a sustentabilidade dos sistemas produtivos, aumentando a produtividade das produções subsequentes.

Avaliando a produtividade de soja em sucessão ao milho consorciado com diferentes cultivares de *Brachiarias*, Chioderoli *et al.* (2012) constataram produtividades de soja em torno 4,70 Mg ha⁻¹ de grãos, em que *B. brizantha* e *B. decumbens*, em consorciação com milho e solteiras, proporcionaram maiores produtividades de grãos de soja em comparação ao cultivo do milho solteiro.

No entanto, Kichel *et al.* (2014) não detectaram diferenças na produtividade de grãos de soja, cultivada sobre diversas palhadas de forrageiras tropicais perenes, com produtividade média de 3,60 Mg ha⁻¹ de grãos, porém a produtividade da soja em plantio direto sobre palhada do milho em monocultivo, na ausência de capins, foi de 2,88 Mg ha⁻¹ de grãos, apresentando uma redução de 720 kg ha⁻¹ em relação à média obtida sobre a palhada das forrageiras.

A maior produtividade na safra de 2016/2017 verificada por Valim (2019) ocorreu quando a soja foi semeada na palhada de *B. brizantha* cv. Piatã consorciada com milho com 5,70 Mg ha⁻¹, o milho solteiro foi de 4,00 Mg ha⁻¹, um acréscimo de 1,70 Mg ha⁻¹. Contudo, na safra de 2017/2018, as produtividades de soja ficaram abaixo de 5,00 Mg ha⁻¹, e com maior produtividade de soja sobre *B. ruziziensis* solteira (4,63 Mg ha⁻¹).

Vilela *et al.* (2008) apresentaram dados que evidenciam o benefício da pastagem depois de um ciclo de três anos de pasto de *B. brizantha* cv. Marandú, quando a produtividade da soja foi 17% superior ao obtido no sistema de lavoura contínua. Ressalte-se ainda que esse maior rendimento de grãos foi percebido em uma área que recebeu menores quantidades de fertilizantes, em média 45% a menos, durante os 17 anos de cultivo, ou seja, com consequente economia no uso de fertilizantes e redução nos custos de produção.

Resultados apontados por Costa *et al.* (2015), na avaliação de diferentes espécies de forrageiras para a produção de palhada e épocas de semeadura da soja em sucessão, mostram as menores produtividades de soja sobre as forrageiras que apresentaram menor produção de palhada e, possivelmente, menor ciclagem de nutrientes. Isso confirma a importância das elevadas produtividades de palhada obtidas pelas forrageiras na melhoria dos sistemas produtivos, no benefício para o solo, no controle de plantas daninhas e nas culturas semeadas em sucessão.

Nesse contexto, Garcia *et al.* (2014) avaliaram a produtividade de soja em sucessão com o consórcio de milho com forrageiras em Selvíria-MS, e revelaram produtividades entre 2,88 e 3,17 Mg ha⁻¹. Entretanto, Ceccon *et al.* (2013), em Dourados-MS, obtiveram a maior produtividade de grãos de soja, de 3,2 Mg ha⁻¹, quando cultivada sobre a palhada da *B. ruziziensis* solteira.

2.3 Indicadores de qualidade do solo

Com a predominância dos Latossolos no Cerrado, os solos são fortemente intemperizados e caracterizados pela baixa fertilidade natural. A MO é fundamental para elevar a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e, conseqüentemente, favorecer a ciclagem de nutrientes, evitando mudanças bruscas de Potencial Hidrogeniônico (pH) e mantendo uma boa agregação das partículas do solo (FIGUEIREDO; RAMOS; TOSTES, 2008).

Cabe mencionar que o componente que está diretamente relacionado com a qualidade do solo é a MO (MIELNICZUK, 1999). A definição de “qualidade do solo”, emitida por Doran (1997), é a capacidade do solo de funcionar, dentro dos limites de um ecossistema natural, sustentando a produtividade biológica, mantendo ou melhorando a qualidade ambiental e promovendo a saúde das plantas e dos animais. Esse atributo está fortemente associado à qualidade, pois o seu acúmulo e armazenamento vêm sendo utilizado como indicador, especialmente por ser altamente sensível ao sistema de manejo adotado e correlacionar-se com a maioria dos atributos ligados à qualidade do solo.

Além de satisfazer o requisito básico de ser sensível às modificações do manejo do solo, a MO é ainda fonte de nutrientes às plantas, influenciando na infiltração, retenção de água e suscetibilidade à erosão (GREGORICH *et al.*, 1997). Em ambientes tropicais, o processo de degradação dos solos encontra-se intimamente vinculado à dinâmica da MO (GOMIDE; SILVA; SOARES, 2011).

Ao analisar o acúmulo de MO, observa-se a ativação de diversos processos no solo, manifestando-se por meio das “propriedades emergentes”, tais como maior resistência à erosão e taxa de infiltração de água no solo; aumento na capacidade de retenção de cátions, no estoque de nutrientes, na absorção e complexação de compostos, na ciclagem de elementos químicos, no sequestro de carbono atmosférico, na atividade e diversidade biológica do solo, e na resistência a perturbações (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011). De forma inversa, a perda de MO retroalimenta o processo de degradação, promovendo a desorganização do sistema, resultando em menores produções de massa seca e maiores perdas de nutrientes, água e solo (ROSCOE; MACHADO, 2002).

Para que a utilização da MO como indicador da qualidade do solo seja útil na identificação das formas de manejo mais sustentáveis, é preciso conhecer os mecanismos de aporte de carbono ao solo e a sua dinâmica (SALTON *et al.*, 2011). Portanto, a dinâmica da MO é uma importante chave no entendimento das alterações provocadas pelo manejo que se aplica ao solo, sustentabilidade produtiva e econômica de um sistema de exploração agrícola (NICOLOSO; LANZANOVA; LOVATO, 2006).

2.3.1 Indicadores microbiológicos de qualidade do solo

A qualidade do solo pode ser avaliada mediante o uso de indicadores microbiológicos, na biomassa microbiana formada, principalmente, por fungos, bactérias e arqueas, e suas atividades (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Dentre os principais indicadores microbiológicos empregados para analisar a qualidade do solo, destacam-se a determinação do carbono da biomassa microbiana do solo, respiração microbiana e atividade enzimática do solo (COLOZZI FILHO; ANDRADE; BOLOTA, 2001).

A biomassa microbiana do solo é geralmente expressa como micrograma (μg) de carbono por grama de solo seco, sendo examinada por diversos métodos como, por exemplo, o método fumigação-incubação e fumigação-extração, usado neste estudo. Com a avaliação de Biomassa Microbiana do Solo (BMS), é possível determinar, além do carbono da biomassa microbiana (C-BMS), a respiração microbiana ou basal do solo (C-CO₂), o quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) e o quociente microbiano ($q\text{MIC}$).

Dessarte, a avaliação da BMS é um indicador sensível às mudanças no ecossistema, pois representa o destino inicial do carbono em transformação, e é uma das principais fontes de produção do CO₂ e das enzimas do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A avaliação da respiração microbiana do solo também pode ser usada como uma medida da atividade microbiana e empregada como indicadora de qualidade, tanto de ambientes agrícolas quanto de ambientes naturais. A liberação de C-CO₂, resultante do metabolismo da maioria dos microrganismos no solo, têm se apresentado como uma determinação sensível, podendo ser utilizada como indicadora da qualidade do solo em razão dos diferentes sistemas de manejo aplicados (MERCANTE, 2001; COLOZZI FILHO; ANDRADE; BOLOTA, 2001).

Os sistemas de uso do solo menos impactantes, como os conservacionistas, mantêm uma cobertura morta na superfície, contribuindo para preservar a atividade biológica em níveis mais elevados (BABUJIA *et al.*, 2010). Para Cunha *et al.* (2011), quanto menos CO₂ for perdido para o ambiente, maiores são as quantidades de carbono incorporadas ao solo pela microbiota. Relacionando esses resultados aos demais atributos estudados, tais como C-BMS, qCO₂, qMIC e MO, é possível observar a estabilidade da BMS quando se diversificam os sistemas.

O qCO₂, que representa a quantidade liberada de C-CO₂ por unidade de biomassa microbiana em determinado tempo, estabelece a eficiência microbiana: quanto maior o qCO₂, menos eficiente é o sistema, mais carbono é perdido para a atmosfera e menos é incorporado ao solo (MATOS; RASSLAN, 2018). Entretanto, valores maiores de qMIC são indicativos de que mais substratos orgânicos lábeis estão sendo mantidos no solo, permitindo maior C-BMS por unidade de carbono orgânico do solo (KARA; BAYARA, 2014).

A biomassa microbiana e sua atividade funcionam como um compartimento da MO diretamente influenciado por fatores bióticos e abióticos, de tal forma que respostas a mudanças nos sistemas de uso e manejo do solo podem ser detectáveis depressa (BATISTA *et al.*, 2016). Esse compartimento representa a parte viva da matéria orgânica do solo, formando um importante estoque de nutrientes que podem ser rapidamente disponibilizados às plantas devido à sua rápida ciclagem (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013). Ao mesmo tempo, essa imobilização temporária reduz perdas de nitrogênio por lixiviação ou desnitrificação, e de fósforo por fixação, uma vez que os nutrientes ficam protegidos nas células microbianas (BABUJIA *et al.*, 2010).

Um solo com maior diversidade microbiana tem mais chance de manter os processos ecológicos após um distúrbio. Essa capacidade é definida como resiliência e significa um tamponamento biológico contra distúrbios num ecossistema, e é geralmente maior em solos de ambientes mais preservados (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013).

Além de métodos clássicos empregados para a análise da biomassa microbiana, novas ferramentas se mostram promissoras para auxiliar na compreensão de mudanças na qualidade biológica do solo decorrentes de seu uso e manejo como, por exemplo, a atividade enzimática do solo (MATSUOKA; MENDES; LOUREIRO, 2003). Esse instrumento é capaz de fornecer indicações sobre o estado metabólico das comunidades de microrganismos do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

2.3.2 Indicadores químicos de qualidade do solo

Dentre os indicadores empregados para avaliar a qualidade do solo estão: a CTC, a MO, a disponibilidade de nutrientes, o fósforo, o pH, o potássio, a presença de metais pesados, o nitrogênio, a saturação por bases (V%), a saturação por alumínio (m%), entre outros.

Dessa maneira, entre os indicadores químicos que avaliam a qualidade do solo, a MO é um dos melhores, pois apesar de compor menos de 5% da fase sólida da maioria dos solos, ela apresenta uma alta capacidade de interagir com os demais componentes, alterando, assim, as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, as quais afetam o crescimento das plantas (ALVES, 2014). A MO do solo contém não somente carbono, que entra da palhada dos sistemas de produção, mas também outros nutrientes, sendo o nitrogênio quantitativamente mais importante (ROSCOE; MERCANTE; SALTON, 2006).

Em um trabalho realizado por Salton, Kichel e Costa (2012), examinando a cobertura do solo produzida por diversas forrageiras tropicais, eles verificaram alterações químicas no solo, com aumento no teor de potássio em 60% após a decomposição da palhada de milho em consórcio com as *Brachiarias* quando comparado com o milho solteiro. Além disso, com a introdução das forrageiras, houve também a diminuição do pH da água em 0,3 unidades.

As sucessões de culturas com espécies com alta eficiência em extrair fósforo da solução do solo, como as *Brachiarias*, resultam em um acréscimo na recuperação de fósforo adicionado ao solo de até 69% a mais do que no sistema composto apenas por culturas anuais (SOUSA *et al.*, 2007). Essa maior eficiência se deve à morfologia do sistema radicular, à densidade dos radiculares e a associação com fungos micorrízicos que ampliam a absorção de nutrientes com pouca mobilidade na solução do solo, particularmente o fósforo, em virtude da exploração de um maior volume de solo, da solubilização de fosfatos orgânicos pelas fosfatases produzidas pelas hifas e da mobilização de fósforo inorgânico (YAO *et al.*, 2001).

Resultados obtidos por Pegoraro *et al.* (2018), ao avaliar o carbono, o nitrogênio e as substâncias húmicas do solo em coberturas com resíduos vegetais em três profundidades (0 a 20; 20 a 40; e 40 a 60 cm), demonstraram que os maiores teores de carbono foram observados no solo com resíduos vegetais de *Panicum maximum* cv. colômbio, mas a deposição de massa seca e estoques de carbono e nitrogênio foram maiores nos resíduos vegetais da mata nativa. Além do mais, o sistema de cultivo com *Panicum maximum* cv. colômbio aumentou o estoque de carbono na fração húmica e o grau de humificação da MO do solo, na maioria das profundidades de solo analisadas.

Estudos realizados por Battisti *et al.* (2018), sobre o efeito da utilização de forrageiras na dinâmica dos atributos químicos do solo em um sistema silvipastoril na região Sul do Brasil, compararam o sistema silvipastoril de alta biodiversidade com a área de mata nativa e concluíram que esse sistema apresentou melhorias na qualidade do solo, com o aumento dos teores de P e K (0 a 30 cm), como também maiores teores de carbono orgânico e nitrogênio (5 a 30 cm) em relação à mata nativa.

O uso de forrageiras *Digitaria decumbens* L. e *Pennisetum purpureum* L. em pesquisas feitas por Santos *et al.* (2001), em Nitossolo Vermelho eutrófico, demonstraram que as forrageiras promoveram aumentos nos teores de carbono orgânico total e na CTC. Permitiram, também, crescimento dos teores de potássio, de MO e magnésio, principalmente na camada superficial.

2.3.3 Indicadores físicos de qualidade do solo

Os atributos físicos possuem uma função essencial no suprimento e armazenamento de água, de nutrientes e de oxigênio no solo. Entre os principais indicadores físicos de qualidade de solo, sob o ponto de vista agrícola, estão a textura, a estrutura, a resistência do solo à penetração (RP), a profundidade de enraizamento, a capacidade de água disponível, a percolação e a transmissão da água e o sistema de cultivo (GOMES; FILIZOLA, 2006).

A textura do solo é a propriedade empregada a fim de analisar a classe de agrupamento de solos com determinadas proporções de tamanho de constituintes físicos, e essas proporções como, por exemplo, a quantidade de areia, argila, entre outros, influenciam a densidade do solo, sua porosidade e a condutividade hidráulica saturada (CHERUBIN *et al.*, 2016). Entretanto, não é um indicador recomendado, por não sofrer alterações pelo manejo, inviabilizando comparações (STEFANOSKI *et al.*, 2013).

A RP representa as condições de desenvolvimento das raízes das plantas e pode ser medida por meio de equipamentos denominados penetrômetros (STOLF, 1991). Desse modo, a RP do solo tem sido frequentemente utilizada para avaliar sua compactação, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas (LETEY, 1985) e de fácil e rápida determinação (STOLF, 1991).

Para Gardner, Laryea e Unger (1999), a determinação da RP é uma estratégia útil para avaliar a limitação à penetração e o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, mas pode haver divergências quanto à correlação entre a pressão exercida pelo penetrômetro e a real capacidade das raízes em efetuar a referida pressão, sendo, ainda, fortemente influenciada pelo conteúdo de água. Além disso, deve se levar em consideração que a RP está diretamente associada à densidade do solo, pois a coesão de partículas oferece resistência ao deslocamento vertical da ponteira da haste das raízes das plantas. Ademais, negativamente, está ligada à umidade do solo, também de forma isolada, pois a água funciona como um lubrificante, proporcionando fácil deslocamento da ponteira das raízes.

O desenvolvimento radicular é o principal agente agregador de partículas em solos de regiões tropicais, tanto pela liberação de exsudatos como pela ação mecânica aproximando as partículas do solo e, conseqüentemente, formando estruturas maiores (GARCIA; ROSOLEM, 2010). As raízes também atuam pela aproximação de partículas, seja pelo efeito do fluxo de massa ou pelo deslocamento destas no espaço. Os agregados do solo estão relacionados com a aproximação das partículas pelo crescimento das raízes, movimento da fauna, expansão durante o umedecimento do solo, contração pela secagem, floculação e estabilização gerada pelos agentes cimentantes (SALTON *et al.*, 2008).

O cultivo de plantas com abundante sistema radicular, como as *Brachiarias*, contribui para a formação e estabilidade de agregados maiores que 2 mm, proporcionando significativas melhorias na qualidade do solo, especialmente nos aspectos associados à estrutura do solo e no acúmulo de MO (MENDONÇA *et al.*, 2013). Nesse sentido, a introdução de *Brachiarias* em sistemas de sucessão ou rotação de culturas, consorciadas ou não com o milho na segunda safra, assume um importante papel, pois colabora para a formação da cobertura de solo, aumenta a retenção da umidade e ameniza a temperatura do solo (FRANCHINI *et al.*, 2014).

Vale ressaltar que favorece o processo de ordenação do solo e de complexidade das relações no sistema, com a formação dos micro e macroagregados, conferindo maior capacidade para resistir às perturbações, como melhor infiltração e armazenamento de água, maior aeração, menor resistência ao crescimento de raízes, melhores condições para o desenvolvimento da biota do solo e das próprias plantas (SALTON *et al.*, 2008).

Dessa forma, uma maneira de avaliar a qualidade física do solo é por meio da análise da estabilidade dos agregados, tendo como referência positiva os solos que possuem agregados organizados de modo a garantir estabilidade e resistência à ação erosiva da água e do vento. Trata-se de um indicativo fundamental para a interpretação do comportamento físico dos solos frente à erosão (SAYGIN *et al.*, 2012). Além disso, a capacidade de retenção de água de um solo dependerá do número e do tamanho dos poros, os quais são influenciados primariamente pela textura, estrutura, MO e mineralogia do solo (LOWERY *et al.*, 1996). Essa propriedade está relacionada ao transporte e armazenamento de água no solo, à sua erodibilidade e ao teor de água disponível (DORAN; PARKIN, 1996).

