

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

DEYVISON DE ASEVEDO SOARES

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA E QUALIDADE DO SOLO EM
SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIOS**

Ilha Solteira

2021

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

DEYVISON DE ASEVEDO SOARES

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA E QUALIDADE DO
SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIOS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutor. Especialidade
Sistemas de Produção.

Prof. Dr. Marcelo Andreotti
Orientador

Pesquisadora Dra Ieda de Carvalho Mendes
Coorientadora

Ilha Solteira

2021

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S676d Soares, Deyvison de Asevedo.
Dinâmica da matéria orgânica e qualidade do solo em sistemas de produção agropecuários / Deyvison de Asevedo Soares. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
124 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2021

Orientador: Marcelo Andreotti
Coorientador: Ieda de Carvalho Mendes
Inclui bibliografia

1. Substâncias húmicas do solo. 2. Carbono orgânico particulado. 3. Fracionamento químico da MOS. 4. Fracionamento físico da MOS. 5. Atividade enzimática do solo. 6. Fertilidade do solo.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Setor
Setor Técnico de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CSB.8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Dinâmica da matéria orgânica e qualidade do solo em sistemas de produção agropecuários

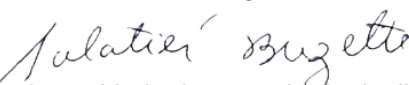
AUTOR: DEYVISON DE ASEVEDO SOARES

ORIENTADOR: MARCELO ANDREOTTI

COORIENTADORA: IEDA DE CARVALHO MENDES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA, área:
Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI (Participação Virtual) 
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. SALATIER BUZETTI (Participação Virtual) 
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. GELCI CARLOS LUPATINI (Participação Virtual) 
Curso de Zootecnia / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas de Dracena - UNESP

Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL (Participação Virtual) 
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. CARLOS EDUARDO PELLEGRINO CERRI (Participação Virtual) 
Departamento de Ciência do Solo / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ/USP

Ilha Solteira, 07 de junho de 2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Lucinilde Maria de Azevedo Soares e José Orlando França Soares, os quais me apoiaram em todos os sentidos e em todos os momentos, garantindo condições para que eu continuasse.

Aos meus irmãos Deyne Rose de Azevedo Soares, David de Azevedo Soares e Deyse de Azevedo Soares, pela amizade e apoio.

À toda família Soares (materno e paterno) pelo carinho e incentivos que nunca me faltaram, sempre que os encontro.

À minha namorada Évillyn Zacheo e à sua família pela qual fui extremamente bem acolhido.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que me concedeu até aqui e por nunca me desamparar até aqui.

Aos meus pais pelo exemplo de vida, caráter e por todo o apoio nessa caminhada, e aos meus irmãos que sempre me apoiaram.

Ao meu orientador, Professor Dr. Marcelo Andreotti, por me acolher no seu grupo de pesquisa, pela confiança, amizade, pela orientação e valiosos ensinamentos. Você é uma pessoa extraordinária, um excelente profissional e foi um orientador espetacular. Muito obrigado! Ao seu grupo de pesquisa, em especial à Viviane Modesto, pelo valioso auxílio na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Gelci Carlos Lupatini e seu grupo de pesquisa, em especial Diego Coleta, Jeferson Mulero, Junio Silva, Guilherme Marangoni, Fernando Copetti e André Gesser. Obrigado pela amizade e por todo o apoio nas coletas e avaliações.

À minha namorada Évillyn Zacheo e à sua família pelo acolhimento, pela dedicação, pela amizade, pelo apoio sempre.

Aos colegas e amigos com quem tive a honra de conviver durante esses anos em Ilha Solteira, ao longo do curso. Em especial à Maria Elisa que, embora esteja morando em outra cidade sempre mantivemos contatos e boas conversas.

À Universidade Estadual Paulista, pela oportunidade de realização deste curso.

Aos membros da banca examinadora, pela honra de tê-los avaliando o meu trabalho. Obrigado pelas valiosas contribuições.

À Facholi, pelo apoio em todas as atividades desenvolvidas neste estudo, por ceder a área e toda estrutura necessária para a realização dos experimentos.

À FAPESP, o meu muito obrigado pela bolsa de estudos e por todo apoio financeiro concedido (Processo Nº 2018/07625-0) para a realização deste estudo. Este apoio fez toda diferença nesta caminhada. Muito obrigado!

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Cada vez mais, a pressão das atividades humanas sobre o meio ambiente, ao longo dos tempos, tem trazido à tona potenciais problemas a serem solucionados em âmbito local, para que seja possível reverter problemas ambientais em escala global. Nesse cenário, os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs) reúnem um conjunto de atividades que visam otimizar a produtividade de alimentos ao mesmo tempo em que recupera e melhora a qualidade física, química e biológica do solo e do ambiente, com ganhos econômicos. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de sistemas de manejo sobre os atributos físicos, químicos, bioquímicos e a dinâmica da matéria orgânica do solo, pelo fracionamento físico e químico, em solo arenoso do Cerrado. Avaliar, ainda, as produtividades de grãos (PG) do milho, o potencial de forrageiras consorciadas para posterior cobertura do solo, bem como a PG da soja em sucessão. O solo da área experimental foi classificado com Latossolo Vermelho distrófico textura arenosa, localizado no município de Caiuá, São Paulo. Os experimentos foram conduzidos durante as safras 2016/17, 2017/18 e 2018/19. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com sete tratamentos e quatro repetições, sendo os seguintes: S-MRUZ: milho + *Urochloa ruziziensis* (pastejo) – Soja; S-MPIA: milho + *U. brizantha* cv. Piatã (pastejo) – Soja; S-MPAI: milho + *U. brizantha* cv. Paiaguás (pastejo) – Soja; S-MSPD: milho (Plantio direto) – Soja; S-MSPC: milho (preparo convencional) – Soja; S-PIAPERRE: soja – capim Piatã (pastejo contínuo); S-PAIPERE: soja – capim Paiaguás (pastejo contínuo). A soja foi cultivada no verão e o consórcio milho + *Urochloa* no outono/inverno. Nas pastagens perenes, novilhos da raça Nelore pastejaram o ano todo, enquanto nos consórcios os animais pastejaram após a colheita do milho. A decomposição da palhada das forrageiras foi avaliada no verão pelo método do litter bags, durante 150 dias, neste período foram determinadas a temperatura e umidade do solo. Foram avaliados a atividade enzimática do solo, atributos químicos, físicos e as frações da matéria orgânica do solo (MOS). No último ano foram avaliados os teores de clorofila nas plantas de soja. Maiores médias de carbono orgânico total e particulado foram obtidos no sistema S-PIAPERRE e menores no S-MSPC, em 0 a 0,10 m de profundidade, o que refletiu nos estoques de carbono em superfície e subsuperfície. Em todos os tratamentos o solo apresentou redução percentual da fração humina. Os sistemas conservacionistas apresentaram os maiores teores de ácidos húmicos (C-AH) na camada de 0 a 0,10 m, mas apenas o S-MPAI foi significativamente superior ao S-MSPC. Menores teores de ácidos fúlvicos (C-AF) e C-AH predominaram no S-MSPD e S-MSPC, na camada de 0,20 a 0,40 m. Na avaliação final, os

sistemas S-MSPD, S-MPIA e S-MPAI apresentaram os maiores teores de P, o S-MPAI e o S-PIAPERRE apresentaram maiores teores de Mg, SB e CTC na camada de 0 a 0,10 m, o S-MPAI apresentou o menor pH e maiores teores de P, Ca, Mg, SB e CTC, o S-PIAPERRE apresentou o menor pH e maiores teores de Ca, Mg, SB e V%, na camada de 0,10 a 0,20 m. O maior V% na camada de 0,20 a 0,40 m ocorreu no S-MPAI. Na camada de 0,20 a 0,40 m, ocorreram os maiores teores de B no S-MRUZ e S-MPIA, e maiores teores de Fe no S-MRUZ. No último ano agrícola houve as maiores PG do milho no S-MSPD e maiores PG da soja nos SIPAs (S-MRUZ, S-MPIA e S-MPAI). 23% da palhada foi degradada nos primeiros 30 dias após manejo (DAM), 37% aos 60 DAM e 70% aos 150 DAM. Em geral, os SIPAs apresentaram maior umidade e menor temperatura do solo. Houve predomínio de maior atividade enzimática no solo sob SIPAs, mas apenas a atividade da Arilsulfatase foi significativamente superior no S-MPIA. Os SIPAs proporcionam cobertura para proteção do solo, beneficiando processos envolvidos na ciclagem de nutrientes, comparados ao SPC ou SPD. O consórcio do milho com a BRS Paiaguás foi mais expressivo na melhoria da qualidade do solo e produção das culturas, porém, ressalta-se a superioridade das pastagens perenes. O SPC contínuo deve ser evitado nos solos arenosos. O pastejo animal com taxa de lotação controlada não prejudica a qualidade física do solo. Os SIPAs contribuem para aumentar os teores de C-AH na superfície do solo e tendem a incrementar C-AF, C-AH em profundidade, e estoques de carbono no solo.

Palavras-chave: Substâncias húmicas do solo. Carbono orgânico particulado. Fracionamento químico da MOS. Fracionamento físico da MOS. Atividade enzimática do solo. Fertilidade do solo. Produtividade de grãos.