Os atributos físicos do solo e a MO são fortemente alterados pelo uso e manejo do solo, o que permite o emprego desses atributos como indicadores ambientais da qualidade física do solo (FREITAS *et al.*, 2017). Assim, a introdução de *Brachiarias* nos sistemas de produção, com o passar dos anos, pode diminuir a densidade do solo sob o plantio direto, devido, em parte, ao aumento do teor de MO na camada superficial, melhorando a estrutura do solo (REEVES, 1995).

Diante disso, Steinbeiss, Gleixner e Antonietti (2009) afirmam que a menor densidade do solo nas áreas sob mata nativa se deve aos elevados teores de MO e de intensa atividade biológica (fauna e raízes), que constrói canais, cavidades e galerias. Pezzoni *et al.* (2012) demonstraram uma correlação entre a maior quantidade de MO proveniente da palhada das forrageiras e as baixas densidades do solo, o que se deve, principalmente, ao efeito amortecedor desta, promovendo a dissipação de parte da energia aplicada, além da capacidade em estabelecer ligações entre as partículas do solo, aumentando a coesão e promovendo maior agregação, o que acaba, assim, afetando os atributos físicos do solo.

Stefanoski *et al.* (2013), ao levantar dados sobre a qualidade físico-hídrica e sua relação com os impactos gerados pelo manejo do solo, observaram que os indicadores de qualidade física do solo evidenciam a necessidade da adoção de sistemas que favoreçam a estruturação do solo, com elevação dos teores de MO.

Portanto, a estrutura do solo está intimamente relacionada à MO, e é uma boa indicadora da qualidade do solo devido à sua sensibilidade às práticas de manejo adotadas. De modo geral, o solo mantido em estado natural, com vegetação nativa, apresenta características físicas como estrutura, permeabilidade, densidade e porosidade do solo adequadas ao desenvolvimento normal das plantas (ANDREOLA; COSTA; OLSZEWSKI, 2000). No entanto, à medida em que se intensificam as práticas agrícolas, os atributos físico-hídricos do solo sofrem alterações (SANTOS, 2011) que podem ser amenizadas com sistemas de uso do

solo menos impactantes, como os conservacionistas, que mantêm a cobertura do solo (palhada e raízes), contribuindo para a formação de galerias, e conferindo ao solo maior macroporosidade (BABUJIA *et al.*, 2010).

A melhoria da qualidade física do solo proporcionada pela inclusão das *Brachiarias*, solteiras ou consorciadas com culturas anuais, é devido à combinação de três fatores: ausência de preparo durante o ciclo das forragens, presença de sistema radicular denso atuando como agente agregante e o aumento da atividade da biológica do solo (MARCHÃO, 2007).

Sales *et al.* (2016), ao estudar o solo com cobertura de milho consorciado com *B. ruziziensis*, identificou maior porosidade total e macroporosidade quando comparada às demais coberturas. Tal fato está relacionado ao sistema radicular, cujo desenvolvimento foi favorecido pela maior quantidade de palhada, associado ao efeito do sistema da *B. ruziziensis*, fazendo com que a sua morte e decomposição produzisse bioporos, permitindo o aumento da macroporosidade e porosidade total, além de aportar carbono ao solo.

Para Chioderoli *et al.* (2012), as condições físico-hídricas do solo se devem pela maior quantidade de massa seca e raízes inseridas pelo consórcio com forrageiras, favorecendo a infiltração e retenção de água, maior aproveitamento do perfil do solo e reprimindo os processos erosivos. Dessa forma, a introdução das *Brachiarias* nos sistemas de produção interfere diretamente na estrutura do solo, alterando os valores da porosidade total, densidade do solo e RP.

Por sua vez, Salton e Tomazi (2014) avaliaram o desenvolvimento radicular de *Brachiarias* consorciado com milho e milho solteiro, na segunda safra, com soja (safra) em sucessão, e verificaram que o sistema radicular das forrageiras colaborou de forma marcante para o crescimento das raízes das plantas subsequentes, como a soja, em sistema de plantio direto, beneficiando a estruturação do solo e a absorção de nutrientes. Para os autores, a introdução de culturas anuais com forrageiras, beneficiam o desenvolvimento radicular de culturas sucessoras, pois o sistema radicular das *Brachiarias* é bastante eficiente em promover a estruturação adequada do solo por apresentarem um sistema radicular volumoso, a chamada “cabeleira de raízes”.

Assim, medidas de manejo da compactação vêm sendo recomendadas, como o uso de plantas de cobertura com elevada produção de fitomassa e sistema radicular abundante, por exemplo, as *Brachiarias*, capazes de romper camadas compactadas e produzir bioporos, através dos quais as raízes das culturas podem se desenvolver (SILVA; ROSOLEM, 2002).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento e descrição do clima

As avaliações foram efetuadas em experimento implantado em fevereiro de 2014, na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no município de Dourados-MS, com coordenadas geográficas de latitude de 22° 14' 08" S, longitude de 54° 59' 13" W e altitude de 455 m. O clima da região é do tipo Aw, com inverno seco, precipitação média anual de 1.500 mm e temperatura média de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013).

3.2 Instalação e condução do experimento

O experimento foi instalado em fevereiro de 2014, com a semeadura das espécies de *Brachiarias* em cultivo solteiro e em consórcio com milho na segunda safra, a cultura da soja foi semeada em sucessão. Para o presente trabalho, a semeadura das *Brachiarias* e do milho foram realizadas em março, das segundas safras de 2018, 2019 e 2020, e da soja em outubro/novembro das safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021.

A área experimental foi constituída por 16 tratamentos e quatro repetições dispostos em delineamento de blocos ao acaso, sendo cada unidade experimental com dimensões de 15 m de largura por 25 m de comprimento, totalizando 375 m², com 16 parcelas por bloco, em uma área experimental de 16.500 m².

A semeadura do milho e das forrageiras, ambas em sucessão à soja, foram feitas nos dias 21 de março de 2018, 2 de março de 2019 e 21 de março de 2020, com período de emergência de cinco dias para o milho e sete dias, em média, para os capins, após a semeadura.

Para a avaliação da qualidade das sementes das *Brachiarias*, antes da semeadura, elas foram encaminhadas ao laboratório da Embrapa Gado de Corte para padronizá-las quanto ao Valor Cultural (VC). Para realizar as análises das sementes, foram coletadas amostras de 500 gramas de cada forrageira, sendo determinadas a pureza e a germinação, e todas elas foram ajustadas pela equação:

$VC = (Germinação \times Pureza) / 100$, expresso em percentagem, sendo VC = 80 %, VC (valor cultural).

A taxa de semeadura das *Brachiarias* foi de 60 sementes puras viáveis por m², objetivando obter estande mínimo de 30 plantas por m², garantindo um número adequado e uniforme de plantas no estabelecimento (ALMEIDA *et al.*, 2009). Para a semeadura, foi utilizada uma semeadora-adubadora, modelo TD, de oito linhas distanciadas entre si em 0,4 m, em sistema de plantio direto, com a profundidade de semeadura de 2 a 4 cm, não sendo aplicada adubação na semeadura das forrageiras.

A semeadura do milho híbrido simples DKB 177 VT PRO foi efetuada em plantio direto, imediatamente nas mesmas parcelas que foram semeadas as forrageiras, exceto nos tratamentos com as forrageiras solteiras. Nessa semeadura foi usada uma semeadora-adubadora, modelo pneumático, com quatro linhas, equipada para plantio direto, com linhas espaçadas entre si de 0,9 m, reguladas para distribuir seis sementes por metro, na profundidade de 2 a 5 cm, objetivando um estande final de 60.000 plantas/ha. A adubação de semeadura para o milho foi de 250 kg ha⁻¹ da fórmula NPK (08-20-20), não sendo feita a adubação de cobertura com nitrogênio.

Os tratos culturais realizados durante o desenvolvimento da cultura do milho e das *Brachiarias* ocorreu entre 18 e 20 dias após a emergência (DAE) dos capins. Foram aplicados os herbicidas atrazine (1.500 g ha⁻¹ i.a.) em área total, para o controle da soja tiguera e de invasoras de folha larga; o herbicida a base de nicosulfuron (6 g ha⁻¹ i.a.), correspondente ao manejo com supressão de herbicida, e foi administrado quando as forrageiras encontravam-se no estágio de um até quatro perfilhos, que ocorreu de 18 a 20 dias após a emergência (DAE) dos capins. Os herbicidas foram diluídos em água, para um volume de calda de 200 litros ha⁻¹ e aplicados mecanicamente com o auxílio de um pulverizador.

Cabe mencionar que a colheita do milho foi realizada manualmente no mês de agosto de cada ano, em seguida a área foi dessecada para a semeadura de soja. A dessecação foi realizada com a aplicação do herbicida glifosato (80 gramas de Sal de Isopropilamina), de forma sequencial, com dose de 4,0 L ha⁻¹, 35 dias antes da semeadura da soja, e 2,0 L ha⁻¹ um dia antes da semeadura da soja. A segunda dosagem se deu em decorrência de alguns tratamentos apresentarem alta quantidade de material lignificado, como também maior resistência à dessecação. Nessa circunstância, decidiu-se padronizar a mesma dosagem de herbicida para todos os tratamentos.

A semeadura da soja, cultivar Monsoy 6410 IPRO, semeada nos dias 23 de outubro de 2018, 6 de novembro de 2019 e 30 de outubro de 2020, em plantio direto, foi executada com uma semeadora-adubadora, modelo pneumático Jumil, com sete linhas espaçadas entre si a 0,45 m, na densidade de semeadura de 13 sementes por metro, na profundidade de 2 a 5 cm.

A adubação de semeadura da soja foi de 330 kg ha⁻¹ da fórmula NPK (05-30-10) + 0,3% de B + 0,3% de Zn, sendo a adubação de cobertura de 110 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio. As sementes foram inoculadas de acordo com a recomendação técnica, com três doses de 50 ml de *Bradyrhizobium japonicum* (7,2x10⁹ células viáveis/ml) e uma dose de 100 ml de *Azospirillum brasilense* (4x10⁸ células viáveis/ml).

O controle de plantas daninhas e espontâneas das forrageiras na segunda safra foi efetuado com o herbicida glifosato, na dose de 2,5 L ha⁻¹ aplicado entre o estágio V3 a V4. O controle de percevejos foi feito com o inseticida Tiametoxam + Lambda-Cialotrina, na dose de 200 mL ha⁻¹. Já a colheita da soja foi realizada nas datas de 22 de fevereiro de 2019, 6 de março de 2020 e 24 de fevereiro de 2021, com uma colhedora mecânica, em três linhas de 20 m de comprimento, com área útil de 27 m² em cada parcela.

3.3 Delineamento experimental e tratamentos

Para avaliar as variáveis referentes à produtividade das palhadas e o efeito na cultura da soja, adotou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso com 16 tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos tratavam do cultivo de soja em sucessão ao milho solteiro, soja em sucessão às forrageiras *Brachiarias brizantha*: cvs. (Xaraés, Piatã, Marandú e Paiaguás) e *Brachiaria ruziziensis*, submetidas a três sistemas de cultivo: forrageiras solteiras, forrageiras consorciadas com milho com e sem supressão de herbicida, cultivadas na segunda safra, totalizando 16 tratamentos (Quadro 1).

Quadro 1 – Tratamentos casualizados nas parcelas experimentais e semeadura da soja sobre a palhada dos tratamentos abaixo, safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021

Tratamento	Abreviação
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Xaraés consorciada com milho com supressão	MXCS
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Piatã consorciada com milho com supressão	MPCS
<i>Panicum maximum</i> cv. Paiaguás consorciada com milho com supressão	MPaCS
<i>Brachiaria ruziziensis</i> cv. Kenedy consorciada com milho com supressão	MRCS
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú consorciada com milho com supressão	MMCS
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Xaraés consorciada com milho sem supressão	MXSS
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Piatã consorciada com milho sem supressão	MPSS
<i>Panicum maximum</i> cv. Paiaguás consorciada com milho sem supressão	MPaSS
<i>Brachiaria ruziziensis</i> cv. Kenedy consorciada com milho sem supressão	MRSS
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú consorciada com milho sem supressão	MMSS
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Xaraés em monocultivo	X
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Piatã em monocultivo	P
<i>Panicum maximum</i> cv. Paiaguás em monocultivo	Pa
<i>Brachiaria ruziziensis</i> cv. Kenedy em monocultivo	R
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú em monocultivo	M
Milho	Mi

Fonte: elaborado pelo autor.

Para as avaliações microbiológicas, nas safras de 2018/2019 e 2019/2020, analisaram-se os tratamentos correspondentes ao cultivo de soja em sucessão ao milho, soja em sucessão às forrageiras *Brachiarias brizantha*: cvs. (Xaraés, Piatã, Marandú e Paiaguás) e *Brachiaria ruziziensis*, e soja em sucessão ao milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida, totalizando 12 tratamentos e quatro repetições, conforme demonstra o Quadro 2.

Quadro 2 – Tratamentos do experimento utilizados nas determinações microbiológicas, safras de 2018/2019 e 2019/2020

Tratamento	Abreviação
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Xaraés consorciada com milho	MX
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Piatã consorciada com milho	MP
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú consorciada com milho	MM
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Paiaguás consorciada com milho	MPa
<i>Brachiaria ruziziensis</i> cv. Kenedy consorciada com milho	MR
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Xaraés	X
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Piatã	P
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú	M
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Paiaguás	Pa
<i>Brachiaria ruziziensis</i> cv. Kenedy	R
Milho	Mi

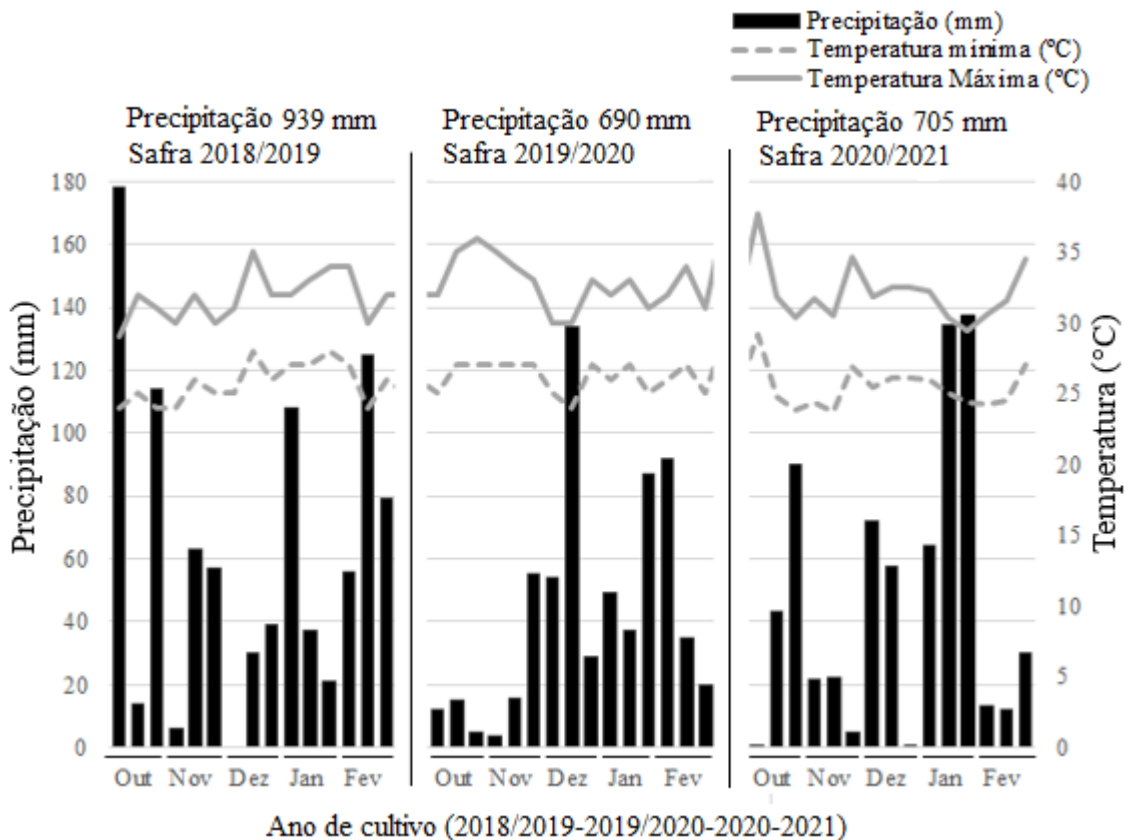
Fonte: elaborado pelo autor.

Para as avaliações de RP, foram escolhidos 11 tratamentos que se referiam ao cultivo de soja em sucessão ao milho solteiro, soja em sucessão às forrageiras *Brachiarias brizantha*: cvs. (Xaraés, Piatã, Marandú e Paiaguás) e *Brachiaria ruziziensis*, e soja em sucessão ao milho consorciado com as *Brachiarias* com supressão de herbicida (Quadro 2).

3.4 Dados climáticos

Os dados climáticos foram obtidos na estação meteorológica da Embrapa Agropecuária Oeste – Guia clima (2021), em Dourados-MS, durante a avaliação do experimento da cultura da soja, no período de outubro a fevereiro, correspondendo às safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021 (Figura 1).

Figura 1 – Dados de precipitação pluviométrica (mm) e de temperaturas (°C) máxima e mínima por decêndio, no período de outono a fevereiro, safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021



Fonte: Embrapa (2021).