ABSTRACT

Increasingly, the pressure of human activities on the environment, over time, has brought up potential problems that need to be solved at the local level, so that it is possible to reverse environmental problems on a global scale. In this scenario, integrated Crop-Livestock systems (iCL) brings together a set of activities that aim to optimize food productivity while recovering and improving the physical, chemical and biological quality of the soil and the environment, with economic gains. The objective of this study was to evaluate the effects of management systems on the physical, chemical, biochemical attributes and dynamics of soil organic matter, by physical and chemical fractionation, in sandy Cerrado soil. Also evaluate corn grain yields (GY), the potential of intercropped forage for later soil cover, as well as the PG of soybean in succession. The soil in the experimental area was classified as Red Latosol, sandy texture, located in the Caiuá municipality, São Paulo. The experiments were conducted during the 2016/17, 2017/18 and 2018/19 seasons. The experimental design was in randomized blocks, with seven treatments and four repetitions, the treatments were: S-CRUZ: corn + *Urochloa ruziziensis* grass (grazing) – soybean; S-CPIA: corn + *U. brizantha* cv. Piatã grass (grazing) – soybean; S-CPAI: corn + *U. brizantha* cv. Paiaguás grass (grazing) – soybean; S-CNT: corn (no-tillage) – soybean; S-CCT: corn (conventional tillage) – soybean; S-PIAPERRE: soybean – Piatã grass (continuous grazing); S-PAIPERE: soybean – Paiaguás grass (continuous grazing). Soybean was grown in the summer and the intercropping corn with *Urochloa* in the autumn -winter. In perennial pastures, Nellore steers grazed all year round, while in Intercropping the animals graze after the corn harvest. The forage straw decomposition evaluation was carried in the summer out through of litter bags. Soil enzymatic activity, chemical and physical attributes and soil organic matter (SOM) fractions were evaluated. Higher averages of total and particulate organic carbon were obtained in the S-PIAPERRE system and lower in the S-CCT, at 0 to 0.10 m depth, which reflected in the surface and subsurface carbon stocks. In all treatments, the soil showed a percentage reduction of the humine fraction. Conservation systems showed the highest levels of humic acids (C-HA) in the 0 to 0.10 m layer, but only S-CPAI was significantly higher than S-CCT. Lower levels of fulvic acids (C-FA) and C-HA prevailed in S-CNT and S-CCT, in the 0.20 to 0.40 m layer. In the final evaluation, the S-CNT, S-CPIA and S-CPAI systems and presented the highest levels of P, the S-CPAI and S-PIAPERRE had the highest levels of Mg, SB and CEC in the 0 to 0.10 m layer, S-MPAI had the lowest pH and the highest levels of P, Ca, Mg, SB and CEC, S-

PIAPERE presented the lowest pH and highest levels of Ca, Mg, SB and V%, in the layer of 0.10 to 0.20 m. The highest V% in the 0.20 to 0.40 m layer occurred in the S-CPAI. In the 0.20 to 0.40 m layer, the highest levels of B occurred in the S-CRUZ and S-CPIA, and the highest levels of Fe in the S-CRUZ. In the last agricultural year, there were the highest GY of corn in S-CSPD and the highest GY of soy in iCLs (S-CRUZ, S-CPIA and S-CPAI). 23% of the straw was degraded in the first 30 days after chemical desiccation (DAD), 37% at 60 DAD and 70% at 150 DAD. In general, the iCLs had higher humidity and lower soil temperature. There was a predominance of higher enzyme activity in the soil under iCLs, but only Arylsulfatase activity was significantly higher in S-CPIA. ICLs provide coverage for soil protection, benefiting processes involved in nutrient cycling, compared to CTS or NTS. corn intercropped with BRS Paiaguás was more expressive in improving soil quality and crop production, however, the superiority of perennial pastures is emphasized. Continuous conventional tillage should be avoided on sandy soils. Animal grazing with controlled stocking rate does not affect the physical quality of the soil. ICLs contribute to increase the levels of C-HA on the soil surface and tend to increase C-FA, C-HA in depth, and carbon stocks in the soil.

Keywords: Soil humic substances. Particulate organic carbon. Chemical fractionation of SOM. Physical fractionation of SOM. Soil enzyme activity. Soil fertility. Grain yield.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Esquematização do efeito <i>priming</i> rizosférico (EPR) - Interações não aditivas entre o crescimento da raiz e a decomposição da matéria orgânica do solo (MOS): (a) aceleração da decomposição da MOS - EPR positivo; (b) retardamento da decomposição da MOS - EPR negativo.....	20
Figura 2	- Precipitação pluvial (mm) e temperaturas (°C) durante a condução dos experimentos. Caiuá – SP, 2016, 2016/17, 2017, 2017/18, 2018 e 2018/19.....	30
Figura 3	- Variação dos estoques de C do solo pelo método da massa equivalente ($\Delta EstC$) na profundidade de 0 a 0,20 m nos sistemas e modalidades de cultivos, em relação ao sistema de preparo convencional do solo. Caiuá – SP, 2017 (A) e 2019 (B).....	52
Figura 4	- Distribuição percentual das frações de ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), humina (HUM) e carbono não humificado (CNH) no solo, nas profundidades de 0 a 0,10, 10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, nos sistemas e modalidades de cultivos avaliados. Caiuá – SP, 2017 e 2019.....	54
Figura 5	- Degradação de matéria seca remanescente de braquiárias em sistemas integrados de produção agropecuária. Caiuá – SP, 2018/19.....	80
Figura 6	- Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) das as frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo, estoque de carbono, atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017.....	88
Figura 7	- Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) das as frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo, estoque de carbono, atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2019.....	91
Figura 8	- Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) da produtividade de grãos do milho e da soja em 2017/18, temperatura e umidade do solo e atividade enzimática durante o cultivo da soja sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017/18.....	92
Figura 9	- Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) da produtividade de grãos do milho e da soja, temperatura e umidade do solo e atividade enzimática durante o cultivo da soja sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2018/19.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1a	- Resultado inicial da análise dos tributos físicos, N total e relação C/N do solo. Caiuá-SP, set, 2016.....	31
Tabela 1b	- Resultado inicial da análise dos tributos químicos do solo antes da implantação do experimento. Caiuá-SP, set, 2016.....	32
Tabela 1c	- Resultado inicial da análise dos tributos químicos do solo antes da implantação do experimento. Caiuá-SP, setembro, 2016.....	32
Tabela 2	- ¹ Carbono orgânico total, matéria orgânica particulada e fração mineral da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2017 e 2019.....	44
Tabela 3	- ¹ Atributos físicos e estoque de carbono (EstC) do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo nas profundidades de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m. Caiuá – SP, 2017.....	48
Tabela 4	- ¹ Atributos físicos e estoque de carbono (EstC) do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m. Caiuá – SP, 2019.....	51
Tabela 5	- ¹ Frações húmicas da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2017.....	56
Tabela 6	- ¹ Frações húmicas da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2019.....	58
Tabela 7	- ¹ Teores de N total e relação C/N do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, na profundidade de 0 a 0,10 m. Caiuá – SP, 2019.....	61
Tabela 8	- ¹ Atributos químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2017.....	64
Tabela 9	- ¹ Atributos químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2018.....	67
Tabela 10	- ¹ Atributos químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2019.....	70
Tabela 11	- Micronutrientes do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2017, 2018 e 2019.....	73

Tabela 12	- Produtividade de grãos (PG) de milho consorciado com forrageiras do gênero <i>Urochloa</i> e produtividade de grãos de soja cultivada em sucessão aos consórcios, em sistemas integrados de produção agropecuária. Caiuá-SP, 2016/17, 2017/18 e 2018/19.....	76
Tabela 13	- Produtividade de matéria seca da parte aérea de forrageiras (PMSF) do gênero <i>Urochloa</i> consorciadas com a cultura do milho e degradação de matéria seca remanescente de braquiárias em sistemas integrados de produção agropecuária. Caiuá-SP, 2017/18 e 2018/19.....	78
Tabela 14	- Desdobramento da interação entre modalidades de cultivo e épocas de avaliação para a matéria seca remanescente da parte aérea de forrageiras consorciadas com milho em sistemas integrados de produção agropecuária (kg ha ⁻¹) Caiuá - SP, 2018/19.....	80
Tabela 15	- Teores de umidade do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivos. Caiuá-SP, 2017/18 e 2018/19.....	82
Tabela 16	- Desdobramento das interações entre sistemas e época de avaliações para a temperatura (°C) (2017/18) e umidade do solo (%) (2018/19) em diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivo. Caiuá-SP.....	83
Tabela 17	- Atividade enzimática do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017/18 e 2018/19.....	86
Tabela 18	- Análises dos componentes principais para as frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo, estoque de carbono, atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017.....	87
Tabela 19	- Análises dos componentes principais para as frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo, estoque de carbono, atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2019.....	89
Tabela 20	- Análises dos componentes principais para a produtividade de grãos do milho e da soja, temperatura e umidade do solo e atividade enzimática durante o cultivo da soja sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017/18.....	92
Tabela 21	- Análises dos componentes principais para a produtividade de grãos do milho e da soja, temperatura e umidade do solo e atividade enzimática durante o cultivo da soja sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2018/19.....	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	<i>Objetivos específicos.....</i>	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS) EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA.....	17
2.2	FRAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	21
2.3	ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO SOB SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA.....	24
2.4	ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO.....	26
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	30
3.2	HISTÓRICO DA ÁREA, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	31
3.3	SEMEADURA, CONDUÇÃO E AVALIAÇÕES DAS CULTURAS DO MILHO E FORRAGEIRAS.....	34
3.4	DESSECAÇÃO DAS FORRAGEIRAS DOS CONSÓRCIOS E IMPLANTAÇÃO DOS LITTER BAGS.....	35
3.5	SEMEADURA E AVALIAÇÕES NA SOJA E NO SOLO - UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO.....	36
3.6	COLETA DO SOLO PARA ANÁLISES DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA SOLO.....	36
3.7	COLHEITA DOS GRÃOS DA SOJA.....	37
3.8	COLETA DO SOLO PARA ANÁLISES QUÍMICAS, FÍSICAS E FRACIONAMENTO DA MOS.....	37
3.9	ANÁLISES DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO.....	37
3.9.1	<i>β-Glucosidase.....</i>	38
3.9.2	<i>Fosfatase Ácida.....</i>	38
3.9.3	<i>Arilsulfatase.....</i>	39
3.10	ANÁLISES QUÍMICAS, FÍSICAS E FRACIONAMENTO FÍSICO E	

	QUÍMICO DA MOS.....	39
3.11	AVALIAÇÕES DOS TEORES DE CLOROFILA NA NAS PLANTAS DE SOJA.....	41
3.12	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1	CARBONO ORGÂNICO TOTAL E FRAÇÕES FÍSICAS DA MOS - 2017 E 2019.....	43
4.2	ATRIBUTOS FÍSICOS E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO – 2017.....	47
4.3	ATRIBUTOS FÍSICOS E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO – 2019.....	48
4.4	DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS FRAÇÕES HÚMICAS DA MOS – 2017 E 2019.....	53
4.5	FRAÇÕES HÚMICAS DA MOS – 2017 E 2019.....	55
4.6	TEORES DE N TOTAL E RELAÇÃO C/N DO SOLO – 2019.....	60
4.7	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO – 2017.....	62
4.8	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO – 2018.....	65
4.9	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO – 2019.....	68
4.10	MICRONUTRIENTES NO SOLO – 2017, 2018 E 2019.....	71
4.11	PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO MILHO E DA SOJA – 2016/17, 2017/18, 2018/19.....	74
4.12	PRODUTIVIDADE DAS FORRAGEIRAS CONSORCIADAS COM O MILHO – 2017 E 2018.....	77
4.13	TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO – 2017/18 E 2018/19.....	81
4.14	ATIVIDADE ENZIMÁTICA – 2018 E 2019.....	84
4.15	ANÁLISES DOS COMPONENTES PRINCIPAIS PARA AS VARIÁVEIS ESTUDADAS.....	87
5	CONCLUSÕES.....	96
	APÊNDICE.....	97
	REFERÊNCIAS.....	100

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, a pressão das atividades humanas sobre o meio ambiente tem trazido à tona potenciais problemas a serem solucionados em âmbito local, para que seja possível reverter problemas ambientais em escala global. Nesse cenário, os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs) reúnem um conjunto de atividades que visam otimizar a produtividade de alimentos, ao mesmo tempo em que recupera e melhora a qualidade física, química e biológica do solo, com ganhos econômicos, sendo reconhecidos pela FAO (2010) como via de intensificação sustentável para garantir a segurança alimentar com baixo impacto ambiental.

Entre os anos de 2005 e 2015, uma área de 10 milhões ha⁻¹ foi convertida em SIPAs no Brasil, e estimava-se que até 2015/16 estes sistemas ocupavam cerca de 11,5 milhões de ha no país (EMBRAPA, 2016), especialmente nos estados do Mato Grosso do sul (2,08 milhões de ha) e Mato Grosso (1,55 milhões de ha). A adoção dos SIPAs vem se impulsionando em várias regiões do país, com as devidas adaptações a cada condição. Esses sistemas ressurgiram como uma alternativa adequada para intensificar a produção agrícola, com o objetivo de manter e melhorar a qualidade do solo, o qual merece maior atenção nas condições tropicais.

O solo, por sua vez, é um sistema composto por matéria sólida, líquida e gasosa, em que a proporção dessas partes pode significar limitação ou aptidão para práticas agropecuárias, à curto, médio ou longo prazos. Levando em consideração apenas as características limitantes de natureza edáfica, como alta acidez, elevados teores de alumínio tóxico (Al³⁺), baixa saturação por bases, entre outras, quando detectadas, a maioria é passível de melhoramento com operações relativamente simples, para atender às demandas das culturas.

No entanto, convém observar que, via de regra, uma vez que em ecossistemas naturais de florestas há equilíbrio no sistema solo-planta-atmosfera, a conversão desses ambientes em campos de produção agrícola resulta na “quebra” desse equilíbrio, devido às várias perturbações no ambiente.

Nas condições tropicais, as perturbações causadas ao solo são mais acentuadas quanto mais operações de preparo, como gradagens e arações, forem efetuadas. Tais operações são necessárias no preparo inicial das áreas, entretanto, são notórios os vários graus de degradação dos solos submetidos a essas operações em áreas mal geridas, com emprego indiscriminado

dessas práticas que destroem a estrutura do solo e o expõe às intempéries ambientais, promovendo a oxidação e conseqüentemente perda da matéria orgânica do solo (MOS).

Os solos predominantes no Cerrado apresentam alto grau de intemperismo físico e químico. Naturalmente, esses solos apresentam baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e, uma vez que, com o aumento do intemperismo, há aumento na eletropositividade do solo, gradual perda de bases também ocorre ao longo do tempo, as quais lixiviam para camadas mais profundas e tornam-se indisponíveis para a maioria das culturas anuais. Neste contexto, portanto, é de grande relevância a manutenção de cobertura vegetal do solo e a rotação de culturas, com diferentes arquiteturas de sistema radicular para minimizar esses efeitos.

O sistema plantio direto (SPD) tem como premissas o mínimo revolvimento do solo (apenas na linha de semeadura), o acúmulo de resíduos vegetais na superfície, para a sua proteção, e a rotação de culturas, o que pressupõe no aumento ou manutenção do conteúdo da MOS. O SPD associado aos SIPAs, em suas várias modalidades (lavoura-pecuária, lavoura-pecuária-floresta, pecuária-floresta, etc), apresentam aspectos que se assemelham ao ambiente natural, com o objetivo de se manter próximo do equilíbrio existente na natureza, pois visam a ciclagem de nutrientes, a diversificação de espécies vegetais e o pastejo animal na mesma área, fatores de grande importância para diversificação de produtos agrícolas e sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Por fim, a busca pela sustentabilidade dos sistemas agrícolas começa no solo, ao se estabelecer práticas para manter e incrementar a MOS. Por ser uma importante fonte de nutrientes, o conteúdo de MOS pode refletir decisivamente na qualidade física, química e biológica do solo, tendo papel chave em vários serviços ecossistêmicos, os quais podem ser definidos como os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas (MEA, 2005), como a ciclagem de nutrientes, nutrição das plantas, estruturação dos solos e a fixação de gases atmosféricos, como o dióxido de carbono (CO₂).

Portanto, dada a propriedade tamponante da MOS para o fornecimento de nutrientes às culturas, entre outros benefícios citados, a sua preservação e/ou acúmulo representa uma questão de importância econômica e ambiental. Assim, são necessários estudos mais aprofundados sobre a MOS nas condições do Cerrado, contemplando desde as suas frações mais lábeis às mais recalcitrantes. Uma vez que, cada vez mais, os solos arenosos têm sido usados para a produção agrícola intensificada, sobretudo em SIPAs, para a recuperação de pastagens degradadas, portanto, pesquisas que avaliem os impactos causados pela mudança do

uso da terra, nas condições do Cerrado, são necessárias para estimar as alterações sobre a MOS, desde as frações lábeis até as mais recalcitrantes, como as frações húmicas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de sistemas de manejo e uso da terra sobre os atributos físicos, químicos e sobre o metabolismo biológico do solo, bem como realizar uma análise dos efeitos desses sistemas sobre a dinâmica da matéria orgânica, por meio do seu fracionamento químico e físico, em solo arenoso do Cerrado. Foram realizadas, ainda, avaliações da produtividade das culturas graníferas (milho e soja em sucessão, além da produtividade das forrageiras em consórcio com o milho) para correlacioná-las aos atributos do solo.

1.1.1 Objetivos específicos

I. Determinar, dentre os sistemas, o (s) que proporciona (m) melhores condições de temperatura, umidade, qualidade física, química e atividade enzimática como consequência do tipo de uso da terra.

II. Avaliar as influências de cada modalidade e sistema de cultivos sobre a temperatura e umidade, relacionando-as às frações químicas e físicas da matéria orgânica do solo.

III. Avaliar, ao longo do tempo, se a degradação da palhada produzida pelas forrageiras cultivadas em cada sistema de produção, tem relação com a atividade enzimática do solo.

IV. Avaliar de que forma a mobilidade do carbono orgânico (ácidos fúlvicos/ácidos húmicos) e as perdas ou manutenção de matéria orgânica no perfil do solo são influenciadas pelos sistemas de produção e modalidade de cultivo adotados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS) EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA

Na década de 1970, houve significativa expansão da produção pecuária no Brasil para o Cerrado, especialmente devido ao reduzido valor das terras, às ofertas de crédito e ao surgimento de espécies forrageiras com capacidade de adaptação ao clima e à baixa fertilidade dos solos deste bioma. A busca por técnicas que visem à redução dos custos para formação e reforma de pastagens tem aumentado as pesquisas sobre a rotação de culturas anuais com pastagens, sistema conhecido como integração lavoura-pecuária (ILP) (BRAZ *et al.*, 2013).

A ILP é uma modalidade de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), estes sistemas integram culturas de grãos e pecuária na mesma área, de forma sequencial, por isso, podem proporcionar oportunidades para o produtor conseguir um melhor aproveitamento da sua atividade, capturando naturalmente as interações ecológicas e tornando o seu sistema produtivo mais eficiente na ciclagem e aproveitamento de nutrientes pelos cultivos (FRANZLUEBBERS, 2017; DAMIAN *et al.*, 2021).

A adoção dos SIPAs pode ser uma alternativa viável para otimizar o uso da terra de forma sustentável, pois proporciona a redução de insumos externos via maior ciclagem de nutrientes (ASSMANN *et al.*, 2017; DAMIAN *et al.*, 2020), de modo que a presença dos animais promove modificações bióticas e abióticas no sistema solo-planta-atmosfera, alterando os processos biogeoquímicos dos nutrientes no solo, especialmente C e N (CARVALHO *et al.*, 2010a; ASSMANN *et al.*, 2014; DAMIAN *et al.*, 2021), decorrentes das relações sinérgicas entre plantas e animais, trazendo benefícios ambientais e socioeconômicos.

Ao introduzir uma forrageira em consórcio com a cultura granífera na entressafra, maior quantidade de matéria seca (MS) é aportada ao sistema, e com a consolidação dos SIPAs em SPD ocorre a manutenção ou incremento da MOS, por meio do aporte de materiais orgânicos sobre a superfície do solo, provenientes dos resíduos culturais e dejetos animais (SALTON *et al.*, 2014; SULC; FRANZLUEBBERS, 2014).

Segundo Castro *et al.* (2015), esse aporte de MS reflete, sobretudo, na MOS mais lábil, aquela representada pela fração do C particulado. Nesta perspectiva, a palhada torna-se de fundamental importância para a consolidação e manutenção do SPD (COSTA *et al.*, 2014a),

pelo seu papel de proteção física para o solo e contribuição para a formação de compostos que servirão como fonte de nutrientes e energia para as plantas e biota do solo (WENDLING *et al.*, 2010; JAMALA; OKE, 2013).

Numa definição clássica, segundo Steverson (1994), a MOS pode ser entendida como a fração que compreende todos os organismos vivos e seus derivados nos mais variados graus de decomposição, segundo o autor, até os resíduos vegetais presentes na superfície do solo podem ser considerados componentes da MOS. No manejo da fertilidade do solo, entretanto, segundo Silva e Mendonça (2007), frequentemente, refere-se à MOS como sendo a fração não-vivente, que é representada especialmente pelas frações orgânicas estabilizadas na forma de substâncias húmicas (SHs).