3.5 Avaliações químicas

O solo foi caracterizado quimicamente, de acordo com a metodologia descrita em Claessen (1997), no momento das amostragens de solo para as determinações microbiológicas, conforme a Tabela 1. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico, com textura argilosa, de acordo com Santos e Maia (2013), contendo 580 g kg^{-1} de argila, 150 g kg^{-1} de silte e 220 g kg^{-1} de areia. O conteúdo de MO foi determinado pela mesma metodologia de Claessen (1997), como mostra a Figura 6. Ressalta-se que os valores médios são de duas épocas de avaliação (janeiro de 2018 e janeiro de 2019).

Tabela 1 – Características químicas de amostras do solo, em sistemas de cobertura. Milho (Mi), forrageiras B. brizantha cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e B. ruziziensis (R), e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida

Variáveis	pH	Al	Ca	Mg	K	P	V	
Coberturas de solo	H ₂ O		-----mmolc dm ⁻³ -----				mg dm ⁻³	%
Mi	6,4	0,0	45,5	22,2	4,3	54	66,0	
MX	6,2	0,0	48,8	22,4	5,2	41	65,0	
MP	6,6	0,0	49,9	24,8	3,9	24	71,3	

continua...

Variáveis	pH	Al	Ca	Mg	K	continuação...	
						P	V
Coberturas de solo	H ₂ O		-----mmolc dm ⁻³ -----			mg dm ⁻³	%
MPa	7,0	0,0	56,6	30,6	7,4	68	79,6
MR	6,1	0,0	34,4	18,1	5,2	27	54,9
MM	6,3	0,0	48,7	24,6	5,4	43	64,7
X	6,3	0,0	47,7	24,1	6,3	31	65,7
P	6,3	0,0	49,2	25,1	5,0	17	68,1
Pa	6,4	0,0	55,2	29,4	5,6	22	70,4
R	6,2	0,0	46,9	24,0	2,8	14	64,4
M	6,5	0,0	55,2	28,7	4,7	26	71,6

Fonte: elaborada pelo autor.

3.6 Avaliações microbiológicas do solo

As determinações microbiológicas foram realizadas por meio da amostragem de solo nos seguintes períodos: janeiro/2019 (safra de 2018/2019) e janeiro/2020 (safra de 2019/2020). A coleta foi feita em pleno florescimento da cultura da soja, quando há alta atividade metabólica da planta, com máxima extração de nutrientes e liberação de exsudatos.

As amostragens de solo foram efetuadas nas entrelinhas de cada parcela, na camada de 0 a 0,10 m de profundidade, e cada amostra foi composta por quatro subamostras. Após homogeneização, elas foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificados, e armazenados em câmara fria (4 °C). Posteriormente, elas foram peneiradas em malha de 2 mm, sendo destorroado manualmente e retirados os possíveis fragmentos de raízes, vegetais e organismos remanescentes.

O solo foi acondicionado em recipientes plásticos, umedecido uniformemente com o auxílio de um borrifador contendo água destilada, até atingir 50-70% da capacidade máxima de retenção de água, e incubado por 24h a fim de proporcionar maior atividade dos microrganismos do solo. Logo após isso, foram pesadas seis subamostras derivadas da amostra original (reservada), usando uma balança semi-analítica com uma precisão de 0,1g, quatro contendo 20g de solo e duas com 50g de solo, em frascos cilíndricos de vidro (*snaps*) com tampa.

3.6.1 Carbono da Biomassa Microbiana do Solo (C-BMS)

Foi realizada pelo método da fumigação-extração, e adotando-se o fator de correção para eficiência de extração (k_{ec}) igual a 0,33 (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987). A extração de carbono do solo foi executada em amostras não fumigadas e fumigadas.

A seguir, são descritos os procedimentos feitos com as quatro subamostras de 20 g, duas para amostras fumigada e duas para não fumigada.

3.6.1.1 Obtenção do carbono das subamostras fumigadas

Colocou-se as duas subamostras de 20g em um dessecador, juntamente com um frasco contendo 20 ml de clorofórmio puro e analítico (CHCl_3) para determinação do carbono total do solo (amostra fumigada), tampou-se o dessecador, e o submeteu a aspiração por três vezes de, no mínimo, cinco minutos cada, através de uma bomba de vácuo, até que sua pressão interna atingisse valores próximos a -625 mmHg.

Em seguida, a válvula do dessecador foi fechada, permanecendo com a bomba ligada para que a sua pressão interna reduzisse, acelerando a volatilização e a saturação da fase gasosa pelo clorofórmio líquido. O dessecador foi mantido com as subamostras em sala escura por 24h, com temperatura em torno de 30 °C. Após esse período, foi removido o vapor de clorofórmio remanescente com o auxílio da bomba de vácuo, com três aspirações sucessivas, cada uma com duração correspondente ao tempo necessário para que a pressão atingisse valores próximos a -550 mmHg.

Retirados os frascos de subamostras de solo do dessecador, em cada um deles foram adicionados 50 ml de sulfato de potássio K_2SO_4 0,5 mol/L, chamada de “solução extratora”. Para o preparo dessa solução, utilizou-se K_2SO_4 0,5 M + água destilada. Os frascos foram tampados e transferidos para o agitador. Em seguida, ajustou-se o pH do solo na faixa de 6,5 a 6,8 e agitou-se em 250 rpm durante 30 minutos. Decorrido esse tempo, as subamostras ficaram em repouso por 20 minutos antes de se iniciar o processo de pipetagem.

Por sua vez, o processo de pipetagem consiste no seguinte: com uma pipeta, foram retirados 10 ml do líquido sobrenadante da subamostra, e transferido para o papel-filtro, dobrado em forma de cone, sobre o *erlenmeyer*. Dessa forma, à medida que se verificou uma quantidade suficiente filtrada no *erlenmeyer*, foi retirada uma alíquota de 2 ml e transferida para um tubo de ensaio de 20 ml para a preparação das subamostras para leitura. Para este outro processo, executam-se os passos descritos a seguir: no extrato filtrado contendo 2 ml, adicionou-se em ordem: 3 ml de água deionizada, 2,5 ml da “solução de trabalho” e 2,5 ml de ácido sulfúrico concentrado. Após isso, agitou-se, e foi colocado em repouso por 2h.

Quanto ao preparo da solução de trabalho aplicada na leitura das subamostras filtradas, descreve-se que em um balão volumétrico de 1000 ml, colocou-se 200 ml de H_2O desmineralizada e, em ordem, foram adicionados os seguintes componentes: 300 ml de

pirofosfato de sódio (NaP_2O_7) 0,1M; 46 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,5 M; 20 ml de permanganato de potássio (KMnO_4) 0,1 M; e 80 ml de sulfato de manganês monohidratado ($\text{MnSO}_4\text{H}_2\text{O}$) 0,1 M. Essa solução deve ser sempre armazenada em recipiente escuro envolvido por papel alumínio e acomodado em local escuro a temperatura ambiente, permanecendo nessas condições por semanas.

No tocante à leitura das subamostras, foram feitas as leituras de absorvância da curva padrão e das subamostras em espectrofotômetro, utilizando-se um comprimento de ondas de 495nm, para encontrar a equação de reta entre a absorvância e a concentração de carbono. Já na leitura da curva padrão, conforme a Tabela 2, o aparelho foi zerado com a concentração máxima de carbono (24 mg L^{-1}), tendo em vista que o processo é de redução do permanganato de potássio pelo carbono.

A concentração máxima de carbono admitida, considerando esse procedimento, é o correspondente a 24 mg L^{-1} . A partir disso, é observada a linearidade entre a absorvância e a concentração de carbono, conforme a lei de Lambert e Beer (LIMA, 2011). A seguir, descreve-se a equação para o cálculo do C-BMS:

$$\text{C BMS} = (\text{C(amostras fumigadas)} - \text{C(amostras não-fumigadas)})/0,33$$

Tabela 2 – Concentrações de carbono e respectivas absorvâncias a 495 nm

C (mg L^{-1})	Abs (nm)
24	0
18	0,053
12	0,112
6	0,170
0	0,223

Legenda: equação dessa curva: $\text{Abs} = 0,2242 - (0,0094 * \text{C})$ $R^2 = 0,9996$.

Fonte: elaborada pelo autor.

3.6.1.2 Obtenção do carbono das subamostras não fumigadas

As subamostras não fumigadas não passam pelo dessecador, pois assim que foram pesadas em *snaps*, as duas subamostras de 20g de solo foram incubadas por 24h. Depois foi adicionada em cada uma delas a solução extratora de 50 ml de sulfato de potássio K_2SO_4 0,5 mol/L. Posteriormente, ajustou-se o pH do solo na faixa de 6,5 a 6,8 e agitou-se durante 30 minutos a 250 rpm, e colocou-se em repouso por 20 minutos. Os procedimentos após o repouso foram os mesmos efetuados com as subamostras fumigadas: processo de pipetagem,

preparo das subamostras para leitura e leitura para a determinação do carbono da biomassa microbiana.

3.6.2 Respiração microbiana (C-CO₂)

A respiração microbiana foi obtida pelo método da respirometria (evolução de CO₂), em que as subamostras de 50g de solo em *snaps* foram acondicionadas dentro de potes herméticos de 500 ml, contendo em seu interior frascos com 10 ml de solução de NaOH, permanecendo incubadas por um período de sete dias em ambiente escuro. Como testemunha, foi feita uma amostra contendo apenas o frasco com NaOH no interior do pote hermético, amostra em branco (BR). Após o período de incubação, realizou-se a titulação das amostras.

Por seu turno, o processo de titulação consistiu-se em: após abertos os potes herméticos, o conteúdo do frasco contendo 10 ml de solução de NaOH foi analisado adicionando-se 2 ml de BaCl₂, duas gotas de solução alcoólica de 1% de fenolftaleína (indicador) e, na sequência, titulado com HCl 0,5 M.

Já o preparo das soluções para a titulação se deu da seguinte forma: NaOH 1N = pesou-se 40 g do NaOH e diluiu-se em 1000 ml de água destilada; HCl 0,5N = foi pesado 41,75 ml de ácido clorídrico concentrado e diluído em 1000 ml de água destilada; BaCl₂ 10% = pesou-se 10 g do BaCl₂ e diluiu-se em 100 ml de água destilada; Fenolftaleína 1% = foi pesado 1 g de fenolftaleína e diluído em 100 ml de álcool. O cálculo da respiração microbiana foi feito utilizando-se o método da titulação com captura de CO₂ por NaOH:

$$\text{C-CO}_2 \text{ (mg)} = (\text{BR-HCl}) * 0,5 * 40 * (44/80) * 1000 * (12/44) / \text{PS} 50 \text{g/7}$$

Em que:

(BR-HCl): indica, indiretamente, a presença da espécie química (CO₂) que reagiu com o NaOH;

0,5: normalidade do HCl (meq-g/ml);

(BR-HCl)*0,5: número de equivalentes do HCl correspondentes à espécie química (CO₂) que reagiram com o NaOH;

40: meq-g do NaOH (mg);

[(BR-HCl)*0,5]*40: massa (mg) do NaOH que reagiu com a espécie química (CO₂);

1CO₂ + 2NaOH = 1Na₂CO₃ + 1H₂O;

44/80: CO₂/NaOH (massa de CO₂ que reage com NaOH);

1000: 1mg = 1000 microgramas (resultado em microgramas);

12/44 = C/CO₂ (massa): massa do C determinado a partir do CO₂ metabolizado;

- BR: amostra em branco;
 HCl: solução de HCl 0,5N gasto na titulação;
 PS50g: peso seco do solo a partir de 50g;
 7: dias de incubação.

3.6.3 Derivados (qCO_2 e $qMIC$)

O quociente metabólico (qCO_2) foi obtido pela divisão dos valores da respiração microbiana pelo do carbono microbiano:

$$qCO_2 (\mu\text{g C-CO}_2 \mu\text{g}^{-1}) = (\mu\text{g CO}_2 / \mu\text{g C-BMS}h^{-1})$$

O quociente microbiano ($qMIC$) é expresso em porcentagem, calculado conforme a seguinte fórmula:

$$qMIC (\%) = (C-BMS/Corg) \times 100$$

3.7 Avaliação de resistência do solo a penetração

A determinação da RP foi realizada em dezembro/2019, por meio de um penetrômetro eletrônico acoplado a um quadriciclo, denominado de SoloStar, modelo PLG5500 (FALKER, 2010). Os dados de RP foram coletados até 40 cm de profundidade, a cada 2,5 cm, em 4 pontos espaçados a cada 100 cm por parcela. Foram observados os valores médios de RP nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30, e 30 a 40 cm.

3.8 Avaliação da umidade do solo

A umidade do solo foi determinada para caracterização, por meio do método gravimétrico proposto pela Embrapa (1997), conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Teor de água no solo (%) nas profundidades avaliadas em diferentes sistemas de cobertura. Milho (M) e forrageiras *B. brizantha* cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e *B. ruziziensis* (R), milho consorciado com as forrageiras, safra de 2019/2020

Variável	Teor de água no solo (%)			
	--0-10--	--10-20--	--20-30--	--30-40--
Profundidade (cm)				
Mi	18,68	19,21	20,76	21,95
MX	19,44	21,35	19,15	21,40
MP	20,29	20,60	21,48	21,39
MPa	19,15	20,64	21,50	21,94
MR	20,26	20,69	21,57	22,66

continua...

Variável	Teor de água no solo (%)			
	--0-10--	--10-20--	--20-30--	--30-40--
MM	18,39	19,65	21,73	22,58
X	19,82	21,69	22,13	22,41
P	19,47	20,10	21,22	21,83
Pa	19,00	19,49	16,65	22,20
R	19,67	19,88	21,73	22,45
M	18,92	20,79	21,88	22,40
Média	19,37	20,37	20,89	22,11

Fonte: elaborada pelo autor.

3.9 Avaliação da produtividade de palhada de milho mais forrageira

A produtividade de massa seca da palhada das *Brachiarias* solteiras e consorciadas com milho, e do milho solteiro, foram determinadas em setembro por ocasião da dessecação, nas safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021, por meio da coleta da palhada em uma área de 1,0 m² (quatro amostras de 0,25 m²), e extrapolada em megagramas por hectare (Mg ha⁻¹). O material foi amostrado e pesado em laboratório, por meio de uma balança de precisão, e encaminhado para a estufa de ventilação forçada, com temperatura entre 55 °C e 65 °C até atingir o peso constante. Após a secagem, foi novamente pesada para determinação da massa seca.

3.10 Avaliação de produção na cultura da soja por ocasião da colheita

A produtividade de grãos de soja (PG) foi determinada colhendo os grãos com uma colhedora mecânica, em três linhas de 20 m de comprimento, com área útil de 27 m² em cada parcela. Os grãos, após a limpeza, foram pesados em uma balança digital, corrigindo-se o grau de umidade para 13%. Para essa correção, utilizou-se a equação: “ $D = [(U_a - U_c) / (100 - U_c)] \cdot 100$ ”, onde U_a = umidade atual do produto e U_c = umidade de comercialização” (SILVA, 2008), sendo os valores expressos em Mg ha⁻¹.

3.11 Avaliação de produção na cultura do milho por ocasião da colheita

A produtividade de grãos de milho (PG) ocorreu em agosto de cada ano, e foram coletadas as espigas das duas linhas centrais de 5 m, excluindo-se a bordadura de 7,5 m de cada extremidade, perfazendo uma área útil de 9,0 m² por parcela, e após a debulha, os grãos foram pesados em uma balança digital, corrigindo-se o grau de umidade para 13%. Para essa

correção, usou-se a equação: “ $D = [(U_a - U_c) / (100 - U_c)] \cdot 100$ ”, onde U_a = umidade atual do produto e U_c = umidade de comercialização” (SILVA, 2008), sendo os valores expressos em $Mg\ ha^{-1}$.

3.12 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, sendo as médias das variáveis: biomassa microbiana e componentes (safras de 2018/19 e 2019/20), RP (safra de 2019/2020) e produtividade de palhada de milho mais forrageira, foram comparadas por meio do teste de Tukey, ao nível de probabilidade de 5%. As médias das variáveis produtividade da cultura da soja e produtividade da cultura do milho foram comparadas por meio do teste de Scott-Knott, ao nível de probabilidade de 5%. As médias das variáveis estudadas foram comparadas utilizando o *software* SISVAR (FERREIRA, 2011).

A matriz de correlação de Person ($p < 0,05$) para as variáveis dependentes foi definida conforme o grau de relação entre elas, por meio do programa computacional AgroEstat – Versão 1.1.0.712 (BARBOSA; MALDONADO JR., 2014). A força da correlação foi definida conforme Callegari-Jaques (2011) (Quadro 3).

Quadro 3 – Regras para a interpretação da força do coeficiente de correlação de Person com base em Callegari-Jaques (2011)

Correlação	Interpretação	Cores para interpretação
1,0	Correlação positiva (negativa) absoluta	
0,9 a 1,0 (-0,9 a -1,0)	Correlação positiva (negativa) muito forte	
0,6 a 0,9 (-0,6 a -0,9)	Correlação positiva (negativa) forte	
0,3 a 0,6 (-0,3 a -0,6)	Correlação positiva (negativa) regular	
0 a 0,3 (0 a -0,3)	Correlação positiva (negativa) fraca	
0	Nula	

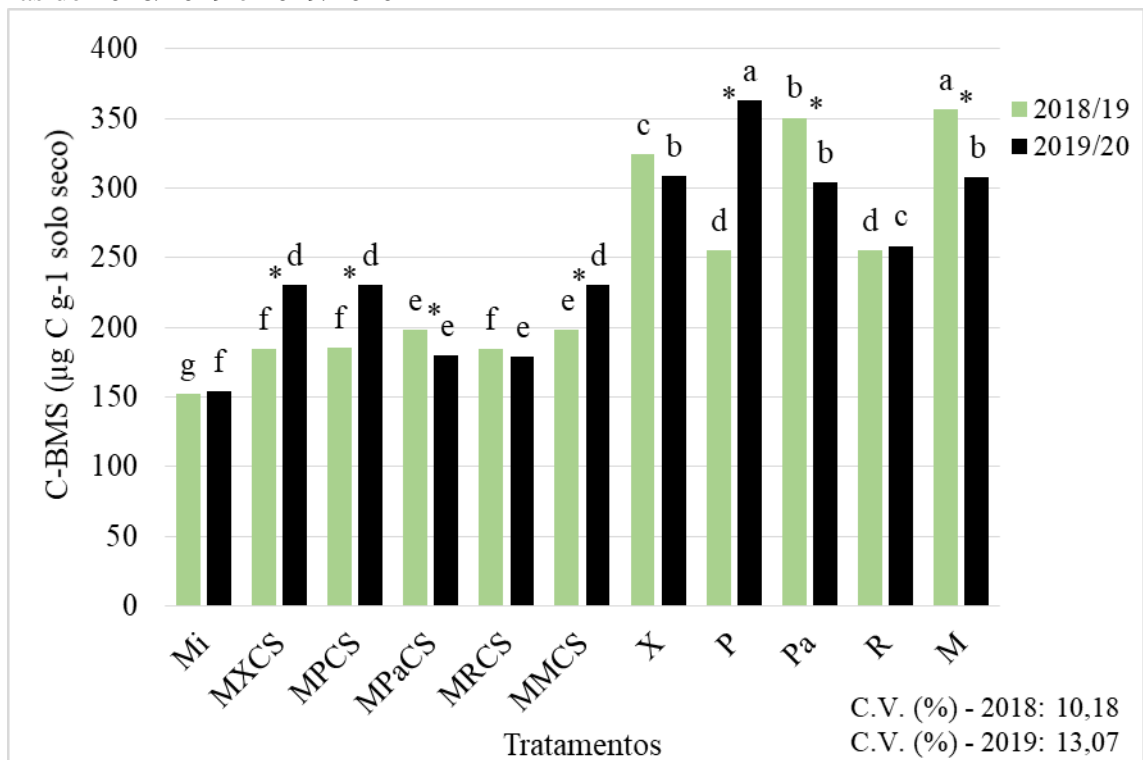
Fonte: elaborado pelo autor com base em Callegari-Jaques (2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Biomassa microbiana do solo

No que se refere os indicadores de qualidade do solo avaliados (C-BMS, C-CO₂, qCO₂, qMIC e MO), nas safras de 2018/2019 e 2019/2020, em Latossolo Vermelho Distroférico, foram observadas diferenças entre o cultivo de soja em sucessão ao milho solteiro, soja em sucessão às *Brachiarias* solteiras e soja em sucessão às *Brachiarias* consorciadas com milho com supressão do herbicida nicosulfuron ($p < 0,05$), conforme mostram as Figuras 2, 3, 4, 5 e 6.

Figura 2 – Valores médios de carbono da biomassa microbiana (C-BMS) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras *B. brizantha* cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e *B. ruziziensis* (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS) nas safras de 2018/2019 e 2019/2020



Legenda: médias seguidas pela mesma letra dentro de cada safra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (*) significativo ($p < 0,05$) para as safras. C.V. = coeficiente de variação.

Fonte: elaborada pelo autor.

A soja em sucessão às *Brachiarias* solteiras apresentou um aumento de aproximadamente 50% no C-BMS, em comparação com a soja em sucessão ao milho solteiro (Mi), usado como referência neste estudo, nas duas safras avaliadas. Dessa forma, entre os

sistemas de cultivo avaliados, o maior C-BMS foi verificado na sucessão à M, 356,2 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco, na safra de 2018/2019, e na safra de 2019/2020, a sucessão à P, C-BMS de 362,9 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco.

Resultados semelhantes foram observados por Sousa *et al.* (2020), em que o maior C-BMS foi verificado em sistemas manejados com forrageiras solteiras antecedendo ao cultivo de soja, e a *Brachiaria brizantha* cv. Marandú solteira foi destaque com maior C-BMS, apresentando 684,7 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco, quando comparada às forrageiras consorciadas com o milho e o milho solteiro. Esses autores atribuíram o resultado ao acúmulo de resíduos culturais, proporcionado pelo sistema de cultivo com forrageiras solteiras. Segundo Kara e Baykara (2014), a C-BMS é fortemente influenciada pela quantidade e qualidade do material orgânico adicionado pelas culturas.

Por seu turno, Assis *et al.* (2017) constataram em avaliações microbiológicas com sistemas de manejo envolvendo forrageiras solteiras, que o abundante sistema radicular fasciculado concentrado a 0,10 m resulta em um aumento da entrada de carbono no solo através das raízes e um acúmulo de massa seca na rizosfera, ativando a microbiota do solo.

Salton e Tomazi (2014) avaliaram o desenvolvimento radicular de *Brachiarias* consorciadas com milho e milho solteiro antecedendo a cultura da soja, e verificaram que o sistema radicular das forrageiras contribui de forma marcante para o crescimento das raízes das plantas subsequentes, como a soja, em sistema de plantio direto, beneficiando a estruturação do solo e a absorção de nutrientes. Desse modo, o cultivo de plantas com robusto sistema radicular, como as forrageiras, colabora para a formação de agregados pela liberação de exsudados, ação mecânica aproximando as partículas do solo e formando estruturas maiores, e a estabilidade de agregados maiores que 2 mm, proporcionando significativas melhorias na qualidade do solo, especialmente nos aspectos relacionados à estrutura e ao acúmulo de MO (BONETTI *et al.*, 2015; MENDONÇA *et al.*, 2013).

No entanto, estudos realizados por Carneiro *et al.* (2008a) e Silva *et al.* (2007), na soja em sucessão à *Brachiaria decumbens* e em sucessão à *Brachiaria Brizantha* cv. Marandú solteiras, constataram, respectivamente, C-BMS de 264,0 e 230,0 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco, não diferindo da sucessão ao milho consorciado com as mesmas forrageiras.

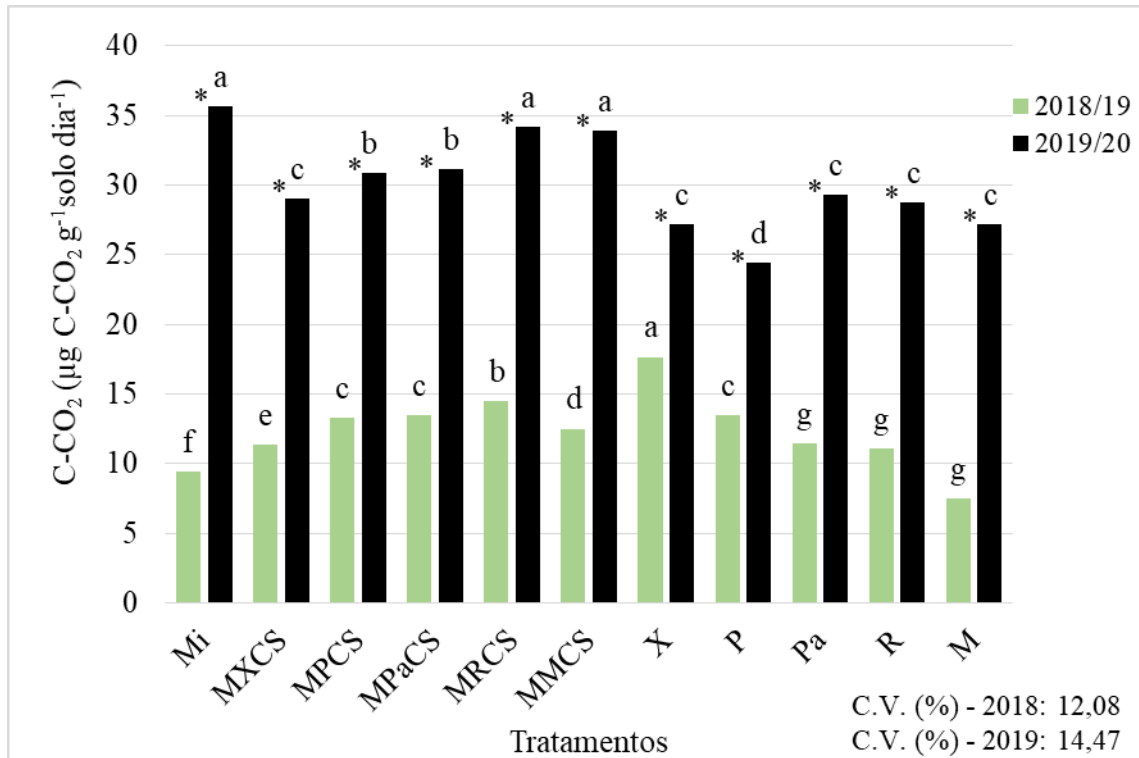
Verificou-se o menor acúmulo de C-BMS para a soja em sucessão ao Mi, tanto na safra de 2018/2019 quanto na de 2019/2020, respectivamente, 152,4 e 153,8 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco. Corroboram os resultados observados por Alves *et al.* (2011), em que o menor acúmulo de C-BMS de 140,0 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco foi percebido na soja em sucessão ao Mi, em comparação a soja em sucessão à *Brachiaria brizantha* cv. MG-5.

Diante disso, pôde-se observar o efeito benéfico das plantas de coberturas de *Brachiarias* solteiras antecedendo a cultura da soja, sobre a melhoria nas condições de desenvolvimento microbiano, refletindo em maior C-BMS. De acordo com Stenberg (1999), a maior quantidade de C-BMS evidencia a presença de maior quantidade de MO ativa no solo, capaz de manter elevada a taxa de decomposição de restos vegetais e, portanto, de reciclar mais nutrientes.

Dessarte, aumentos de C-BMS são condicionantes de um incremento na ciclagem de nutrientes no solo, pois eles estão imobilizados na massa seca e, após a decomposição, são liberados para o solo (CARNEIRO *et al.*, 2009). Para Carneiro *et al.* (2009), a biomassa microbiana constitui-se em uma reserva lábil de nutrientes, também rapidamente liberados para o solo, em virtude do baixo tempo de vida dos microrganismos.

Embora a C-BMS seja uma medida da microbiota viva do solo, essa característica é dinâmica e fornece pouca informação sobre a qualidade da biomassa, se avaliada isoladamente (SALTON *et al.*, 2011). Diante disso, os sistemas de cultivo analisados influenciaram o C-BMS e, conseqüentemente, a respiração microbiana medida por meio da liberação de C-CO₂, conforme demonstra a Figura 3.

Figura 3 – Valores médios de respiração microbiana (C-CO₂) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras *B. brizantha* cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e *B. ruziziensis* (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS), nas safras de 2018/2019 e 2019/2020



Legenda: médias seguidas pela mesma letra dentro de cada safra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (*) significativo ($p < 0,05$) para as safras. C.V. = coeficiente de variação.

Fonte: elaborada pelo autor.

De maneira geral, a respiração microbiana (C-CO₂) foi menor na safra de 2018/2019 em comparação à safra de 2019/2020. Provavelmente, pode ter ocorrido pelas condições edafoclimáticas, principalmente a alta pluviosidade no início de janeiro de 2019 (safra de 2018/2019), período em que se realizou a coleta de solo, possivelmente proporcionando menores níveis de estresse, favorecendo a atividade microbiana.

Entre os cultivos avaliados, na safra de 2018/2019 foi observado um menor teor de C-CO₂ liberado na soja em sucessão à M, apresentando 7,4 µg C-CO₂ g⁻¹ solo dia⁻¹. Na safra de 2019/2020, o menor teor de C-CO₂ também se manteve na soja em sucessão às forrageiras solteiras, sendo verificado 24,4 µg C-CO₂ g⁻¹ solo dia⁻¹ na sucessão à P.

Silva *et al.* (2007) notaram C-CO₂ de 1,8 µg C-CO₂ g⁻¹ solo dia⁻¹ para soja em sucessão à *B. decumbens* solteira, não diferindo da sucessão gramínea consorciada com o milho e Mi. Porém, resultados obtidos por Carneiro *et al.* (2008b), mostram que a C-CO₂ foi de 31,6 µg C-CO₂ g⁻¹ solo dia⁻¹ para a sucessão *B. Brizantha* cv. Marandú solteira, exibindo o menor teor liberado em comparação ao consórcio com o Mi.

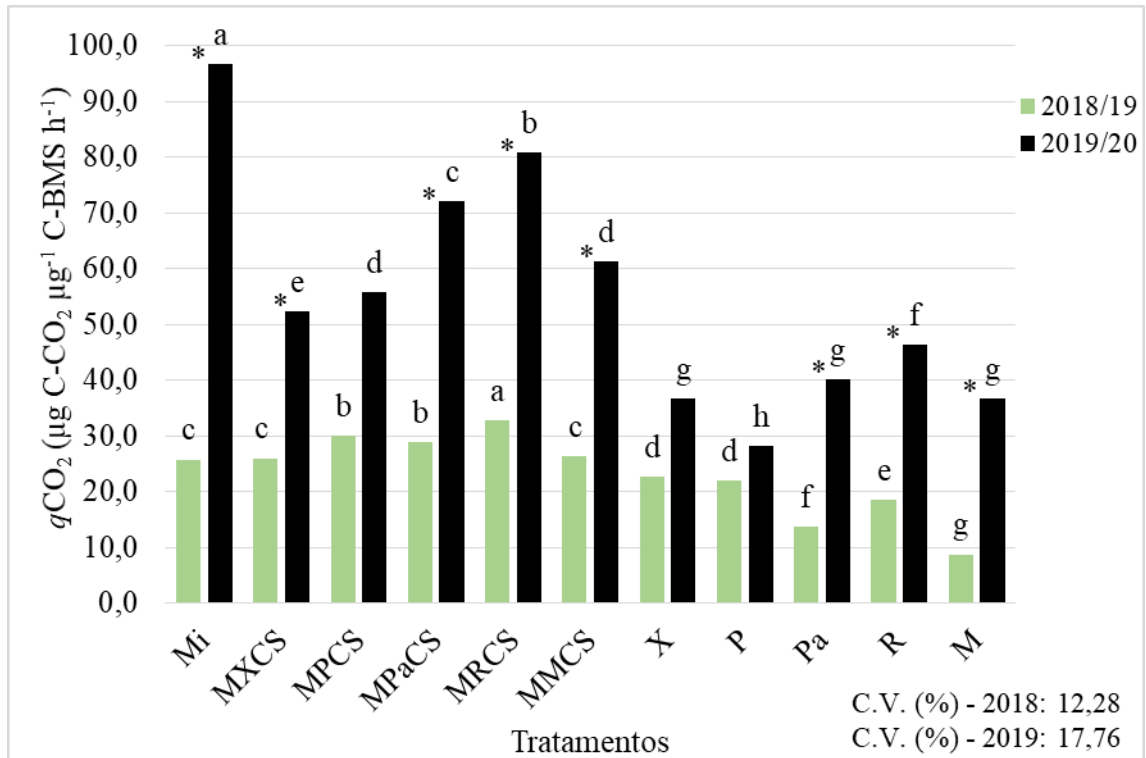
Pesquisas conduzidas por Alvarez *et al.* (1995) e Vargas e Scholles (2000) demonstraram que a baixa C-CO₂, como a verificada neste estudo para a sucessão M e P, pode estar associada a um conforto biológico proporcionado pelo cultivo, pois a C-CO₂ diminuía à medida que solo estava com maior quantidade de palhada, sendo influenciada pelo sistema de cultivo. Nesse sentido, o favorecimento do ambiente proporcionado por esses sistemas permitiu a estruturação do solo com melhor infiltração e armazenamento de água, maior aeração, agregação do solo e, conseqüentemente, melhores condições para a atividade de microrganismos.

Diante disso, a soja em sucessão ao Mi apresentou, na safra de 2019/2020, maior teor de C-CO₂, 35,7 µg C-CO₂ g⁻¹ solo dia⁻¹, quando comparado aos demais cultivos. Nesse caso, o teor de C-CO₂ mais elevado pode indicar estresse dos microrganismos pelo menor acúmulo de resíduos na superfície do solo, influenciando principalmente a umidade e a temperatura. No entanto, o C-CO₂ foi menor na safra de 2018/2019 para esse mesmo tratamento, e pode ter sido ocasionado pelo conforto trazido pela ótima umidade do solo nesse período mais chuvoso.

Vargas e Scholles (2000) verificaram que as culturas cultivadas sobre cobertura com forrageiras solteiras como, por exemplo, a soja, estiveram menos vulneráveis às mudanças climáticas, talvez pela maior proteção do solo por meio da cobertura vegetal, fazendo com que a incidência de raios solares seja menor, além da melhor conservação da umidade, favorecendo a existência de um microclima mais estável e sugerindo maior estabilidade do ecossistema.

Na avaliação de $q\text{CO}_2$ (Figura 4), observou-se de maneira geral a diferença entre as duas safras avaliadas, ocorrendo valores mais elevados na safra de 2019/2020, sendo influenciado diretamente pela C-CO₂ elevada. Porém, mesmo sob essa influência, os sistemas de cultivo exibiram diferenças quanto ao teor de $q\text{CO}_2$, acompanhando a tendência de resultados da safra de 2018/2019.

Figura 4 – Valores médios do quociente metabólico (qCO_2) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras *B. brizantha* cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e *B. ruziziensis* (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS), nas safras de 2018/2019 e 2019/2020



Legenda: médias seguidas pela mesma letra dentro de cada safra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (*) significativo ($p < 0,05$) para as safras. C.V. = coeficiente de variação.

Fonte: elaborada pelo autor.