A MOS desempenha um papel importante para a produtividade dos solos tropicais, porque fornece energia e substratos que promovem a diversidade biológica, contribuindo e influenciando diretamente na manutenção da qualidade do solo e da funcionalidade dos ecossistemas (WENDLING *et al.*, 2010). As frações não húmicas são compostos lábeis com taxa de decomposição relativamente rápida, e são facilmente utilizadas como substratos por microrganismos do solo (SCHMIDT *et al.*, 2011). Em contrapartida, as SHs, frações mais estáveis da MOS, são compostos coloidais com alto tempo médio de persistência e nelas se encontram grande parte do C orgânico total e N do solo (LAL, 1994, MILORI *et al.*, 2002; BALDOTTO; BALDOTTO, 2014; HAN *et al.*, 2016).

O conteúdo da MOS é fortemente alterado em solos cultivados, especialmente nas regiões tropicais e semiáridas, onde ocorre a sua rápida decomposição devido às modificações em condições tais como aeração, temperatura e teor de água no solo (ASHAGRIE *et al.*, 2007). Os resultados dessas alterações são negativos sobre muitas funções do solo, que são diretamente ou indiretamente relacionadas à MOS, devido à sua capacidade de reter água e nutrientes.

Em geral, a redução dos teores de MOS em áreas de cultivos intensivos é atribuída à oxidação microbiana dos materiais orgânicos que ficam expostos após a destruição dos agregados do solo, os quais os protegem (SPACCINI *et al.*, 2006). Também, Cardelli *et al.* (2012) relatam que, assim como o conteúdo e a qualidade da MOS, a atividade bioquímica é alterada, principalmente, quando os ecossistemas naturais são convertidos em áreas de cultivos, como pastagens ou culturas anuais.

Esta alteração na MOS pode ser atribuída à perda de componentes hidrofóbicos devido à ruptura de macroagregados do solo e a exposição de compostos orgânicos à oxidação biótica

e abiótica, que podem gerar associações húmicas menos estáveis e, consequentemente, estruturas de solo mais frágeis (PICCOLO, 2002). Em tese, essas afirmações foram confirmadas por Piccolo *et al.* (2005) em solos nigerianos, onde observaram que a alteração do estado da MOS sob cultivo causou a perda de suas propriedades protetoras, em geral, diminuindo a hidrofobicidade acumulada sob floresta, e aumentando o conteúdo relativo de produtos de oxidação. Isto representa um efeito negativo do sistema sobre o solo, pois Spaccini *et al.* (2000) e Marinari *et al.* (2010) sugerem que os componentes hidrofóbicos da MOS são essenciais para a sua preservação e estabilidade.

A matéria orgânica estimula a atividade microbiana do solo e os mecanismos envolvidos neste processo são conhecidos como efeito *priming*, o qual é definido como a mudança na decomposição microbiana do carbono orgânico do solo, em resposta às entradas de carbono fresco, e representa um componente-chave do ciclo global de carbono C (KUZYAKOV, 2010; GUENET *et al.*, 2018).

Quando o efeito *priming* ocorre na rizosfera, o processo é definido como efeito *priming* rizosférico (EPR) e indica a alteração na decomposição da MOS causada pela atividade das raízes (DIJKSTRA *et al.*, 2013). A curto prazo este processo é relevante, principalmente, para a mudança na dinâmica da MOS lábil, o qual ocorre no prazo de dias a semanas, enquanto o EPR a longo prazo influencia a MOS estabilizada, e ocorre num prazo de meses a décadas (ROUSK *et al.*, 2015).

Aproximadamente 40 a 60% do C fixado fotossinteticamente são alocados para as raízes das plantas e microrganismos associados a elas, via rizodeposições - substâncias orgânicas liberadas pelas raízes das plantas (CLEMMENSEN *et al.*, 2013). A oferta de C fresco proveniente dos resíduos vegetais e rizodeposições, como exsudatos, mucilagens e secreções (KUZYAKOV, 2002), favorece o predomínio inicial de microrganismos, comumente classificados como r-estrategistas (PAUL e CLARK, 1989), os quais apresentam um rápido desenvolvimento e utilizam as formas mais facilmente oxidáveis de C. Uma vez que este material mais lábil se esgota e, sendo ele a fonte facilmente assimilável de C e N, restam apenas fontes nutricionais mais recalcitrantes. Nessa condição, a comunidade microbiana (r-estrategistas) morre ou fica dormente, porque é incapaz de consumir a MOS recalcitrante.

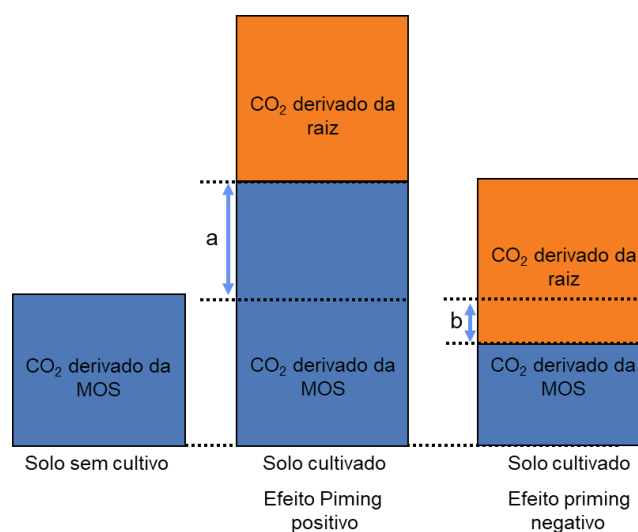
Por outro lado, a comunidade anterior é substituída por microrganismos K-estrategistas (PAUL; CLARK, 1989) que, por sua vez, apresentam desenvolvimento mais lento e são capazes de utilizar fontes de C mais complexas para a obtenção de energia.

A oferta de C facilmente oxidável para os K-estrategistas depende de sua capacidade de competir com r-estrategistas. Mesmo com alta disponibilidade de fonte de C fresca, os K-estrategistas podem não ter tempo suficiente para assimilá-la porque eles crescem muito lentamente em comparação aos r-estrategistas. Esse pode ser o motivo de, muitas vezes, o suprimento de C facilmente assimilável não ter efeito sobre a mineralização da MOS, enquanto o suprimento de materiais fontes de C mais recalcitrantes podem induzir um efeito de *priming* (FONTAINE; MARIOTTE; ABBADIE, 2003; BASTIDA *et al.*, 2019).

O efeito *priming* é positivo quando há aceleração da decomposição da MOS, e, negativo, quando há o retardamento da decomposição (Figura 1) (KUZYAKOV, 2002). O *priming* do solo tem sido considerado como um dos principais determinantes da capacidade dos solos de funcionar como fonte ou dreno de CO₂ atmosférico (BRADFORD, 2017). Visto que a entrada de material orgânico fresco no solo pode intensificar a atividade microbiana em curto prazo (*priming* positivo). Por outro lado, um *priming* negativo pode surgir de uma atividade microbiana atenuada quando C lábil é adicionado ao solo (KUZYAKOV, 2002).

Neste contexto, o constante aporte de materiais orgânicos, em quantidades adequadas e com diferentes qualidades, deve ser considerado para fins de manutenção ou incremento do estoque de C do solo, e evitar danos à ciclagem de nutrientes.

Figura 1. Esquematização do efeito *priming* rizosférico (EPR) - Interações não aditivas entre o crescimento da raiz e a decomposição da matéria orgânica do solo (MOS): (a) aceleração da decomposição da MOS - EPR positivo; (b) retardamento da decomposição da MOS - EPR negativo.



Fonte: Adaptado de Kuzyakov (2002).

Como visto, a MOS pode ser alterada em maior ou menor grau, e é um dos atributos mais sensíveis ao manejo dos solos (BARRETO *et al.*, 2008). Entretanto, apenas a avaliação do carbono orgânico total (COT) pode não ser suficiente para detectar influência do manejo de uso da terra, sendo necessário, portanto, uma avaliação mais minuciosa dos diferentes compartimentos da MOS para detectar alterações na sua composição. Assim, vários estudos, em diferentes condições ambientais, têm demonstrado que o fracionamento físico (CONCEIÇÃO *et al.* 2005; LIMA *et al.* 2008; SANTOS *et al.*, 2012) e o químico da MOS podem identificar alterações promovidas pelos sistemas de manejo dos solos (ROSSI *et al.*, 2011; BEZERRA *et al.*, 2013; LOSS *et al.*, 2013; ROSSET *et al.*, 2016).

2.2 FRAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

O fracionamento físico da MOS pode ser realizado pelos métodos densimétrico e granulométrico. Com o método densimétrico são isolados e quantificados os compartimentos mais lábeis, ou seja, a fração leve (FL), composta pelas frações leve livre (FLL) e intra-agregada (FLI) (CHRISTENSEN, 1992; JANZEN *et al.*, 1992). Com o método granulométrico são isolados e quantificados os compartimentos mais humificados, ligados à fração mineral do solo (areia, silte e argila). Esta é a fração pesada (FP), e apresenta maior estabilidade às perturbações no solo, causadas pelo manejo em curto espaço de tempo (BAYER *et al.*, 2004).

A FL corresponde à matéria orgânica não complexada e é composta por resíduos vegetais, animais e microbianos em vários estádios de decomposição (PEREIRA *et al.*, 2010), pode ser encontrada livre na matriz do solo (fração leve livre – FLL) ou oclusa no interior dos agregados (fração leve intra-agregada – FLI) (ROSA, 2010). Esta fração é fundamental para a ciclagem de C entre os compartimentos e para a ciclagem de nutrientes em curto prazo, porém, devido à sua grande sensibilidade às alterações no uso e manejo do solo, pode ser facilmente perdida pelo uso e manejo inadequado nos primeiros anos de cultivo (MIELNICZUK, 2008), por ser a fração mais facilmente oxidável.

A influência do manejo do solo sobre os teores das FLL e FLI foi observada por Santos *et al.* (2012), que destacaram o efeito positivo do SPD sobre os teores da FLL, comparado ao preparo convencional do solo. Isso pode estar relacionado, entre outros fatores, à maior adição e manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo. Quanto à FLI, Conceição *et al.* (2008) ressaltam a importância dos sistemas de manejo sem revolvimento do

solo para a promoção da proteção física, como mecanismo relevante de estabilização da MO em solos brasileiros.

Estudos relatam que a fração facilmente oxidável da MOS pode ser considerada um indicador da qualidade do sistema de manejo, e devido à sensibilidade dessa fração, infere-se que este compartimento possa ser utilizado como indicador da qualidade do solo para avaliação de sistemas de manejo recentes (PINHEIRO *et al.*, 2004; CONCEIÇÃO *et al.*, 2005; LIMA *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2013).

A fração pesada (FP) é dividida de acordo com o tamanho das partículas, separadas e classificadas como FP-areia ($>53\ \mu\text{m}$); FP-silte ($2-53\ \mu\text{m}$) e FP-argila ($0-2\ \mu\text{m}$). Diferente do que ocorre com a FL, a FP é menos alterada pelo manejo e uso do solo em curto espaço de tempo, desta forma, a FP apresenta uma ciclagem lenta (BAYER *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2012), o que pode ser devido ao seu conteúdo altamente decomposto e estabilizado, principalmente por interações com partículas minerais (BALDOCK e SKEJMSTAD, 2000).

Os sistemas com menor revolvimento do solo são favoráveis para o aumento da FP-areia (SILVA; MENDONÇA, 2007), esta fração é composta de resíduos vegetais e outros materiais aderidos à superfície da partícula, sendo mais suscetível a ação de microrganismos, em relação às demais frações pesadas (FELLER e BEARE, 1997). As frações silte e argila são constituídas de material orgânico num estágio mais avançado de decomposição, e essas frações formam, facilmente, associações organo-minerais em virtude da grande área superficial específica dessas partículas minerais (CONCEIÇÃO, 2006; GREGORICH *et al.*, 2006).

As frações físicas, reportadas anteriormente, representam uma fase transitória entre o material orgânico e a MO com maior grau de humificação. Num estágio mais avançado de decomposição, são formadas as substâncias húmicas da matéria orgânica do solo, classificadas como: ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e huminas (HUM). Dessas frações, os AHs representam a fração intermediária no processo de estabilização dos compostos húmicos. Esses ácidos são, portanto, um marcador natural do processo de humificação e refletem o uso e o manejo do solo (RANGEL; SILVA, 2007).

A humificação da MOS pode ser entendida como um processo de síntese e/ou ressíntese de compostos orgânicos que são adicionados ao solo e dependem de vários fatores, tais como o clima, quantidade e qualidade do material vegetal incorporado e manejo do solo (TAVARES; NAHAS, 2014).

Apesar dos estudos sobre SHs não serem recentes, os processos de formação dessas substâncias ainda são pouco compreendidos. A princípio, a teoria clássica considera que as SHs são formadas a partir de lignina modificada, porém, as rotas baseadas na síntese dessas substâncias a partir da condensação de polifenóis e compostos aminados são as mais aceitas atualmente, a chamada teoria da rota dos polifenóis (SILVA; MENDONÇA, 2007).

Entre os extremos mínimos e máximos, a literatura tem relatado que cerca de 40 a 90% da MOS seja constituída pelas SHs, as quais são determinadas com base na solubilidade em meio ácido ou alcalino (STEVEY, 1994; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; GAZOLLA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016; PEGORARO *et al.*, 2018; ROSSET *et al.*, 2019; FREITAS *et al.*, 2020; MARINHO JUNIOR *et al.*, 2021). Conforme Sutton e Sposito (2005), a humina é a fração insolúvel em qualquer condição de pH, os ácidos húmicos compõem a fração solúvel sob condições alcalinas e insolúvel em meio ácido; e os ácidos fúlvicos compõem a fração solúvel sob condições alcalinas e ácidas.

As SHs conferem tonalidade escura aos solos, característica marcante de solos orgânicos. Segundo Piccolo (2001) e MacCarthy (2001), essas substâncias participam da maior parte do material escuro presente no húmus, sendo complexas misturas supramoleculares coloidais. Jamala e Oke (2013) descrevem essas substâncias como resultado da degradação microbiana de biomoléculas, como lipídios, proteínas, carboidratos e lignina, que são dispensadas no solo após a morte de células. Estes autores ainda ressaltam que as SHs podem quelatizar cátions multivalentes como o Mg^{+2} , Ca^{+2} e o Fe^{+2} , sendo este mecanismo de grande importância para aumentar a disponibilidade destes cátions para os organismos, inclusive às plantas.

A estruturação e a capacidade de retenção de água no solo, também são efeitos benéficos atribuídos às SHs, além disso, esses compostos podem ligar-se a metais pesados, reduzindo a toxicidade e deficiência desses elementos nos solos (McCARTHY, 2001). Wang e Mulligan (2010) utilizaram SHs para remediação de arsênico e metais pesados, indicando-as como possíveis remediadoras para reduzir e evitar contaminação no solo. Albers *et al.* (2008) e Celano *et al.* (2008) avaliaram a influência de SHs sobre herbicidas e observaram a sua interação com as moléculas orgânicas xenobióticas.

O efeito hormonal vegetal das SHs também é relatado na literatura. Segundo Trevisan *et al.* (2010), a atividade auxínica das SHs é, provavelmente, o principal fator biológico responsável pelos efeitos positivos exercidos por elas sobre a fisiologia das plantas.

As propriedades químicas das SHs podem ser alteradas devido às práticas de manejo às quais o solo é submetido (MORAES *et al.*, 2011). As práticas de manejo do solo causam redução progressiva das concentrações dessas substâncias em solos que foram convertidos de floresta para lavoura (SPACCINI *et al.*, 2006; NAVARRETE; TSUTSUKI, 2008).

A fração mais lábil das SHs, segundo ARLAUSKIENE *et al.* (2010), é utilizada por microrganismos como fonte de C e energia, os autores relatam que durante o processo de mineralização destas substâncias, o solo é enriquecido com os nutrientes necessários para a nutrição e desenvolvimento das plantas em sucessão. Dentre as várias funções das SHs, está o armazenamento de C nos solos (LAL, 2006), logo, além da sua contribuição para a fertilidade, o acúmulo de MO estável no solo contribui significativamente para redução das emissões de CO₂ (KRAGT *et al.*, 2012).

Nesse cenário, a manutenção e/ou aumento das SHs nos solos cultivados é necessário para suprir a demanda energética das culturas e microrganismos, e mitigar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera, causadas pelas atividades agropecuárias.

2.3 ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO SOB SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Qualquer alteração no solo pode influenciar diretamente na sua estrutura, atividade biológica e, conseqüentemente, na fertilidade (BROOKES, 1995) com reflexos à sua qualidade e à produtividade das culturas (CARNEIRO *et al.*, 2009). As modificações na estrutura dos solos agrícolas, resultantes do manejo, são sumamente importantes para a escolha de sistemas que priorizam a conservação das propriedades dos solos e aumentem o potencial produtivo dessas áreas (ROZANE *et al.*, 2010).

O sistema de cultivo convencional foi o mais utilizado no processo de ocupação do Cerrado brasileiro, com uso de arados e grades pesadas no preparo do solo (COSTA *et al.*, 2006). Entretanto, sabe-se que o constante preparo do solo, adubações e calagens intensivas promovem, quando executadas de modo incorreto, alterações físicas do solo, refletindo negativamente nos atributos físicos, químicos, físico-químicos e atividades biológicas (SANTOS *et al.*, 2010).

A reversão dessa degradação do solo pode ser realizada por meio de práticas conservacionistas, como o sistema plantio direto (SPD) e/ou integração lavoura-pecuária (ILP) (MORETI *et al.*, 2007; LOSS *et al.*, 2011), que têm demonstrado alta eficiência em

preservar os recursos naturais e possibilitam exploração racional dos solos (KLUTHCOUSKI *et al.*, 2007) com reflexos positivos sobre os seus atributos químicos, físicos e biológicos (SPERA *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2011; CHIODEROLI *et al.*, 2012; MENDONÇA *et al.*, 2013). Estas alterações no solo sob SPD e SIPAs têm sido atribuídas em função dos incrementos na MOS, devido à adição e manutenção de palhada na superfície do solo (SANTOS *et al.*, 2012; BOENI *et al.*, 2014; GAZOLLA *et al.*, 2015).

Assim, estudos sobre a dinâmica de nutrientes nos solos sob Cerrado e o manejo da fertilidade com o crescimento e desenvolvimento de plantas e/ou animais podem otimizar o uso dos insumos, como fertilizantes e corretivos, e contribuir na tomada de decisões sobre o estabelecimento de práticas que se aproximam ao sistema de cultivo e à sua sustentabilidade (GOEDERT; OLIVEIRA, 2007), como o SPD, que propicia um ambiente orgânico que favorece a preservação da umidade e da fertilidade do solo, e que facilita a disponibilidade de nutrientes na solução do solo para absorção pelas plantas (GATIBONI *et al.*, 2007).

Em SPD, Bayer *et al.* (2004) relatam que o acúmulo de C no solo ocorre preferencialmente na matéria orgânica particulada (fração leve), que é mais sensível ao manejo do solo que o carbono orgânico total (COT). Entretanto, após cinco anos de estudo no Cerrado, Campos *et al.* (2011) observaram que o solo sob SPD incrementou os teores de COT, que contribuiu para a redução da acidez e aumento da CTC do solo, na profundidade de 0 a 0,20 m, além de incremento nos teores de P e na soma de bases, na mesma profundidade.

O COT está diretamente ligado aos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, que tem alta capacidade de reter o C, a uma taxa de cerca de 1 Pg C ano⁻¹ (JAGADAMMA; LAL, 2010), e contém mais C do que a atmosfera e a biomassa vegetal acima do solo combinados (os três metros superiores do solo armazenam mais de 2.300 Pg C) (JOBAGY; JACKSON, 2000; XU, THORNTON; POST, 2010).