As forrageiras solteiras, nas duas safras, mostraram menor teor de qCO_2 quando comparado aos demais sistemas de cultivo. Verificou-se menor qCO_2 na soja em sucessão à M, com $8,7 \mu\text{g C-CO}_2 \mu\text{g}^{-1}\text{C-BMS h}^{-1}$, na safra de 2018/2019, e na safra de 2019/2020 o menor qCO_2 na soja em sucessão à P, com $28,0 \mu\text{g C-CO}_2 \mu\text{g}^{-1}\text{C-BMS h}^{-1}$, em comparação à soja em sucessão ao Mi e consórcio das forrageiras com o milho. Logo, à medida que a biomassa microbiana se tornou mais eficiente, com o favorecimento de condições do ambiente desses sistemas (maior incorporação de palhada), menos carbono foi perdido na forma de CO_2 pela respiração e uma fração significativa desse elemento possivelmente foi incorporada ao tecido microbiano.

Resultados semelhantes encontrados por Sousa *et al.* (2020) apontam menor qCO_2 de $114,0 \mu\text{g C-CO}_2 \mu\text{g}^{-1}\text{C-BMS h}^{-1}$ na sucessão às *B. brizantha* cv. Piatã, em comparação à soja em sucessão ao Mi e consórcio das forrageiras com o milho, não havendo diferença na $C-CO_2$, porém, o C-BMS foi maior com $776,0 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco.

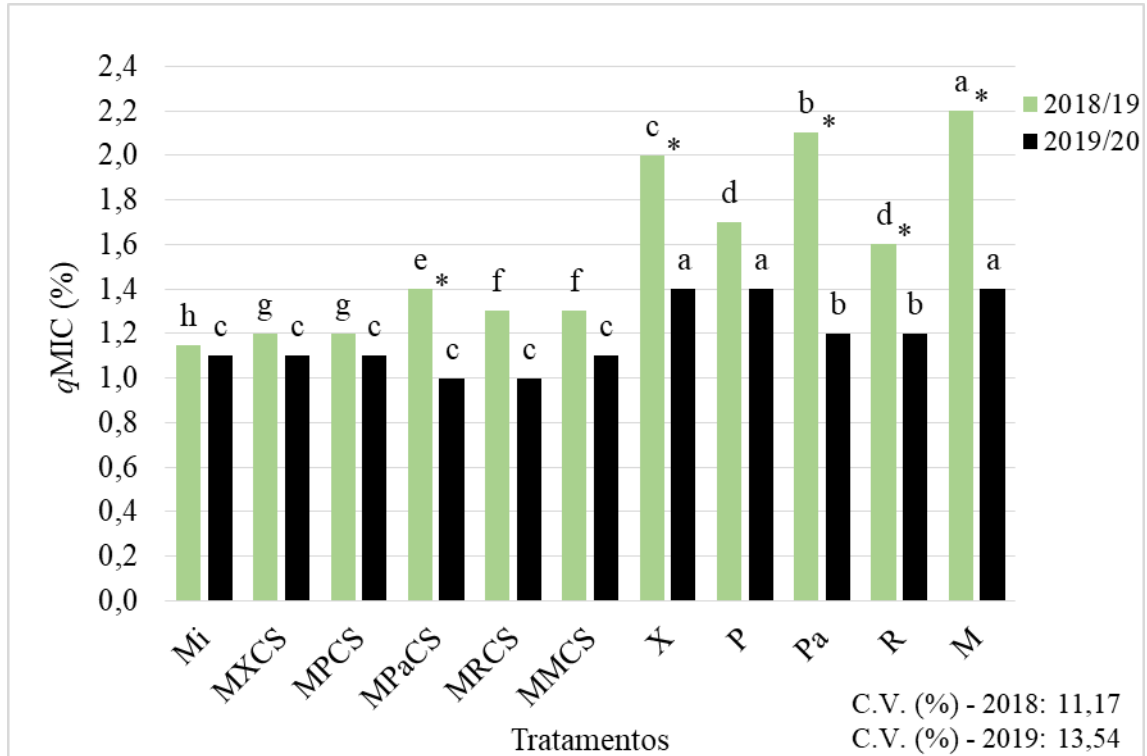
Observou-se na soja em sucessão a Mi maior qCO_2 , na safra de 2019/2020, em relação aos demais cultivos, apresentando $96,7 \mu\text{g C-CO}_2 \mu\text{g}^{-1}\text{C-BMS h}^{-1}$. Laroca *et al.* (2018) também verificaram maior qCO_2 no sistema soja em sucessão ao milho solteiro, com $43,0 \mu\text{g C-CO}_2 \mu\text{g}^{-1}\text{C-BMS h}^{-1}$, e menor na sucessão às forrageiras solteiras e consórcio de milho com *Brachiarias*, $12,3 \mu\text{g C-CO}_2 \mu\text{g}^{-1}\text{C-BMS h}^{-1}$.

Gomide, Silva e Soares (2011) perceberam que elevados valores de qCO_2 indicam maior gasto de energia para a manutenção da comunidade microbiana, ou seja, devido à uma situação de estresse ou distúrbio, possivelmente determinada pelo sistema de cultivo, os microrganismos poderiam ter que consumir mais substrato para a sua sobrevivência.

Estudos realizados por Sousa *et al.* (2020) enfatizaram que a sucessão *B. brizantha* cv. Piatã proporcionou reduções de 834% para qCO_2 , em comparação à soja em sucessão ao Mi. Nesse trabalho, houve a redução de até 71% no qCO_2 , quando utilizou-se da sucessão às M e P. Isso indica que a biomassa microbiana, para as *Brachiarias* solteiras, foi mais eficiente no uso dos compostos orgânicos, liberando menos carbono na forma de CO_2 e incorporando mais carbono aos tecidos microbianos (MERCANTE, 2001).

Na avaliação de $qMIC$, conforme a Figura 5, foram verificados valores superiores a 1% em todos os cultivos, apontando possíveis acréscimos de carbono no solo, ao longo do tempo. Esses valores estão de acordo com a porcentagem proposta por Jenkinson e Ladd (1981), que consideraram normal que 1 a 4% do carbono total do solo corresponda ao componente microbiano, sendo um indicador da qualidade da MO do solo.

Figura 5 – Valores médios do quociente microbiano ($qMIC$) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras *B. brizantha* cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e *B. ruziziensis* (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS), nas safras de 2018/2019 e 2019/2020



Legenda: médias seguidas pela mesma letra dentro de cada safra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (*) significativo ($p < 0,05$) para as safras. C.V. = coeficiente de variação.

Fonte: elaborada pelo autor.

Nesse sentido, segundo Cardoso *et al.* (2009) e Silva *et al.* (2010), o $qMIC$ expressa a quantidade de carbono orgânico no solo imobilizado na BMS, demonstrando o comportamento dos microrganismos na imobilização de carbono. Portanto, os índices de $qMIC$, quando mais altos, podem mostrar que valores do carbono orgânico no solo são elevados, enquanto valores reduzidos indicam perda de carbono no solo, ao longo do tempo, influenciado por diversos fatores, como o grau de estabilização do carbono orgânico e o histórico de manejo do solo (SILVA *et al.*, 2010; MERCANTE *et al.*, 2004).

De maneira geral, nas duas safras, a soja em sucessão às forrageiras solteiras mostraram maior $qMIC$ quando comparado à sucessão ao Mi e *Brachiarias* em consórcio com milho, destacando-se maior porcentagem na safra de 2018/2019, para a soja em sucessão à M, apresentando 2,2%, e na safra de 2019/2020, a maior porcentagem foi verificada na sucessão às P, M e X com 1,4%. Isso indica alta eficiência desses sistemas na incorporação do carbono e, conseqüentemente, maior equilíbrio ecológico.

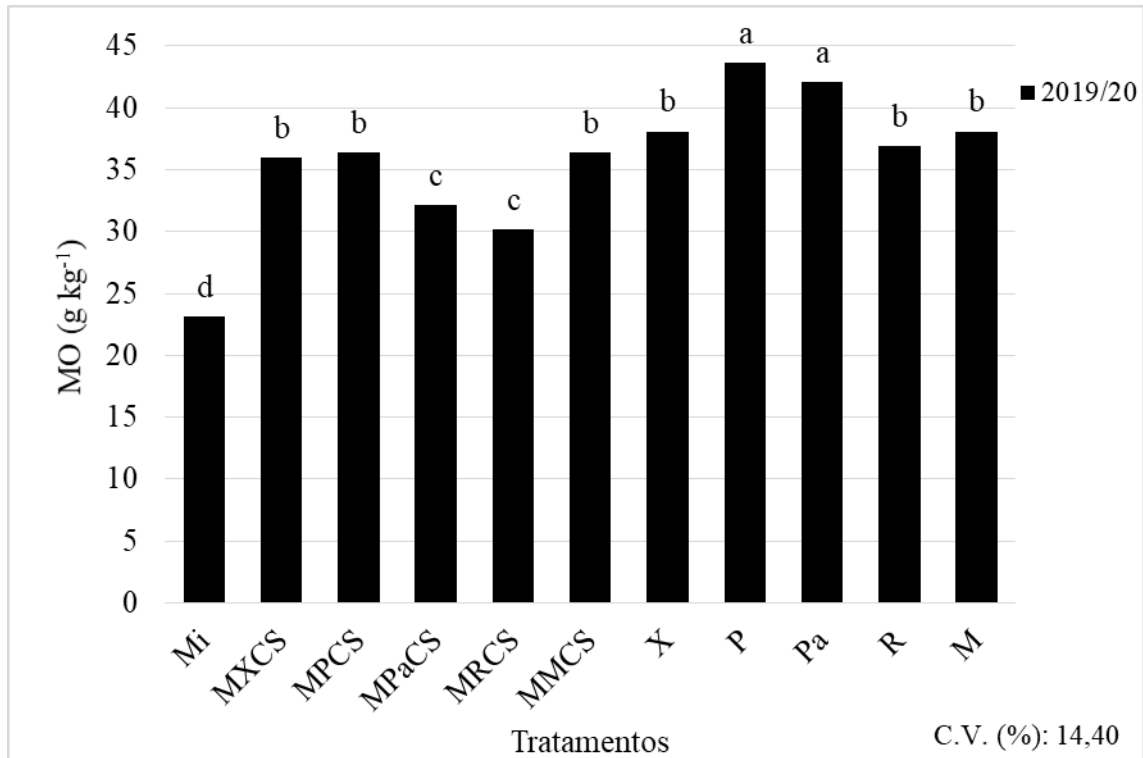
Resultados semelhantes foram observados por Muniz *et al.* (2011) para a *B. brizantha* solteira antecedendo a cultura da soja com maior $qMIC$ de 2,8%, indicando que a gramínea, devido à maior quantidade de palhada incorporada ao sistema, permite um ambiente mais favorável ao desenvolvimento da biomassa microbiana.

Nas duas safras avaliadas, o menor $qMIC$ foi notado na soja em sucessão ao Mi, com média de 1,1%, apontando possível ineficiência desse sistema na incorporação/sequestro de carbono, podendo ocorrer perdas de carbono do solo. Conforme explica Jenkinson e Ladd (1981), o valor adequado de $qMIC$ deve ser igual ou superior a 2,2%. Valores abaixo são indicativos de que uma maior quantidade de carbono está sendo perdida para a atmosfera e isso reduz a quantidade sequestrada no solo.

A maior $C-CO_2$ aliada à baixa concentração de $qMIC$ na soja em sucessão ao Mi, segundo Carneiro *et al.* (2008b), demonstra que, neste sistema de cultivo, estão ocorrendo perdas de carbono, pois uma baixa população microbiana do solo está necessitando de grande quantidade de carbono (energia) para sua manutenção, o que, de certo modo, pode ser comprovado pelos valores elevados de qCO_2 .

A MO do solo (Figura 6) representa todo o carbono orgânico presente no solo, e é dentro de seus reservatórios que está a BMS, a qual está quantificada, neste estudo, pelos indicadores de qualidade do solo avaliados. Esses indicadores relacionam-se diretamente com o indicador MO, fazendo parte de um ciclo no sistema solo alimentado pelos resíduos das culturas e o material de origem do solo (ROSCOE; MERCANTE; SALTON, 2006).

Figura 6 – Valores médios da matéria orgânica (MO) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com a soja sobre palhadas de milho solteiro (Mi) e forrageiras *B. brizantha* cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e *B. ruziziensis* (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão de herbicida (CS), na safra de 2019/2020



Legenda: médias seguidas pela mesma letra dentro de cada safra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (*) significativo ($p < 0,05$) para as safras. C.V. = coeficiente de variação.

Fonte: elaborada pelo autor.

Estudos executados por Oliveira *et al.* (2004) sobre os efeitos de sistemas de cultivo na concentração de MO demonstraram que as alterações no conteúdo de MO ocorrem a médio ou longo prazo, e requerem maior tempo para ser quantificadas. Ao analisar o conteúdo de MO, na safra de 2019/2020, verificou-se média geral de 36,0 g kg⁻¹, para os sistemas de cultivo, ocasionando incremento de 37%, comparado à análise feita em janeiro de 2014, no momento da implantação da área experimental, de 22,8 g kg⁻¹ de MO (KICHEL, 2018).

Entre os cultivos, observou-se maior concentração de MO para a soja em sucessão às P e Pa, respectivamente, 43,6 e 42,1 g kg⁻¹. Pesquisas conduzidas por Assis *et al.* (2017) demonstraram maior acúmulo de MO com 20,15 g kg⁻¹ de solo na soja em sucessão às forrageiras solteiras em comparação à Mi. Pignataro Netto, Kato e Goedert (2009) explicaram que solos sob palhada de forrageiras solteiras podem conferir níveis elevados de MO devido à alta eficiência na incorporação de carbono no solo.

No entanto, o menor conteúdo de MO foi verificado na soja em sucessão ao Mi, apresentando 23,0 g kg⁻¹. O menor conteúdo de MO, devido ao menor suprimento de resíduos

(Figura 7), conforme constatados nesta investigação, favorece processos dissipativos, ocasionando o comprometimento do fluxo de energia e matéria ao sistema, com ruptura de agregados e aumento na taxa de oxidação da MO. Como consequência, tem-se uma redução na energia armazenada e alterações na organização dos componentes do sistema em um nível inferior, culminando em compactação, baixa resistência à erosão, menor infiltração e retenção de água e menor produtividade do sistema vegetal (ROSCOE; MERCANTE; SALTON, 2006).

4.2 Resistência do solo à penetração

De maneira geral, houve menor RP na camada mais próxima à superfície do solo (0 a 10 cm), com aumento da resistência nas camadas subsuperficiais (10 a 20 e 20 a 30 cm), seguido de decréscimo nos valores na camada mais profunda (30 a 40 cm). É importante ressaltar que foram observadas diferenças nas avaliações de RP em diferentes profundidades.

Tabela 4 – Resistência à penetração do solo obtida sob palhadas de milho (Mi) e forrageiras *B. brizantha* cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e *B. ruziziensis* (R), milho consorciado com as forrageiras

Variável	Resistência à penetração do solo (MPa)			
	--0-10--	--10-20--	--20-30--	--30-40--
Mi	2,54 B a	3,46 A a	2,96 AB a	2,61 B a
MX	2,04 B c	2,96 A b	2,35 AB c	2,17 B c
MP	2,29 B b	3,01 B b	2,62 B b	2,41 A b
MPa	2,04 B c	2,96 A b	2,32 AB c	2,21 AB c
MR	2,25 B b	2,95 B b	2,66 B b	2,21 B c
MM	2,28 B b	3,44 A b	2,35 B c	2,23 B c
X	1,74 B d	2,69 A c	2,07 AB d	1,90 B d
P	1,57 B e	2,23 B d	1,77 B e	1,66 B e
Pa	1,58 B e	2,17 B d	1,79 B e	1,61 B e
R	1,59 B e	2,71 A c	2,08 AB d	1,65 B e
M	1,70 B d	2,70 A c	2,10 AB d	1,92 B d
Média	1,96 C	2,84 A	2,28 B	2,06 C
F	360,32*	137,21*	92,54*	98,68*
CV (%)	18,50	12,47	13,35	13,26

Legenda: médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. F= valor de F. *significativo ($p < 0,05$). CV=coeficiente de variação. ^{NS}=não significativo ($p > 0,05$).

Fonte: elaborada pelo autor.

De acordo com Souza *et al.* (2006), os valores de RP considerados críticos ao crescimento radicular das plantas variam de 1,50 a 4,00 MPa. Porém, estudos feitos por Marasca *et al.* (2011) em Latossolo Vermelho Distroférico, avaliando a RP e sua relação com

a produção da cultura da soja em sistema de cultivo soja/milho, demonstraram que os valores de RP nas camadas de 11 a 20 cm e 21 a 30 cm variaram de 2,9 a 4,28 MPa e não prejudicaram a produção da soja.

Dessa maneira, analisando as coberturas do solo estudadas, foram observadas diferenças nas avaliações de RP nos tratamentos sobre palhadas de milho (Mi), forrageiras solteiras e consorciadas dentro de cada profundidade. A menor RP sobre as palhadas solteiras de *B. brizantha* cv. Piatã e Paiaguás, e *B. ruziziensis*, foi nas camadas de 0 a 10 cm e 30 a 40 cm. Cortez *et al.* (2014) destacam que a menor RP encontrada na camada de 0 a 10 cm, em relação às camadas subjacentes, pode ser atribuída à deposição de MO, que contribui para a diminuição da densidade do solo. Nas camadas de 10 a 20 cm e 20 a 30 cm, verificou-se a menor RP somente sobre as palhadas das cultivares Piatã (2,23 e 2,17 MPa) e Paiaguás (1,77 a 1,79 MPa), também solteiras.