Ao avaliarem diferentes modalidades de cultivos, Gazolla *et al.* (2015) observaram que o sistema ILP apresentou os maiores valores de COT nas camadas superficiais do solo, com valores semelhantes à área de Cerrado nativo, nas camadas mais profundas do solo. Segundo os autores, o consórcio do milho com *Urochloa* incrementou o aporte de matéria orgânica pelo sistema radicular dessas gramíneas, com destaque para a *Urochloa*, que possui sistema radicular bem desenvolvido, resultando em maiores teores de C nas profundidades 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, nas áreas de ILP em relação aos demais sistemas de manejo.

É importante salientar, entretanto, que a ausência da reposição total ou parcial de nutrientes por meio de adubação mineral e/ou orgânica, ao longo dos anos, pode reduzir a

disponibilidade para as plantas (COSTA *et al.*, 2014b). Por isso, o sistema ILP, por meio do cultivo consorciado, além de suprir a necessidade da produção de silagem ou grãos, possibilita a formação de pastagem de alta qualidade na entressafra (COSTA *et al.*, 2015b), haja vista que esta última se beneficia do efeito residual das culturas produtoras de grãos, além de formar palhada para os cultivos sucessores em SPD.

A adequada nutrição das espécies de cobertura, portanto, é importante para a retenção dos nutrientes na palhada residual acumulada ao longo dos anos, especialmente de espécies do gênero *Urochloa*, que apresentam grande potencial para ciclagem de nutrientes, sobretudo de N e K (PARIZ *et al.*, 2011; PACHECO *et al.*, 2013; COSTA *et al.*, 2015a; MENDONÇA *et al.*, 2015), consistindo em fonte lábil de nutrientes que irá contribuir para a melhoria na fertilidade do solo sob ILP associado ao SPD. Assim, a palhada torna-se de fundamental importância para a consolidação e manutenção do SPD (COSTA *et al.*, 2014b), pelo seu papel de proteção física para o solo e contribuição para a formação de compostos que servirão como fonte de nutrientes e energia para as plantas e biota do solo (WENDLING *et al.*, 2010; JAMALA; OKE, 2013).

Sistemas ILP associados ao SPD, segundo Costa *et al.* (2015b), mesmo com alta exportação de nutrientes e tráfego de máquinas, foram eficientes para manutenção e até melhoria da fertilidade e dos estoques de carbono do solo. Além disso, os autores detectaram incremento da macroporosidade, porosidade total, diminuição da resistência mecânica à penetração e densidade do solo, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, ao longo de três anos. Também, Salton *et al.* (2008) relatam que sistemas de manejo do solo com pastagem permanente ou em rotação com lavoura em plantio direto favorecem a formação de agregados estáveis de maior tamanho, em relação aos sistemas apenas com lavouras ou com lavouras em rotação com pastagens em ciclos maiores que três anos. Segundo os autores, a estabilidade dos macroagregados está relacionada ao teor de C orgânico no solo.

2.4 ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO

Os atributos físicos, químicos e biológicos do solo são alterados em função do manejo e uso da terra. O tempo para que tais atributos apresentem algum grau de alteração, em resposta ao tipo de manejo, pode variar dependendo das condições edafoclimáticas locais. Entretanto, entre estes atributos, a microbiologia é o que pode ser modificado em menor espaço de tempo.

Vários índices de qualidade de solo propostos na literatura incluem a atividade enzimática como fator importante a ser considerado (BALOTA *et al.*, 2013), uma vez que, assim como a diversidade microbiana, biomassa microbiana e a taxa de respiração, a atividade enzimática é um indicador sensível que pode ser utilizado no monitoramento de alterações ambientais decorrentes do uso agrícola (EPELDE *et al.*, 2014).

O CBM do solo é comumente adotado para expressar os efeitos do manejo do solo (SANTOS *et al.*, 2019; SOLEIMANI *et al.*, 2019; BARROS *et al.*, 2020). Porém, apenas a determinação do CBM não fornece indicações suficientes sobre a atividade dos microrganismos do solo, sendo necessário avaliar outros atributos que possam medir o estado metabólico da comunidade microbiana edáfica (MENDES *et al.*, 2012).

Após 17 anos da implantação do SPD, no Cerrado brasileiro, Souza *et al.* (2019) concluíram que o CBM, o índice de manejo do carbono e o qCO_2 são os principais atributos a serem usados como indicadores de qualidade do solo. Entretanto, os atributos comumente adotados na avaliação da microbiota do solo em função do seu manejo podem ser ineficientes em prever os efeitos a curto prazo, pois, segundo Franco *et al.* (2020), o CBM, respiração basal do solo, qCO_2 , quociente microbiano ($qMic$) e eficiência de uso de carbono (EUC) não foram influenciados pela diversidade funcional causada pelos sistemas no curto prazo. Bonetti *et al.* (2018) também não encontraram efeitos em curto prazo para estes atributos, eles notaram efeito significativo apenas dois anos após a implantação de um SIPA

Neste contexto, a atividade enzimática tem se mostrado um eficiente bioindicador das alterações na microbiota do solo, pois se apresenta sensível ao tipo de uso e manejo do solo no Cerrado brasileiro (LOPES *et al.*, 2018, FRANCO *et al.*, 2020 SARTO *et al.*, al., 2020), principalmente quanto às alterações dos processos nos quais estão envolvidas, como formação e degradação da MOS ou mineralização de nutrientes (BALOTA *et al.*, 2013; HU *et al.*, 2014; MENDES *et al.*, 2018b; DAMIAN *et al.*, 2021).

A produção de enzimas por raízes de plantas (BALOTA *et al.*, 2013) e microrganismos do solo é regulada pela sua demanda e pela disponibilidade do substrato, que, por sua vez, é alterado por vários fatores, como temperatura, teor de água do solo, pH e outros (BURNS *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2018). Assim, a atividade enzimática é influenciada, tanto pelo sistema de manejo do solo, como por efeito da sazonalidade ambiental (EVANGELISTA *et al.*, 2012).

As enzimas do solo têm papel de extrema importância nas transformações mediadas pela biomassa microbiana, e são responsáveis pela catalisação das reações ou estão

diretamente envolvidas nos processos de ciclagem de nutrientes e degradação de substratos complexos (ŠTURSOVÁ; BALDRIAN, 2011; SNAJRD *et al.*, 2013; DEMISIE *et al.*, 2014). Além disso, segundo Hu *et al.* (2014), a importância das atividades enzimáticas para o solo não se deve apenas à contribuição na ciclagem de nutrientes, mas também devido à participação na melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos, responsáveis pelo aumento da qualidade do solo.

A maior parte das enzimas do solo é produzida por microrganismos e podem estar no interior da célula (endoenzimas) ou ligadas externamente à membrana celular ou excretadas para o ambiente (exoenzimas). As pesquisas têm focado em alguns grupos, tais como as Glicosidases, Arilsulfatases, Fosfatases e Ureases, que estão envolvidas nos processos de ciclagem e do C, S, P e N, respectivamente. Deste modo, a atividade enzimática pode ser utilizada como indicadora de alterações na atividade microbiana, principalmente restrita àqueles processos em que as enzimas estão envolvidas, como formação e degradação da matéria orgânica ou mineralização de nutrientes (BALOTA *et al.*, 2013).

Após cinco anos de cultivo de arroz de terras altas, em SPD sobre palhas de leguminosas ou em SPC, Ferreira; Stone; Martin-Didonet (2017) observaram que os maiores valores de atividade enzimática total do solo (AET), na camada de 0 a 20 cm, foram obtidos no solo de mata, comparado ao solo sob SPD e SPC, e, embora o solo sob SPD tenha apresentado um acréscimo de cerca de 3,5% em relação ao SPC, não observaram diferença significativa entre estes dois últimos sistemas.

No entanto, a não detecção de atividade enzimática significativa em alguns trabalhos pode estar relacionada à profundidade de amostragem do solo, uma vez que, segundo Green *et al.* (2007), o SPD pode incrementar os valores de AET de 18 a 186% na camada de 0 a 0,05 m, porém, em camadas mais profundas, diferenças entre SPD e SPC podem não ser encontradas. Isto pode estar relacionado ao que foi relatado por Li *et al.* (2018), que, em trabalho de longa duração, na China, observaram incremento na atividade enzimática de solo arenoso em área desertificada submetida a revegetação, especialmente na camada de 0 a 0,10 m, que estava intimamente relacionada ao incremento da MO, teores de macronutrientes, redução do pH e da densidade aparente do solo. Segundo eles, o aumento significativo de COS, C orgânico dissolvido e N total no solo proporcionou aumento significativo da biomassa microbiana e, conseqüentemente, aumentou a atividade enzimática. Portanto, a avaliação de camadas de solo muito espessas parece diluir os resultados da análise enzimática, o que pode levar a um diagnóstico equivocado.

Outros estudos reportam sobre o pH, como um fator importante que influencia a composição e o volume da comunidade microbiana do solo, refletindo na dinâmica das enzimas, bem como sobre a atuação de enzimas na MOS, dependendo da sua relação C/N. Estes estudos relatam, ainda, que a maior diversidade vegetal, em comparação aos monocultivos, proporciona maior atividade microbiana, expressa em atividade de desidrogenases (DH) e ureases (BŁOŃSKA *et al.*, 2016; GUANGMING *et al.*, 2017, LI *et al.*, 2018).

Ao trabalharem em solo arenoso, com consócio de milho/amendoim, na China, Chen *et al.* (2018) relatam que cultivos consorciados melhoram a utilização dos nutrientes do solo e promovem maior atividade enzimática. Segundo os autores, o consócio proporcionou aumento da abundância de grupos bacterianos envolvidos na ciclagem de N e S, e outras bactérias benéficas na rizosfera, que promovem a decomposição e reutilização de carboidratos, em comparação ao monocultivo do milho. Neste caso, é possível que a inclusão de uma leguminosa no sistema reduza a relação C/N da MOS, o que é uma condição para o aumento da atividade de enzimas como a desidrogenase (BŁOŃSKA *et al.*, 2016).

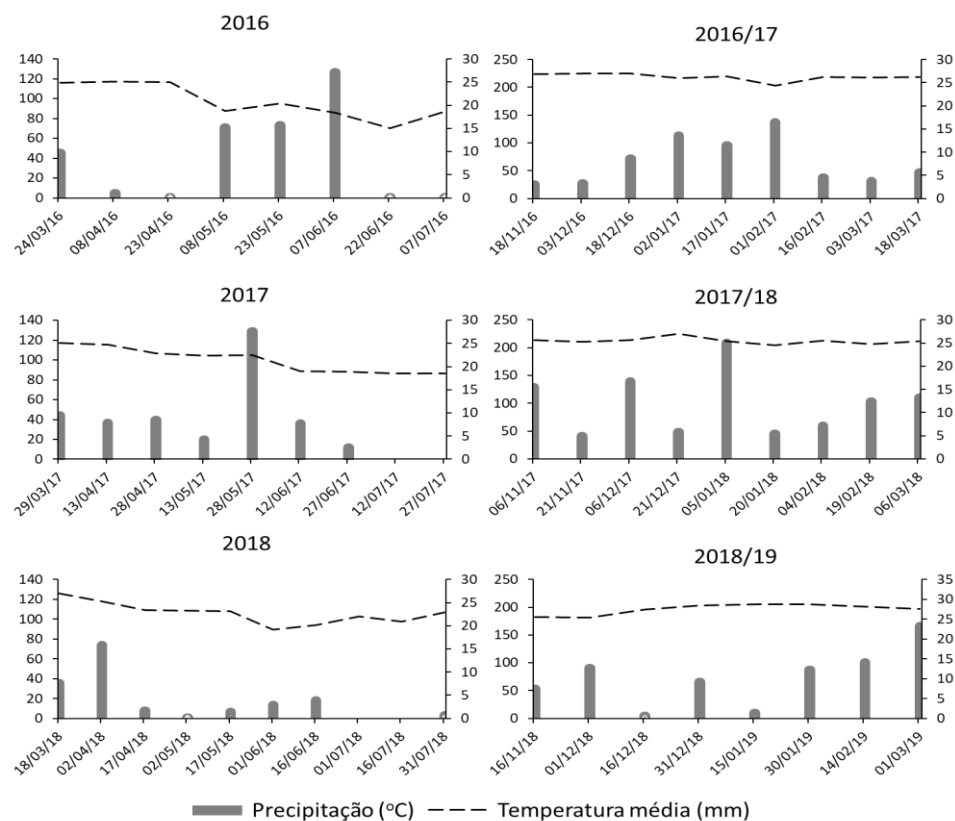
A maior diversidade de plantas pode promover maior riqueza de espécies na comunidade microbiana, devido às interações que ocorrem na rizosfera, entre plantas e microrganismos (FRACETTO *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2018) e influenciar significativamente a atividade enzimática, uma vez que, segundo Smalla *et al.* (2001), as raízes das plantas vivas são capazes de secretar grande quantidade de compostos orgânicos que promovem o crescimento de bactérias, resultando em maior comunidade bacteriana, diversidade e atividade enzimática na rizosfera, em comparação ao solo sob monocultivo. Além disso, para Sant'Anna *et al.* (2009) e Partelli *et al.* (2012), os altos níveis de AET em solos de áreas com maior diversidade vegetal, está relacionado à grande quantidade de matéria orgânica sobre a superfície do solo, como observado em áreas de matas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido no Centro de Pesquisa Fazenda Vô Altino, da Facholi, localizado no município de Caiuá – SP (latitude 21° 49' 58" Sul, longitude 51° 59' 24" Oeste), na região oeste do Estado de São Paulo, com altitude de 330 metros. O tipo climático da região é Aw, segundo classificação de Köppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. A precipitação média anual é de 1353 mm e a temperatura média anual é de 24,3 °C, sendo os meses de janeiro, fevereiro e dezembro os mais quentes (média de 27°C), e os meses de junho e julho os mais frios (média de 21°C) (INMET, 2021). Nos anos agrícolas do estudo foram obtidos os dados médios de precipitação pluvial e temperatura (Figura 2). O solo da área experimental foi classificado com Latossolo Vermelho distrófico textura arenosa (SANTOS *et al.*, 2018), com 816, 116 e 68 g kg⁻¹ de areia, argila e silte na camada de 0 a 0,20 m, respectivamente (EMBRAPA, 1997).

Figura 2. Dados quinzenais de precipitação pluvial (mm) e temperaturas (°C) durante a condução dos experimentos. Caiuá – SP, 2016, 2016/17, 2017, 2017/18, 2018 e 2018/19.



Fonte: <https://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/gi>

3.2 HISTÓRICO DA ÁREA, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

A área experimental foi cultivada com *Megathyrsus maximus* (Syn. *Panicum maximum*) cv. Massai em 2014 para produção de sementes da Empresa Sementes Facholi. Na safra de 2015 foi utilizado milho. Em novembro de 2015, a área foi dessecada para cultivo da cultura da soja em toda a área experimental, com intuito de nivelamento do histórico de cultivo e utilização. A soja foi semeada em espaçamento de 0,45 m, com população média de 330 mil plantas ha⁻¹, com adubação de semeadura de 300 kg ha⁻¹ do formulado 04-30-10. A colheita foi realizada em 26 de fevereiro de 2016.

Em março de 2016, foi realizado um levantamento da fertilidade do solo nas camadas de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m. Foram coletadas, na área total (42 ha), 20 subamostras de solo para uma amostra composta em cada 1 hectare (RAIJ *et al.*, 2001), nas duas profundidades, com estrutura deformada, realizadas com trado tipo sonda, para caracterização da fertilidade do solo. Também, foram coletadas amostras indeformadas (anel volumétrico), nas mesmas camadas, para determinação da porosidade do solo (macro, micro e total) e da densidade, segundo metodologia proposta pela Embrapa (1997). As médias dos valores dos atributos físicos e químicos da caracterização inicial estão apresentados nas Tabelas 1a, 1b e 1c.

Tabela 1a. Resultado inicial da análise dos atributos físicos, N total e relação C/N do solo. Caiuá-SP, set, 2016.

Tratamento	Profundidade	MA	MI	PT	Ds	N Total	Relação C/N
	cm	-----m ³ m ⁻³ -----			Mg m ⁻³	g kg ⁻¹	
S-MRUZ	00 a 10	0,05	0,28	0,33	1,62	0,95	9,16
	10 a 20	0,04	0,26	0,31	1,65	-	-
S-MPIA	00 a 10	0,10	0,29	0,39	1,50	0,77	10,47
	10 a 20	0,07	0,28	0,35	1,63	-	-
S-MPAI	00 a 10	0,12	0,29	0,41	1,47	0,95	9,01
	10 a 20	0,08	0,27	0,34	1,61	-	-
S-MSPD	00 a 10	0,10	0,29	0,39	1,53	1,04	8,32
	10 a 20	0,07	0,26	0,32	1,65	-	-
M-S/SSC	00 a 10	0,10	0,29	0,39	1,53	1,05	7,93
	10 a 20	0,07	0,26	0,32	1,65	-	-
S-PIAPERRE	00 a 10	0,07	0,29	0,35	1,57	0,84	10,27
	10 a 20	0,05	0,26	0,31	1,67	-	-
S-PAIPERE	00 a 10	0,08	0,29	0,37	1,50	0,95	9,90
	10 a 20	0,06	0,27	0,33	1,56	-	-

MA: Macroporosidade; MI: Microporosidade; PT: Porosidade Total, Ds: Densidade do solo. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERRE = Soja-BRS Piatã perene.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 1b. Resultado inicial da análise dos tributos químicos do solo na implantação do experimento. Caiuá-SP, set, 2016.

Tratamento	Profundidade	P – resina	MO	pH	K	Ca	Mg	S-SO ₄
	cm	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	--mmol _c dm ⁻³ --			mg dm ⁻³
S-MRUZ	00 a 10	41	13	5,6	2	21	11	4
	10 a 20	43	12	5,2	1,5	17	7	6
S-MPIA	00 a 10	40	13	5,6	2,1	19	9	4
	10 a 20	30	13	5,5	1,6	18	7	3
S-MPAI	00 a 10	32	12	5,8	1,9	21	9	3
	10 a 20	25	12	5,7	1,1	20	6	3
S-MSPD	00 a 10	57	12	5,8	2,4	25	13	3
	10 a 20	36	12	5,8	1,8	22	9	3
M-S/SSC	00 a 10	57	12	5,8	2,4	25	13	3
	10 a 20	36	12	5,8	1,8	22	9	3
S-PIAPERRE	00 a 10	38	13	6,0	1,9	29	14	3
	10 a 20	32	12	6,0	1,2	29	12	3
S-PAIPERE	00 a 10	47	13	6,1	2,2	28	13	3
	10 a 20	28	13	6,0	1,7	31	18	3

S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERRE = Soja-BRS Piatã perene. Fonte: Elaboração do próprio autor.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 1c. Resultado inicial da análise dos tributos químicos do solo na implantação do experimento. Caiuá-SP, setembro, 2016.

Tratamento	Profundidade	H+Al	Al	SB	CTC	V	K/CTC	Ca/CTC	Mg/CTC	m
	cm	-----mmol _c dm ⁻³ -----						-----%-----		
S-MRUZ	00 a 10	16	1	34,4	50,2	66	4	42	20	3
	10 a 20	18	1	24,9	42,7	57	4	38	15	5
S-MPIA	00 a 10	16	0	29,4	45,4	65	5	41	19	1
	10 a 20	16	0	26,9	42,6	63	4	44	16	0
S-MSPD	00 a 10	14	0	40,5	54,7	72	4	45	23	0
	10 a 20	14	0	32,3	46,1	69	4	48	18	0
M-S/SSC	00 a 10	14	0	40,5	54,7	72	4	45	23	0
	10 a 20	14	0	32,3	46,1	69	4	48	18	0
S-PAIPERE	00 a 10	13	0	31,9	45,1	70	4	46	20	0
	10 a 20	14	0	26,9	40,9	65	3	48	14	0
S-PIAPERRE	00 a 10	13	0	44,3	57,5	76	3	49	23	0
	10 a 20	14	0	42,4	56,4	75	2	52	21	0
S-MPAI	00 a 10	13	0	44,0	56,5	78	4	50	24	0
	10 a 20	14	0	49,9	63,5	76	3	49	25	0

S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERRE = Soja-BRS Piatã perene. Fonte: Elaboração do próprio autor.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com sete tratamentos e quatro repetições, com área em torno de 2 ha por parcela. Os tratamentos foram os seguintes, nos 3 anos agrícolas (2016/17, 2017/18 e 2018/19): 1) milho + *Urochloa ruziziensis* – Soja; 2) milho + *U. brizantha* cv. Piatã – Soja; 3) milho + *U. brizantha* cv. Paiaguás - Soja; 4) milho (Plantio direto) – Soja; 5) milho (preparo convencional) – Soja, 6) milho + capim Piatã – pastejo contínuo, 7) milho + capim Paiaguás – pastejo contínuo.