Nesse sentido, sistemas integrados com culturas anuais e forrageiras propiciam a redução da RP devido ao aumento da área explorada pelas raízes das forrageiras e leguminosas, em que possuem sistemas radiculares com diferentes comprimentos e diâmetros, que após a decomposição da massa radicular, contribuem para a formação de galerias, conferindo ao solo maior macroporosidade e, conseqüentemente, menor compactação do solo (MENDONÇA *et al.*, 2013). Resultados observados por Costa *et al.* (2012) indicaram que houve maior produção de raízes quando os valores de RP foram próximos a 1 MPa.

Logo, nos tratamentos de forrageiras em consórcio com o milho e de milho solteiro, observou-se valores acima de 2,0 MPa em todas as camadas avaliadas. O mesmo foi encontrado por Soares *et al.* (2015), estudando a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de consórcio milho e forrageiras, na camada de 0 a 5 cm, com valores acima de 2,0 MPa para o milho solteiro, e afirmam que isso pode representar um possível nível de compactação.

Dessa forma, o tratamento com palhada de milho solteiro elevou a RP em até 23%, quando comparado aos demais tratamentos em todas as profundidades e, ainda, pode-se observar RP média de 3,46 MPa na camada de 10 a 20 cm. Corroborando os valores de RP de 3,0 a 4,0 MPa apontados por Guimarães, Blainski e Fidalski (2013), em sistema de cultivo soja/milho, são considerados críticos para o desenvolvimento radicular em sistema de plantio direto.

Em áreas onde se aplica o sistema de cultivo soja/milho, ocorre uma restrição no desenvolvimento das culturas, devido à baixa concentração radicular, causando elevação da densidade do solo. De acordo com Stone e Silveira (2001), a densidade do solo influencia em

diversos atributos que regulam o crescimento e o desenvolvimento das plantas, alterando fortemente o aumento da RP do solo.

Analisando de forma geral os tratamentos com palhada de forrageiras solteiras, pode-se notar uma menor RP em todas as camadas avaliadas. Dessa forma, é possível afirmar que os tratamentos com cobertura das forrageiras solteiras reduziram de 18 a 25% a RP, quando comparados aos tratamentos com forrageiras consorciadas com o milho e, em comparação ao milho solteiro, houve uma redução média de 33%.

Esses resultados comprovam aqueles encontrados por Ferreira, Tavares Filho e Ferreira (2010), ao avaliar efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo, em que a camada 0 a 10 cm apresentou os menores valores de RP, indicando que a cobertura vegetal minimizou o efeito da compactação sobre a camada superficial do solo e, possivelmente, isso se deve à alta concentração de raízes.

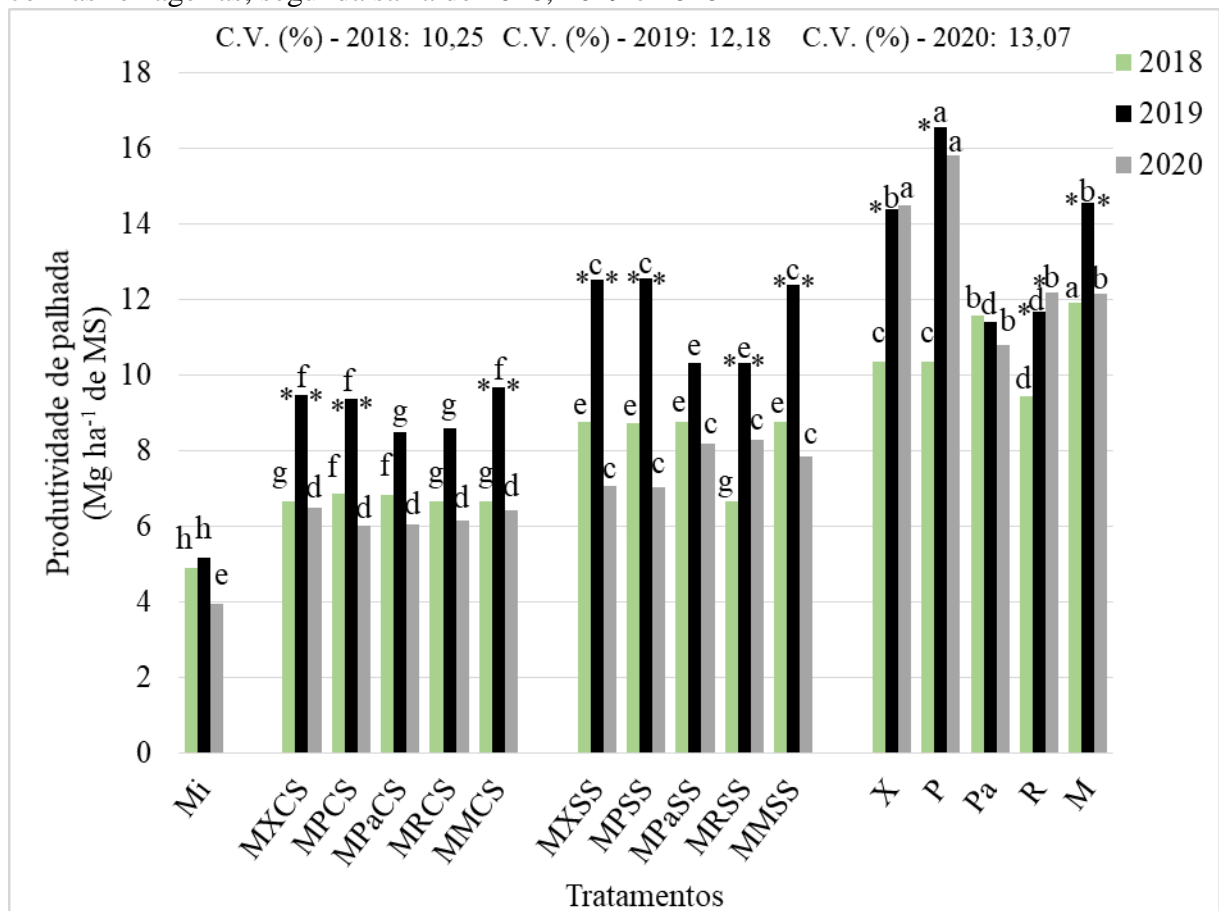
Logo, fica evidente a importância dos resíduos vegetais e a introdução das *Brachiarias* nos sistemas de cultivo para o processo de estruturação do solo, por promover maior teor de MO e estabilidade dos agregados do solo em virtude da intensa atividade biológica, resultando em maior aeração e infiltração de água no sistema, permitindo o maior desenvolvimento radicular das culturas (SILVA, 2016).

4.3 Produtividade de palhada

A diversificação das espécies vegetais nesses sistemas de cultivo (soja, milho e forrageiras) combinado com o manejo de plantio direto, voltado ao acúmulo de palhada em cobertura, têm estimulado a atividade microbiana do solo, aumentando os serviços ecossistêmicos e a resiliência do solo (LEMAIRE *et al.*, 2014).

Assim, avaliaram-se as produtividades de palhada das forrageiras solteiras e em consórcio com a cultura do milho, com e sem supressão com subdosagem de herbicidas nicosulfuron, e o milho solteiro, por três anos, obtidas por ocasião da dessecação para o cultivo da soja, que estão apresentadas na Figura 7.

Figura 7 – Produtividade de palhada, em Mg ha^{-1} de MS. Milho (M) e forrageiras *B. brizantha* cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e *B. ruziziensis* (R), milho consorciado com as forrageiras, segunda safra de 2018, 2019 e 2020



Legenda: médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (*) significativo ($p < 0,05$) para as segundas safras. C.V. = coeficiente de variação.

Fonte: elaborada pelo autor.

A produtividade média de palhada no ano de 2018 foi de $8,36 \text{ Mg ha}^{-1}$ de massa seca (MS), não diferindo de 2020, que apresentou $8,67 \text{ Mg ha}^{-1}$, porém ambos foram inferiores a 2019, que obteve $11,08 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 7). Dessa maneira, a maior quantidade de palhada pode ter ocorrido pelas melhores condições climáticas em 2019, influenciando a germinação e o estabelecimento principalmente das *Brachiarias*. A precipitação ocorrida nos primeiros 30 dias após a semeadura foi de 92 mm, em 2018, 200 mm, em 2019, e 100 mm, em 2020.

Ao avaliar os resultados referentes aos sistemas de cultivo, pôde-se observar, nos três anos, que a menor produtividade de palhada ocorreu na soja em sucessão à Mi, com média de $4,66 \text{ Mg ha}^{-1}$ de MS. Nesse sentido, é importante ressaltar que a cultura da soja em sucessão ao milho solteiro, há décadas na região de Cerrado brasileiro, é o sistema de cultivo mais utilizado e difundido no plantio direto. Contudo, neste estudo, observou-se que além de apresentar menor produtividade de palhada, foram verificados os piores resultados nos indicadores de qualidade de solo.

Constatou-se, nos três anos, as maiores produtividades de massa seca para as forrageiras solteiras, com 12,50 Mg ha⁻¹ de MS, seguidas das *Brachiarias* em consórcio com o milho sem supressão, 9,20 Mg ha⁻¹, e com supressão, 7,37 Mg ha⁻¹.

Ao observar as *Brachiarias* solteiras, em 2018, a sucessão à M apresentou a maior produtividade, com 11,92 Mg ha⁻¹ de MS, diferindo de 2019, em que a maior produtividade foi verificada na sucessão à P, com 16,56 Mg ha⁻¹. No entanto, em 2020 foi representada pela sucessão às P e X, respectivamente, com 15,79 e 14,48 Mg ha⁻¹.

Resultados semelhantes foram obtidos por Teixeira *et al.* (2009), avaliando forrageiras solteiras do gênero *Brachiaria*, que obteve a maior produtividade de palhada, com 12,45 Mg ha⁻¹ de MS em comparação ao Mi, que mostrou a menor produtividade, com 6,90 Mg ha⁻¹.

As maiores produtividades de massa seca obtidas neste estudo, para as forrageiras cultivadas solteiras na segunda safra, devem-se principalmente às condições favoráveis de fertilidade, umidade e temperatura, ocorridas no período de avaliação do experimento.

Ao analisar a palhada dos sistemas de cultivo, verificou-se que a soja em sucessão às M e P, além de apresentarem maior produtividade de MS de palhada, demonstraram índices considerados ótimos para os indicadores de qualidade do solo. Isto posto, sugere-se que, para maior obtenção de resíduos e, conseqüentemente, um acúmulo de MO, o sistema deve incluir as *Brachiarias*.

Diante disso, o maior volume de palhada foi de 13,70 Mg ha⁻¹, observado na segunda safra de 2019 para as *Brachiarias* solteiras, que possivelmente refletiu em incremento no conteúdo da MO em comparação a 2014, ano em que houve implantação do experimento. De acordo com o que foi verificado nas avaliações dos indicadores de qualidade do solo realizadas na safra de 2019/2020, houve um aumento de 37% na MO. Para o acúmulo de MO, é necessário não somente carbono, ofertado em grande quantidade pelas *Brachiarias*, mas também outros nutrientes, sendo o nitrogênio quantitativamente o mais importante, pois para acumular 1 Mg ha⁻¹ de C no solo na forma de MO, é necessário 80 kg N ha⁻¹ (ROSCOE; MERCANTE; SALTON, 2006).

Desse modo, a BMS, demonstrada neste estudo pela avaliação dos indicadores de qualidade do solo, forma um relevante reservatório de elementos, especialmente carbono e nitrogênio, pois na forma de tecido microbiano, estes estão temporariamente seguros contra perdas do sistema, sendo liberados de forma mais lenta e gradual (ALMEIDA; BAYER; ALMEIDA, 2016). Para esses reservatórios estarem funcionando de maneira equilibrada, o sistema de culturas como um todo deve retornar uma quantidade de resíduos para o solo, de

modo a possibilitar um saldo positivo entre a entrada e a saída desses elementos (ROSCOE; MERCANTE; SALTON, 2006).

Portanto, o processo de decomposição/liberação desses nutrientes acontece ainda de acordo com a cobertura ofertada ao sistema, a qual será constituinte da MO: se gramíneas, ocorre de lentamente, em razão do acúmulo de componentes recalcitrantes, tais como lignina, taninos e celulose, possuindo relação C/N maior, porém, se leguminosa, ocorre mais rapidamente, pois os materiais facilmente se decompõem, possuindo baixa relação C/N.

É essencial ressaltar que as forrageiras, através do maior aporte de palhada, disponibilizam maior diversificação de alimento aos microrganismos da BMS, por meio da variedade de propriedades químicas que proporcionam. Para Tisdall e Oades (1982), é possível que as forrageiras possam contribuir para a alta exsudação de compostos orgânicos ao longo de suas raízes, os quais podem ser utilizados por microrganismos como fonte de energia e carbono, aumentando sua diversidade e população (CALONEGO *et al.*, 2012).

O alto aporte de resíduos depositados sobre o solo, através das forrageiras, não só traz benefícios para a parte biológica do solo, pelo aumento no teor de MO, mas também influencia a física do solo, com a estruturação dos agregados e aeração do solo (WICK; DANIELS, 2009).

Resultados observados por Chávez *et al.* (2011) demonstraram que as forrageiras proporcionaram maiores aportes de carbono no solo por meio da quantidade e diversidade de massa seca e exsudatos liberados na rizosfera. Estudos realizados por Salton *et al.* (2005) apontaram um aumento expressivo no estoque de carbono do solo com o cultivo de soja em sucessão às *Brachiarias*, e isso se deveu à alta quantidade de carbono aportada pela utilização da pastagem no sistema.

Dessa maneira, o sistema de cultivo com soja em sucessão às *Brachiarias* diversifica a composição vegetal da cobertura viva e os resíduos culturais do solo, sendo o nitrogênio oferecido pela leguminosa, nesse caso, a soja (safra), importante para os microrganismos, pois constitui uma fundamental fonte de nutrição para o crescimento, o desenvolvimento e a fecundidade (PARRA; PANIZZI; HADDAD, 2009).

O consórcio de *Brachiarias* com milho é uma alternativa de estabelecimento de culturas para a produção de palhada (SEREIA *et al.*, 2012). Ceccon *et al.* (2015) orienta que a taxa de semeadura com o objetivo de produção de palhada deve ser de cinco a 10 plantas por m², com plantas distribuídas uniformemente na área. Porém, na implantação deste trabalho adotou-se a semeadura do milho a 0,90m e as *Brachiarias* a 0,40m, logo, formando um

estande com duas linhas de *Brachiarias* intercaladas com o milho, totalizando a quantidade média de 20 plantas por m².

Ao analisar as *Brachiarias* em consórcio com o milho, média dos três anos, observou-se uma redução na produtividade de palhada em 4 Mg ha⁻¹ de MS em comparação às *Brachiarias* solteiras, porém houve um incremento de 4 Mg ha⁻¹ de MS em relação ao Mi. Assim, notou-se o manejo com e sem supressão das *Brachiarias* em consórcio, sendo que o manejo adotado nesse trabalho para o tratamento com supressão é muito utilizado na literatura e é uma prática de campo, a aplicação do herbicida nicosulfuron na sobdosagem (6 g ha⁻¹ i.a.). No caso de altas populações de forrageiras em consórcio, para evitar perdas na produtividade do milho, torna-se importante a aplicação de um herbicida para supressão inicial da forrageira (CECCON *et al.*, 2010; KLUTHCOUSKI *et al.*, 2000).

Quando comparado o efeito do manejo das forrageiras, com e sem supressão com herbicida, média dos três anos, pode-se observar que as *Brachiarias* com supressão apresentaram redução na produtividade de palhada em 1,8 Mg ha⁻¹ de MS, em comparação às *Brachiarias* sem supressão de herbicida. Resultados similares foram percebidos por Ceccon *et al.* (2010), utilizando nicosulfuron (8 g i.a. ha⁻¹), aplicado aos 14 dias após a emergência, e proporcionou uma redução da produtividade em 3 Mg ha⁻¹ de MS, comparativamente ao tratamento sem aplicação do produto.

Todavia, as *Brachiarias* em consórcio com supressão de herbicida, mesmo apresentando menor produtividade de palhada em comparação ao sem supressão, obtiveram 7 Mg ha⁻¹ de MS, média dos três anos, e quando comparou-se ao Mi, houve aumento de até 43% de MS. Conforme resultados mostrados por Ceccon e Ximenes (2007), os valores de MS do consórcio com supressão obtidos neste trabalho cobrem o solo satisfatoriamente.

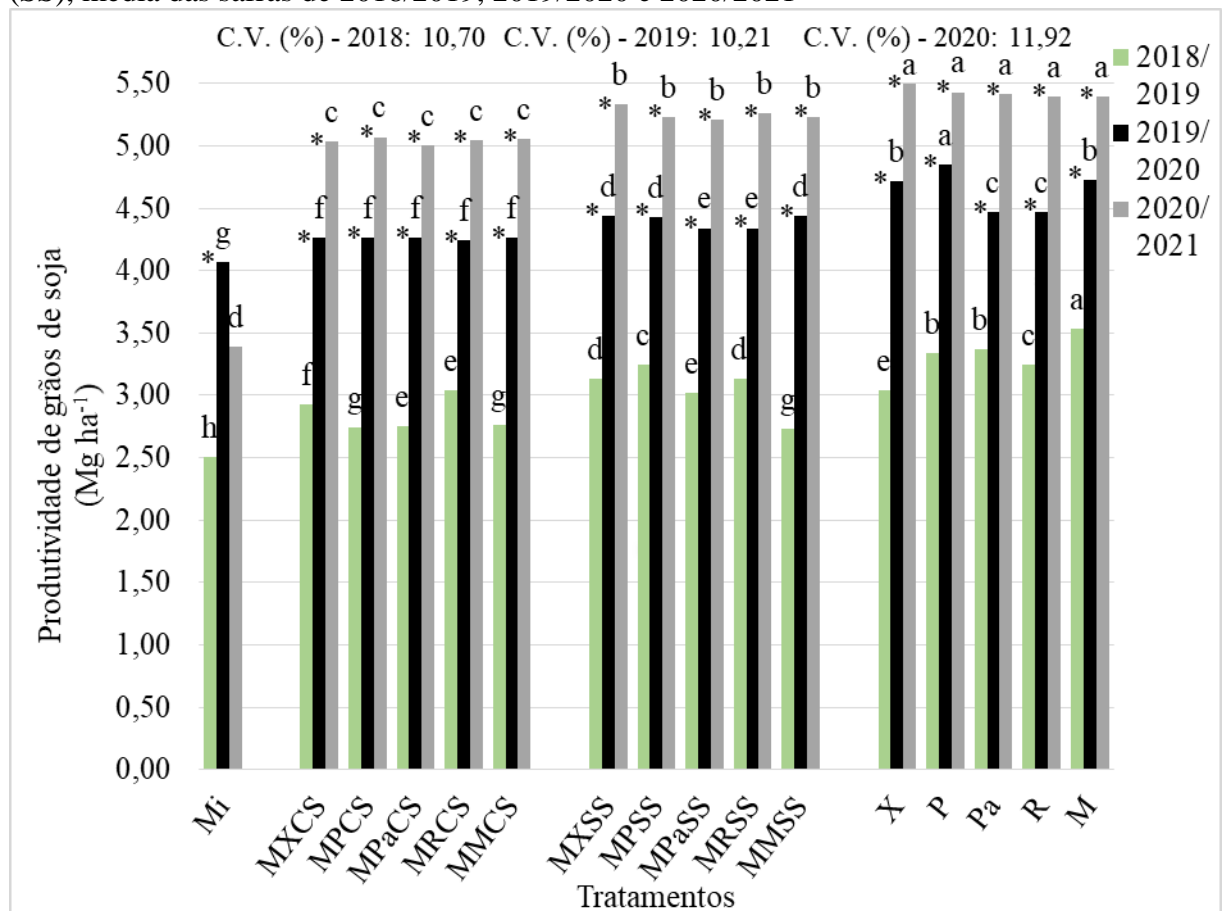
Cabe ressaltar que foram analisados os indicadores de qualidade do solo do consórcio *Brachiarias* com supressão, que apresentou melhores resultados em comparação ao Mi, indicando, mais uma vez, que o maior acúmulo de palhada foi determinante para melhorar esses atributos. Outro benefício relevante que os sistemas de consórcio das *Brachiarias* com milho, ou mesmo a gramínea solteira, traz é a redução do nível de infestação por plantas daninhas nos cultivos de soja subsequentes, ao longo do tempo de utilização.

4.4 Produtividade de grãos de soja e milho

O efeito das palhadas de forrageiras cultivadas solteiras e em consórcio com a cultura do milho, com e sem supressão, sobre a produtividade de grãos de soja (Figura 8),

apresentaram diferença entre as safras, em que pode-se observar maior valor na safra de 2020/2021, para todos os tratamentos, exceto aquele com milho solteiro.

Figura 8 – Produtividade de grãos de soja, em Mg ha⁻¹, obtida sobre palhadas de milho (Mi) e forrageiras *B. brizantha* cv. Piatã (P), Marandú (M), Xaraés (X), Paiaguás (Pa) e *B. ruziziensis* (R) solteiras, e milho consorciado com as forrageiras com supressão (CS) e sem supressão (SS), média das safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021



Legenda: médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. (*) significativo ($p < 0,05$) para as safras. C.V. = coeficiente de variação.

Fonte: elaborada pelo autor.

Nas três safras, observou-se uma menor produtividade de grãos de soja sobre a palhada de Mi, na ausência da palhada de forrageiras, em relação aos demais cultivos, apresentando média de 3,32 Mg ha⁻¹, reduzindo em 1,12 Mg ha⁻¹ quando comparado ao cultivo sobre a palhada das *Brachiarias* solteiras e 0,81 Mg ha⁻¹ para *Brachiarias* em consórcio com o milho. O mesmo foi verificado por Kichel *et al.* (2018), em que a soja que foi cultivada sobre a palhada de Mi obteve menor produtividade de grãos, de apenas 2,8 Mg ha⁻¹, com redução de 0,72 Mg ha⁻¹, em relação ao cultivo sob a palhada das *Brachiarias* solteiras.

Dessa forma, os resultados da soja sobre a palhada de Mi podem estar relacionados ao cultivo com menor quantidade de palhada (carbono), diminuindo a C-BMS, q_{MIC} e MO e aumento o q_{CO_2} e C- CO_2 , importantes indicadores de qualidade do solo, afetando as condições de solo e, possivelmente, influenciando a produtividade de soja.

A maior produtividade de grãos de soja foi constatada quando cultivada em sucessão à *Brachiaria* Marandú, com 3,53 Mg ha⁻¹, na safra de 2018/2019, e na safra de 2019/2020, a soja em sucessão à *Brachiaria* Piatã, 4,85 Mg ha⁻¹, com incremento de 1,00 e 0,78 Mg ha⁻¹, respectivamente, em relação ao milho solteiro. Esses tratamentos apresentaram alta quantidade de palhada no solo (carbono), que entra no sistema elevando a C-BMS, q_{MIC} e MO e diminuiu o q_{CO_2} e C- CO_2 , mitigando as perdas de carbono do solo, favorecendo maior ciclagem de nutrientes, umidade e temperatura, equilibrando o sistema solo, indicando resposta no rendimento de grãos de soja.

Algo similar foi notado por Kichel *et al.* (2018), no mesmo experimento deste estudo na safra de 2015/2016, em que as maiores produtividades de grãos de soja foram obtidas quando cultivadas sobre a palhada das forrageiras *Brachiaris* Xaraés e Marandú, aumentando a produtividade média em 0,81 e 0,75 Mg ha⁻¹, respectivamente, em relação ao cultivo de soja sobre palhada de milho solteiro.

Já Vilela *et al.* (2008) apresentaram dados que evidenciam o benefício das *Brachiaris*, com maior produtividade de soja sobre a palhada da *Brachiaria* Marandú, sendo 17 % superior à obtida na soja cultivada em palhada de milho solteiro. Verificou-se que na safra de 2020/2021 não houve diferença entre a soja semeada sobre as *Brachiaris* solteiras, tendo apresentado maiores produtividades, de forma que aumentaram 2 Mg ha⁻¹ quando comparada com a soja semeada em sucessão ao milho solteiro. É importante enfatizar que as maiores produtividades de palhada foram identificadas nesses tratamentos, seguindo a tendência das safras anteriores.

Ao avaliar as produtividades de soja cultivada sob a palhada de *Brachiaris* em consórcio com milho manejadas com e sem supressão do herbicida nicosufuron, houve diferença, na média de três safras, em que o consórcio sem supressão do herbicida aumentou a produtividade em 0,19 Mg ha⁻¹, quando comparado ao consórcio com supressão.

Por outro lado, a produtividade de soja cultivada sob a palhada de *Brachiaris* em consórcio com milho com supressão de herbicida apresentou crescimento de 0,69 Mg ha⁻¹, em relação à cultivada na sucessão com o milho, e a produtividade de soja em consórcio com milho sem supressão cresceu 0,88 Mg ha⁻¹ em comparação a sucessão à Mi. Isso sugere que a maior quantidade de palhada afetou positivamente a produtividade de grãos de soja.

Ao analisar a correlação entre as produtividades de soja, de palhada e os indicadores microbiológicos por meio de correlação simples de Pearson, pode-se observar um efeito significativo, sugerindo fortes associações entre esses indicadores (Tabela 5).

Tabela 5 – Correlação simples de Pearson entre as variáveis analisadas na palhada (2ª safra de 2018 e 2019), e soja (safra de 2018/2019 e 2019/2020) com a biomassa microbiana (safra de 2018/2019 e 2019/2020)

Safra/variáveis	C-BMS	C-CO ₂	qC-CO ₂	qMIC	MO	PP
----- Safra 2018/2019 -----						
PP (kg ha ⁻¹ de MS) - 2018	0,96**	-0,01NS	-0,90**	0,94**	0,75**	
PP (kg ha ⁻¹ de MS) - 2019	0,95**	-0,91**	-0,92**	0,94**	0,84**	
PG (Kg/ha) – safra 2018/19	0,82**	-0,16NS	-0,81**	0,89**	0,66*	0,91**
PG (Kg/ha) – safra 2019/20	0,93**	-0,89**	-0,91**	0,93**	0,76**	0,98**

Legenda: *significativo ($p < 0,05$); **significativo ($p < 0,01$); ^{ns} = não significativo ($p > 0,05$). C-BMS_carbono da biomassa microbiana; C-CO₂_respiração microbiana; qCO₂_quociente metabólico; qMIC_quociente microbiano; MO_matéria orgânica; PG_produtividade de grãos de soja; e PP_ produtividade de palhada de milho mais forrageira.

Fonte: elaborada pelo autor.

Ao comparar os efeitos da produtividade de palhada (PP) de diversos sistemas de cultivos sobre as variáveis da biomassa microbiana do solo, nas duas safras, foi possível observar o efeito positivo significativo ($p < 0,01$) muito forte sobre o C-BMS e qMIC, e o efeito forte sobre a MO, sugerindo que altas quantidades de palhadas (carbono), que entram no sistema foram responsáveis pelo aumento nos teores desses indicadores. No entanto, para a variável qCO₂ e C-CO₂ (safra 2019/2020), foi percebido o efeito negativo muito forte, logo, foi possível afirmar que quanto maior a quantidade de palhada, menores foram os teores desses indicadores.

Os indicadores de qualidade do solo estão diretamente relacionados ao sistema de manejo adotado, pois através do sistema de plantio direto, tendo as forrageiras solteiras e os consórcios como cobertura do solo antecedendo a cultura da soja, foi possível constatar o incremento de palhada na superfície do solo (Figura 7), a qual, após o processo de decomposição, resultou em uma melhoria nesses indicadores.

Além disso, pode-se observar que a produtividade de grãos mostrou um efeito positivo muito forte sobre a produtividade de palhada, demonstrando que quando se aumentou a palhada, a produtividade de grãos foi elevada. E, com isso, o efeito da produtividade de grãos de soja sobre os indicadores de biomassa microbiana praticou os mesmos resultados observados para a PP, nas duas safras.

Ao analisar a correlação entre as produtividades de soja, de palhada e RP, por meio de correlação simples de Pearson, pode-se observar uma correlação negativa, quanto menor o valor de RP, maior a produtividade de grãos de soja e palhada (Tabela 6). Dessa forma, as produtividades de palhada nas safras de 2018 e 2019 apresentaram correlação negativa entre muito forte e forte, demonstrando que quanto menores os valores de RP, maiores foram as produtividades de palhada, destaque para a produtividade de palhada na safrinha de 2018, na camada de 0 a 10, obteve correlação negativa muito forte. A produtividade de grãos de soja seguiu a mesma tendência da palhada, com correlação negativa forte em todas as profundidades avaliadas para as duas safras (2018/2019 e 2019/2020).

Tabela 6 – Correlação simples de Pearson entre as variáveis analisadas na palhada (2018 e 2019), e soja (2018/2019 e 2019/2020) com a resistência à penetração

Safr/váriáveis		Camada (cm)			
		0 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40
Palhada 2018	Produtividade (kg ha ⁻¹ de MS)	-0,92*	-0,83*	-0,87*	-0,87*
Palhada 2019	Produtividade (kg ha ⁻¹ de MS)	-0,84*	-0,75*	-0,85*	-0,80*
Soja 2018/19	PG (Kg/ha)	-0,87*	-0,81*	-0,79*	-0,86*
Soja 2019/20	PG (Kg/ha)	-0,84*	-0,75*	-0,81*	-0,78*

Legenda: *significativo ($p < 0,05$); ^{ns} = não significativo ($p > 0,05$). PG _produtividade de grãos de soja.

Fonte: elaborada pelo autor.

Quando comparado o efeito do manejo das forrageiras, com e sem supressão com herbicida na produtividade de grãos de milho (Tabela 7), média dos três anos, pode-se observar que o tratamento sem supressão das *Brachiarias* apresentou uma redução na produtividade de 0,39 Mg ha⁻¹ em relação ao tratamento com supressão. Isso indica maior competição das forrageiras sobre a cultura do milho sem supressão que mostrou maior população de plantas de *Brachiarias*.

Tabela 7 – Produtividade de grãos de milho, em Mg ha⁻¹, segunda safra do ano de 2018, 2019 e 2020

Tratamentos	2ª safra	2ª safra	2ª safra
	2018	2019	2020
	-----Mg ha ⁻¹ -----		
M	4,51 B a	4,90 B a	7,32 A a
MXCS	4,32 B a	4,62 B b	7,48 A a
MPCS	3,01 B b	4,95 B a	7,62 A a
MPaCS	3,56 B b	4,42 B c	7,09 A b
MRCS	4,50 B a	4,43 B c	7,06 A b
MMCS	3,89 B a	4,25 B e	7,28 A a

continua...

Tratamentos	continuação...		
	2ª safra 2018	2ª safra 2019	2ª safra 2020
	-----Mg ha ⁻¹ -----		
MXSS	3,88 B a	4,36 B c	7,39 A a
MPSS	2,67 B b	4,37 B c	7,49 A a
MPaSS	4,12 B a	4,33 B d	7,09 A b
MRSS	3,19 B b	3,62 AB f	6,50 A c
MMSS	3,54 B b	3,32 B g	6,79 A c
X	-	-	-
P	-	-	-
Pa	-	-	-
R	-	-	-
M	-	-	-
Média	3,74 B	4,32 B	7,19 A
F	6,00*	380,50*	4,65*
CV (%)	13,33	1,15	4,26

Legenda: médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna, para safra e segunda safra, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. F= valor de F. *significativo ($p < 0,05$). CV=coeficiente de variação. ^{NS}=não significativo ($p > 0,05$).

Fonte: elaborada pelo autor.

Verificou-se uma redução média de 0,35 Mg ha⁻¹ na produtividade de milho no cultivo consorciado com as *Brachiarias* com supressão de herbicida, quando comparado ao cultivo com Mi, e o consórcio sem supressão apresentou redução média de 0,73 Mg ha⁻¹. Conforme relatado por Richart *et al.* (2010), os fatores que podem ter contribuído na diminuição da produtividade de milho em cultivo consorciado com *Brachiarias* foram a competição por água, nutrientes e espaço para desenvolvimento das espécies.

No entanto, a perda na produtividade de milho no cultivo em consórcio com *Brachiarias* (segunda safra) pode ser compensada pelo incremento na quantidade de palhada e rendimento de grãos de soja (safra), dependendo dos objetivos da utilização do sistema, sendo economicamente viável. Além disso, a longo prazo, leva benefícios como a melhoria na qualidade de solo.

Logo, se os principais objetivos são a produção de grãos de milho, forragem para alimentação animal e palhada para o plantio direto, deve-se utilizar o consórcio do milho com *Brachiarias*, sem supressão de herbicida, pois apesar de produzirem 0,39 kg ha⁻¹ de grãos de milho a menos, produzirão mais 1,83 Mg ha⁻¹ de MS de palhada das *Brachiarias*, 0,19 Mg ha⁻¹ de grãos de soja a mais e vantagens econômicas, quando comparado com ao cultivo com supressão das forrageiras.

Porém, se os objetivos são a produção de grãos e palhada para o plantio direto, deve-se usar o consórcio do milho com *Brachiarias*, com supressão de herbicida, pois produzirão 0,39 Mg ha⁻¹ de grãos de milho a mais, apenas 20% menos de massa seca de palhada das *Brachiarias* e 0,19 Mg ha⁻¹ menos de grãos de soja.

Assim como Kichel *et al.* (2018), foi observado neste estudo que as quantidades de palhada superior a 10.000 kg ha⁻¹ de MS, com forrageiras de hábito decumbente, por exemplo, *Brachiaria ruziziensis*, podem dificultar na operação mecânica de semeadura, com araste de palhada e embuchamento, mesmo utilizando o disco em detrimento da botinha.

5 CONCLUSÕES

Considerando o exposto, conclui-se que a presença de maior quantidade de palhada de forrageira na superfície do solo afeta diretamente a microbiota do solo e indica que *Brachiarias* solteiras ou em consórcio, antecedendo ao cultivo de soja, influenciam positivamente a qualidade do solo, representando uma alternativa para o melhor manejo do solo.

Sendo assim, as coberturas com *Brachiarias* demonstram um melhor desempenho na avaliação de RP do solo em todas as profundidades. As *Brachiarias*, antecedendo a soja, ampliam a produção de palhada e, conseqüentemente, aumentam a produção de grão de soja.

Ademais, o sistema de soja em sucessão ao milho solteiro favorece a menor produção de palhada e menor produtividade de soja em comparação aos demais sistemas com *Brachiarias*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D. O.; BAYER, C.; ALMEIDA, H. C. Fauna e atributos microbiológicos de um Argissolo sob sistemas de cobertura no Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1140-1147, 2016.
- ALMEIDA, R. G. *et al.* **Taxas e métodos de semeadura para *Brachiaria brizantha* cv. BRS Piatã em safrinha**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte (comunicado técnico) (Infoteca-E), 2009.
- ALVARES, C. A. *et al.* Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 22, n. 6, 711-728, 2013.
- ALVAREZ, R. *et al.* Soil organic carbon, microbial biomass and CO₂-C production from tree tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Nova York, v. 33, n. 1, p. 17-28, 1995.
- ALVES, M. S. da S. **Uso de indicadores biológicos para avaliação da qualidade do solo sob cultivo de culturas agroenergéticas em Pedro Afonso, Tocantins**. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal de Tocantins, Palmas, 2014.
- ALVES, T. dos S. *et al.* Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 341-347, 2011.
- ANDRADE, F. R. *et al.* Desempenho agrônômico do milho a doses e épocas de aplicação de Nitrogênio no Cerrado piauiense. **Revista de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 57, n. 4, p. 358-366, 2014.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 857-865, 2000.
- ASSIS, P. C. R. *et al.* Biological soil properties in integrated crop livestock-forest systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, p. 1-12, 2017.
- BABUJIA, L. C. *et al.* Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 42, p. 2174-2181, 2010.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JR., W. AgroEstat - **Sistema para Análises Estatísticas de Ensaios Agrônômicos**. Versão 1.1.0.712, 2014.
- BATISTA, M. A. V. *et al.* Atributos de solo-planta e de produção de beterraba influenciados pela adubação com espécies da Caatinga. **Horticultura brasileira**, [s.l.], v. 34, n. 1, p. 31-38, 2016.
- BATTISTI, L. F. Z. *et al.* Soil chemical attributes in a high biodiversity silvopastoral system. **Acta Agronómica**, [s. l.], v. 67, n. 4, p. 486-493, 2018.

BINI, D.; SANTOS, C. A. *et al.* Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil. **European Journal of Soil Biology**, [s. l.], v. 55, p. 117-123, 2013.

BONETTI, J. de A. *et al.* Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 1, p. 104- 112, jan./mar. 2015.

CALLEGARI-JAQUES, S. M. **Correlação linear simples**. Bioestatística: Princípios e aplicações. 1. ed. Porto Alegre: Artmed Oficina de textos, 2011.

CALONEGO, J. C. *et al.* Persistência e liberação de nutrientes da palha de milho, braquiária e labe-labe. **Bioscience Journal**, [s. l.], v. 28, n. 5, p. 770-781, 2012.

CARDOSO, E. L. *et al.* Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 6, p. 631-637, jun. 2009.

CARNEIRO, M. A. C. *et al.* Atributos bioquímicos em dois solos de cerrado sob diferentes sistemas de manejo e uso. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 4, p. 276-283, 2008a.

CARNEIRO, M. A. C. *et al.* Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana do solo em duas cronossequências de reabilitação após a mineração de bauxita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 621-632, 2008b.

CARNEIRO, M. A. C. *et al.* Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009.

CARVALHO, J. L. N. *et al.* Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Nova York, v. 110, n. 1, p. 175-186, 2010.

CECCON, G. Milho safrinha com solo protegido e retorno econômico em Mato Grosso do Sul. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 17, n. 97, p. 17-20, 2007.

CECCON, G.; CONCENÇO, G. Produtividade de massa e dessecação de forrageiras perenes na integração lavoura pecuária. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 319-326, 2014.

CECCON, G. *et al.* **Implantação e manejo de forrageiras em consórcio com milho safrinha**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. 17 p.

CECCON, G. *et al.* Uso de herbicidas no consórcio de milho safrinha com *Brachiaria ruziziensis*. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 28, p. 359-362, 2010.

CECCON, G. *et al.* Legumes and forage species sole or intercropped with corn in soybean-corn succession in idwestern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 204-212, 2013.

- CECCON, G.; XIMENES, A. C. A. Sistemas de produção de milho safrinha em Mato Grosso do Sul. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA: RUMO À ESTABILIDADE*, 9., 2007, Dourados. **Anais [...]**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2007. p. 86-92.
- CHÁVEZ, L. F. *et al.* Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1254-1261, 2011.
- CHERUBIN, M. R. *et al.* A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 80, n. 1, p. 215-226, 2016.
- CHIODEROLI, C. A. *et al.* Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e *Urochloa*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 16, n. 1, p. 37-43, 2012.
- CHIODEROLI, C. A. *et al.* Consorciação de braquiárias com milho outonal em plantio direto sob pivô central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, p. 1101-1109, 2010.
- CLAESSEN, M. E. C. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Revista atualizada, 1997. 212 p.
- COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; BOLOTA, E. L. Atividade microbiana em solos cultivados em sistema de plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 84-91, 2001.
- CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de grãos**. Safra 2020/21 – Décimo levantamento. v. 8. Brasília: CONAB, 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 23 jul. 2017.
- CORTEZ, J. W. *et al.* Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 1000-1010, 2014.
- COSTA, M. A. T. *et al.* Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 993-1004, 2012.
- COSTA, N. R. *et al.* Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015.
- CUNHA, E. Q. *et al.* Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 603-611, 2011.
- DORAN, J. W. Soil quality and sustainability. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO*, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBCS, 1997. 1 CD-ROM.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (ed.). **Methods for assessing soil quality***. Wisconsin, USA: Soil Science Society American, 1996. p. 25-37.

EMBRAPA. **Guia clima** – temperatura, umidade, chuvas, e outros dados climáticos. Rio de Janeiro: Embrapa, 2021. Disponível em: https://clima.cpao.embrapa.br/?lc=site/banco-dados/base_dados. Acesso em: 15 jun. 2021.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Produção de informação, 1997. 212 p.

FALKER. **Automação Agrícola - SoloStar**. 1. ed. Porto Alegre: Falker, 2010. 7 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.

FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; TOSTES, R. Propriedades físicas e matéria orgânica de um Latossolo vermelho sob sistemas de manejo e cerrado nativo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 3, p. 24-30, 2008.

FRANCHINI, J. C. *et al.* Soybean performance as affected by desiccation time of *Urochloa ruziziensis* and grazing pressures. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5, p. 999-1005, 2014.

FRANCHINI, J. C. *et al.* **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. 1. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p.

FREITAS, L. *et al.* Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Unimar Ciências**, Marília, v. 26, n. 1, p. 8-25, 2017.

GARCIA, C. M. P. *et al.* Decomposição da palhada de forrageiras em função da adubação nitrogenada após o consórcio com milho e produtividade da soja em sucessão. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 2, p. 143-152, 2014.

GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 12, p. 1489, 2010.

GARDNER, C. M. K.; LARYEA, K. B.; UNGER, P. W. **Soil physical constraints to plant growth and crop production**. Roma: FAO, 1999. 106 p.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. 1. ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 8 p.

GOMIDE, P. H. O.; SILVA, M. L. N.; SOARES, C. R. F. S. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 567-577, 2011.

GREGORICH, E. G. *et al.* Biological attributes of soil quality. *In*: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. (ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam: Elsevier Science, 1997.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoque de Carbono e Nitrogênio e Fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 909-920, 2012.

GUIMARÃES, R. M. L.; BLAINSKI, E.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1512-1521, 2013.

GUIMARÃES, N. F. *et al.* Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, Portugal, v. 40, n. 1, p. 34-44, 2017.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/mato-grosso-do-sul>. Acesso em: 23 jul. 2021.

JENKINSON, E. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil measurement and turnover. *In*: PAUL, E. A.; LADD, J. N. (ed.). **Soil Biochemochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1981. p. 415-471. v. 5.

KARA, O.; BAYKARA, M. Changes in soil microbial biomass and aggregate stability under different land uses in the northeastern Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 186, n. 6, p. 3801-3808, 2014.

KICHEL, A. N. **Produtividade de milho e gramíneas tropicais perenes no outono - inverno em sucessão a soja**. 2018. 98 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2018.

KICHEL, A. N. *et al.* Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF): experiências no Brasil. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 71, n. 1, p. 94-105, 2014.

KICHEL, A. N. *et al.* Produtividade e valor nutritivo de gramíneas tropicais em monocultivo e em consórcio com milho na segunda safra. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 39, n. 6, p. 2517-2530, 2018.

KLUTHCOUSKI, J. *et al.* **Sistema Santa Fé** – Tecnologia Embrapa: integração lavoura-pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageiras, em áreas de lavoura, nos sistemas direto e convencional. 1. ed. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 28 p.

KÖPPEN, W. **Das geographischa System der Klimate**. 1. ed. Gebr: Borntraeger, 1936. 44 p.

LAROCA, J. V. S. *et al.* Qualidade do solo e produtividade de soja em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n. 11, p. 1248-1258, 2018.

LEMAIRE, G. *et al.* Integrated crop-livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 190, p. 4-8, 2014.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, Nova York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIMA, L. S. Lei de Lambert – Beer. **Revista de Ciência Elementar**, Porto, v. 1, n. 1, p. 1-2, 2011.

LOURENTE, E. R. P. *et al.* Rotação de culturas, relações com atributos químicos, microbiológicos do solo, produtividade do milho. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 829-42, 2010.

LOURENTE, E. R. P. *et al.* Agricultural management systems affect on physical, chemical and microbial soil properties. **Australian Journal of Crop Science**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 683-692, 2016.

LOWERY, B. *et al.* Soil water parameters and soil quality. *In*: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996., p. 143-155. v. 8.

MACHADO, L. A. Z.; ASSIS, P. G. G. de. Produção de palha e forragem por espécies anuais e perenes em sucessão à soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 3, p. 415-422, 2010.

MACHADO, L. A. Z. *et al.* Estabelecimento de forrageiras perenes em consórcio com soja, para sistemas integrados de produção agropecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 7, p. 521-529, 2017.

MARASCA, I. *et al.* Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e teor de água em sistema de plantio direto na cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 239-246, 2011.

MARCHÃO, R. L. *et al.* Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 873-882, 2007.

MATOS, A. C.; RASSLAN, R. D. **Atributos microbiológicos em sistema integração lavoura-pecuária**. 2018. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2018.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 425-433, 2003.

- MCCORMACK, M. L. *et al.* Building a better foundation: improving root-trait measurements to understand and model plant and ecosystem processes. **New Phytologist**, Lancaster, v. 215, n. 1, p. 27-37, 2017.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Fortaleza, v. 32, n. 1, p. 185-203, 2015.
- MENDONÇA, V. Z. D. *et al.* Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras e milho em sucessão com soja em região de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 251-259, 2013.
- MERCANTE, F. M. Biomassa e atividade microbiana: indicadores da qualidade do solo. **Direto no Cerrado**, Passo Fundo, p. 9-10, mar./abr. 2001.
- MERCANTE, F. M. *et al.* **Parâmetros microbiológicos como indicadores de qualidade do solo sob sistemas integrados de produção agropecuária**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2004. 31 p.
- MERCANTE, F. M. *et al.* Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 34, n. 4, p. 479-485, 2008.
- MIELNICZUCK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. *In*: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 1-6. v. 1.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006. 729 p.
- MUNIZ, L. C. *et al.* Soil biological attributes in pastures of different ages in a crop-livestock integrated system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1262-1268, 2011.
- PIGNATARO NETTO, I. T.; KATO, E.; GOEDERT, W. J. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagens com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1441-8, 2009.
- NICOLOSO, R. S.; LANZANOVA, M. E.; LOVATO, T. Manejo das pastagens de inverno e potencial produtivo de sistemas de integração lavoura-pecuária no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1799-1805, 2006.
- NOGUEIRA, M.; HUNGRIA, A. M. Indicadores microbiológicos da qualidade do solo. *In*: REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, 48., 2013, Londrina. **Anais [...]**. Londrina: SBCS, 2013, p. 539-544. 1 CD-ROM.
- OLIVEIRA, O. C. *et al.* Chemical and biological indicators of decline/degradation of Brachiaria pasture in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, [s. l.], v. 103, n. 2, p. 289-300, 2004.

PACHECO, L. P. *et al.* Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 17-25, 2011.

PARRA, J. R. P.; PANIZZI, A. R.; HADDAD, M. L. Índices nutricionais para medir consumo e utilização de alimento por insetos. *In*: PANIZZI, A. R.; PARRA, J. R. P. (ed.). **Bioecologia e nutrição de insetos: base para o manejo integrado de pragas**. Brasília: Embrapa Soja, 2009. p. 37-90.

PEGORARO, R. F. *et al.* Carbon and nitrogen stocks in the soil and humic substances of agricultural crops in the semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 49, n. 4, p. 574-583, 2018.

PEZZONI, T. *et al.* Influência de *Pterodon emarginatus* Vogel sobre atributos físicos e químicos do solo e valor nutritivo de *Brachiaria decumbens* Stapf em sistema silvipastoril. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 293-301, 2012.

REEVES, D. W. Soil management under no-tillage: soil physical aspects. *In*: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1., 1995, Passo Fundo. **Resumos** [...]. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1995. p. 127-130. 1 CD-ROM.

RIBEIRO, P. H. *et al.* Adubação verde, os estoques de Carbono e Nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 6, n. 1, p. 43-50, 2011.

RICHART, A. *et al.* Desempenho do milho safrinha e da *Brachiaria ruziziensis* cv. comum em consórcio. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 4, p. 497-502, 2010.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86 p.

ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 304 p.

SALES, R. P. *et al.* Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 3, p. 429-438, 2016.

SALTON, J. C. *et al.* Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SALTON, J. C. *et al.* Teor e dinâmica do Carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011.

SALTON, J. C. *et al.* **Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 58 p.

- SALTON, J. C. *et al.* **Sistema São Mateus** – sistema de integração lavourapecuária para região do Bolsão sul-mato-grossense. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2013. 6 p.
- SALTON, J. C.; KICHEL, A. N.; COSTA, A. R. Consórcio de milho com forrageiras na entressafra e atributos físicos e químicos do solo. *In: CONGRESO LATINO AMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO*, 19.; *CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO*, 23., 2012, Mar de Plata. **Anais** [...]. Mar del Plata, 2012. p. 1-6. v. 1.
- SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. 6 p.
- SANTANA, A. S. *et al.* Biomassa microbiana em diferentes sistemas de manejo do solo no sul do Estado de Roraima. **Revista Brasileira de Ciência da Amazônia**, Rondônia, v. 6, n. 1, p. 1-62, 2017.
- SANTOS, E. A. **Cobertura do solo em sistema de semeadura direta em Fênix (PR)**. 2011. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2011.
- SANTOS, A. C. *et al.* Gramíneas e leguminosas na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características químicas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 1063-1071, 2001.
- SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.
- SANTOS, V. M.; MAIA, L. C. Bioindicadores de qualidade do solo. *In: ACADEMIA PERNAMBUCANA DE CIÊNCIA AGRONÔMICA*, 2013, Recife. **Anais** [...]. Recife: SBCS, 2013. p. 195-223. v. 10.
- SAYGIN, S. D. *et al.* Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. **Applied Soil Ecology**, [s. l.]. v. 54, p. 1-6, 2012.
- SEREIA, R. C. *et al.* Crescimento de *Brachiaria* spp. e milho safrinha em cultivo consorciado. **Agrarian**, Dourados, v. 5, n. 18, p. 349-355, 2012.
- SILVA, D. V. *et al.* Produtividade e teor de nutrientes do milho em consórcio com *Brachiaria*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 8, 1394-1400, 2015.
- SILVA, G. N. **Sistemas de manejo e uso do solo sobre as frações e estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo sob cerrado**. 2016. 43 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil Editora, 2008. 560 p.

SILVA, M. B. *et al.* Atributos biológicos do solo sob influência da cobertura vegetal e do sistema de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 12, p. 1755-1761, 2007.

SILVA, R. H. da; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 855-860, 2002.

SILVA, R. R. *et al.* Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1585-1592, 2010.

SOARES, M. D. R. *et al.* Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 58, n. 4, p. 434-441, 2015.

SOUSA, D. M. G. *et al.* (ed.). **Cerrado: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. p. 145-178.

SOUSA, H. M. *et al.* Dynamics of soil microbiological attributes in integrated crop-livestock systems in the cerrado-amazonônia ecotone. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 1, p. 9-20, 2020.

SOUZA, R. F. de. *et al.* Effect of management systems and cover crops on organic matter dynamics of soil under vegetables. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 923-933, 2014.

SOUZA, Z. M. *et al.* Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.

STEFANOSKI, D. C. *et al.* Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 41, n. 6, p. 1301- 1310, 2009.

STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. **Soil and Plant Science**, [s. l.], v. 49, p. 1-24, 1999.

STOLF, R. Teoria de testes experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 229-235, 1991.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

TEIXEIRA, C. M. *et al.* Decomposição e liberação de nutrientes das palhadas de milho e milho + crotalaria no plantio direto do feijoeiro. **Revista Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 4, p. 647-653, 2009.

TEIXEIRA, M. B. *et al.* Decomposição e liberação de nutrientes da parte aérea de plantas de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 867-876, 2011.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 33, p. 141-163, 1982.

TORRES, J. L. R. *et al.* Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 609-618, 2005.

VALIM, W. C. **Atributos físicos do solo no consórcio de milho com forrageira e a produção de soja em sucessão**. 2019. 57 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019.

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

VARGAS, L. K.; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C-CO₂ e N mineral de um Podzólico Vermelho Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 35-42, 2000.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de Carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 213-223, 2011.

VIEIRA, M. H. P. **Mesofauna edáfica como parâmetro para avaliar a decomposição da resteva e na qualidade do solo no sistema plantio direto**. 2008. 107 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2008.

VILELA, L. *et al.* Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1127-1138, 2011.

VILELA, L. *et al.* (ed.). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina: Embrapa Cerrados; Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 931-962.

WICK, A. F.; DANIELS, W. L. Physical protection of organic matter in reclaimed coal mine soils of SW Virginia. In: BARNHISEL, R. I. (ed.). NATIONAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF MINING AND RECLAMATION, BRIDGING RECLAMATION, 2009, Billings. **Proceedings** [...]. Billings: ASMR, 2009. p. 1564-82.

YAO, Q. *et al.* Mobilization of sparingly soluble phosphates by the external mycelium of an arbuscular mycorrhizal fungus. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 230, p. 279-285, 2001.

ZIMMER, A. G. Gramíneas forrageiras tropicais para integração lavoura pecuária. **Embrapa**, Brasília, 20 out. 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/6477925/artigo-gramineas-forrageiras-tropicais-para-integracao-lavoura-pecuaria>. Acesso em: 15 set. 2021.