Os tratamentos foram implantados e conduzidos da seguinte forma:

- 1) **S - Milho + *U. ruziziensis* (S-MRUZ)** - Semeou-se a cultura do milho consorciado com a *U. ruziziensis* na segunda safra de 2017 e 2018.
- 2) **S - Milho + BRS Piatã (S-MPIA)** - Semeou-se a cultura do milho consorciado com a *U. brizantha* cv. BRS Piatã na segunda safra de 2017 e 2018.
- 3) **S - Milho + BRS Paiaguás (S-MPAI)** - Semeou-se a cultura do milho consorciado com a *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás na segunda safra de 2017 e 2018.
- 4) **S - Milho (Plantio direto) (S-MSPD)** - Semeou-se a cultura do milho em monocultivo sob plantio direto, na segunda safra de 2017 e 2018.
- 5) **S - Milho (Preparo convencional) (S-MSPC)** - Semeou-se a cultura do milho em monocultivo, com o preparo convencional do solo (gradagem leve), na segunda safra de 2017 e 2018.
- 6) **Pastagem perene de BRS Piatã (pastejo contínuo) (S-PIAPERRE)** – Semeou-se a *U. brizantha* cv. BRS Piatã após a colheita da soja 2016.
- 7) **Pastagem perene de BRS Paiaguás (pastejo contínuo) (S-PAIPERE)** – Semeou-se a *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás após a colheita da soja 2016.

O milho foi semeado em sistema plantio direto, juntamente com as diferentes forrageiras no período de 08 a 10 de março de 2016, utilizando o espaçamento de 0,90 m entre linhas para o milho e 0,40 m para os capins. O híbrido de milho utilizado foi o DKB 390, atingindo-se uma densidade de 54.563 plantas ha⁻¹, com acumulado de precipitação de somente 336 mm durante o período. Devido à falta de chuvas durante o mês de abril, não foi aplicado herbicidas para supressão das forrageiras. Na safrinha de 2017 e 2018, o híbrido usado foi o DKB 177 que foi semeado simultaneamente com as forrageiras no sistema de plantio direto.

Foi utilizada uma caixa adicional para as sementes das forrageiras acoplada na semeadora (terceira caixa), onde as sementes das forrageiras foram distribuídas à frente da semeadora por meio de ductos espaçados a 0,40 m. A densidade de semeadura das forrageiras foi 5 kg ha⁻¹ de sementes puras e viáveis. A adubação na linha do milho foi de 300 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-16 e a aplicação de nitrogênio em cobertura não foi realizada devido ao período de deficiência hídrica. A colheita foi realizada em agosto de 2016 e a dessecação das forrageiras foi realizada no dia 07 de outubro deste mesmo ano, para em seguida, ser semeada a cultura da soja, como descrito na seção 3.5.

3.3 SEMEADURA, CONDUÇÃO E AVALIAÇÕES DAS CULTURAS DO MILHO E FORRAGEIRAS CONSORCIADAS

Após a colheita dos grãos da soja 2016/17 (13/03/2017) e 2017/18 (26/02/2018), foi realizada a semeadura do híbrido de milho DKB 177, sob sistema plantio direto, juntamente com as forrageiras em consórcio no período de 15 a 16 de março de 2017, e 04 a 05 de março de 2018, respectivamente, utilizando o espaçamento de 0,90 m entre linhas para o milho, atingindo-se uma densidade de 50.700 plantas ha⁻¹ em ambos os anos. A densidade de semeadura das forrageiras foi 5 kg ha⁻¹ de sementes puras e viáveis dos capins *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, *U. brizantha* cv. BRS Piatã e *U. ruziziensis*.

Em 2017 a adubação na linha do milho foi com 300 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-16 e a adubação de cobertura foi com 230 kg ha⁻¹ do formulado 20-00-20. No período de pós-emergência foi aplicada sub dose de herbicidas, sendo 8 g ha⁻¹ de Nicosulfuron e 1,5 kg ha⁻¹ de Atrazina, para suprimir o crescimento da forrageira. Para manutenção das pastagens nos tratamentos perenes, foram aplicados cerca de 240 kg ha⁻¹ do formulado 30-00-10 em cobertura, parcelada em duas vezes, na estação chuvosa.

Em 2018 a adubação na linha do milho foi com 200 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-16, e para a adubação de cobertura foram aplicados 150 kg ha⁻¹ de nitrato de amônio na primeira cobertura (V4), e 60 kg ha⁻¹ de KCl na segunda cobertura (V8), no final da estação chuvosa. Neste ano foi utilizada a sub dose de 120 mL ha⁻¹ de Mesotrione e 2 L ha⁻¹ de Atrazina, para gerar um retardamento no desenvolvimento das forrageiras. Ressalta-se que neste ano, após a colheita de grãos do milho, houve o pastejo animal nas parcelas dos consórcios do milho com as forrageiras.

Como visto, inicialmente a soja foi semeada em toda a área experimental em novembro de 2015, e após a colheita da soja, em 2016, o milho foi semeado de acordo com cada tratamento. Em 2018, após a colheita dos grãos do milho, no dia 11 de julho, os sistemas S-MRUZ, S-MPIA e S-MPAI receberam novilhos da raça Nelore com idade inicial de 12 meses e peso médio de 250 kg, sendo estes distribuídos ao acaso em grupos homogêneos em cada tratamento.

Nos tratamentos com pastagens perenes (S-PIAPERRE e S-PAIPERE), novilhos da raça Nelore, foram distribuídos ao acaso em grupos homogêneos, e permaneceram pastejando na área o ano todo. O método de pastejo foi o de lotação contínua com taxa de lotação variável

(MOTT e LUCAS, 1952), visando manter altura adequada e semelhante nas unidades experimentais. O ajuste da taxa de lotação nas parcelas foi realizado de acordo com a massa de forragem determinada nas avaliações do pasto (mensalmente), para manter a meta de altura. Em cada parcela foram utilizados cinco animais testes selecionados de acordo com padrão homogêneo de peso e um número variável de reguladores conforme a necessidade de ajuste da taxa de lotação, para manutenção da meta de manejo em torno de 0,30 m de altura para as forrageiras (EUCLIDES *et al.*, 2016).

3.4 DESSECAÇÃO DAS FORRAGEIRAS DOS CONSÓRCIOS E IMPLANTAÇÃO DOS LITTER BAGS

No dia 03 de outubro de 2017 dessecou-se as forrageiras remanescentes utilizando-se o herbicida Glyphosate ($1,44 \text{ kg ha}^{-1}$ do ingrediente ativo (i.a.). Em 2017 e 2018, respectivamente, cerca de três e quatro semanas antes da semeadura da soja, dessecou-se as forrageiras, visando a formação de palhada para a manutenção do sistema plantio direto. Antes, porém, foram realizadas amostragens para determinação da produtividade de matéria seca da parte aérea das forrageiras (PMSF) em $0,5 \text{ m}^2$ (quadrado de metal de $1,0 \times 0,5 \text{ m}$), em nove pontos por parcela, adotando-se como altura de corte rente ao solo. Posteriormente, esse material vegetal foi pesado e separado em sub amostras, as quais foram colocados em estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 horas, para a determinação da quantidade de matéria seca que ficou como palhada na área, por meio da extrapolação dos resultados para um hectare.

Quantidade proporcional de massa verde produzida pelas forrageiras, equivalente produzida em um hectare, foi acondicionada dentro de cinco sacos de nylon (Litter Bags) de $0,06 \text{ m}^2$ ($0,3 \times 0,2 \text{ m}$), em seguida estes sacos foram depositados em contato direto com o solo da respectiva unidade experimental e coletados aos 30 (dezembro); 60 (janeiro); 90 (fevereiro); 120 (março) e 150 (abril) dias após o manejo (DAM). Decorridos os dias dos respectivos tempos de avaliação, foi coletado o resíduo vegetal dentro de cada saco, este material foi limpo e determinada a massa seca (estufa a 65°C por 72 h). Em seguida, foi avaliada a decomposição da palha das forrageiras por meio do remanescente de massa seca no interior dos sacos e, então, convertido para percentagem.

3.5 SEMEADURA E AVALIAÇÕES NA SOJA E NO SOLO - UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO

A semeadura mecanizada da soja, cultivar TMG 7063, foi realizada entre os dias 04 a 05 de novembro de 2016, 23 a 24 de outubro de 2017 e 02 a 03 de novembro de 2018, com o auxílio de uma semeadora-adubadora com mecanismo sulcador do tipo haste (facão) para SPD, com espaçamento de 0,45 m e aproximadamente 14 sementes por metro de sulco, almejando-se uma população próxima de 300.000 plantas ha⁻¹. As sementes foram inoculadas com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*: Inoculante sólido turfoso – 80 g por saco de soja (40 kg), Inoculante líquido – 150 mL por saco de soja (40 kg). Em 2016/17 a adubação de semeadura foi 340 kg ha⁻¹ do formulado 04-30-10, em 2017/18 e 2018/19 foi 200 kg ha⁻¹ do formulado 04-30-10 + 130 kg ha⁻¹ de KCl. Os tratos culturais foram realizados conforme as necessidades da cultura.

Em todos os anos avaliados foram aplicados aproximadamente 0,8 L do fungicida Sphere Max + 2 L de óleo Versal (vazão: 150 L ha⁻¹) e 4 L de Acefato. Na fase de estabelecimento da cultura foram aplicados 2,5 L do herbicida Crucial, e no florescimento foram aplicados 300 mL ha⁻¹ do inseticida sistêmico Voraz.

Nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19 foram avaliadas a temperatura e umidade do solo em cada parcela, nos mesmos locais e datas de coleta dos litter bags, com auxílio de um termômetro digital com haste de 0,20 m, modelo Soloterm 1200 (Solotest), enquanto a umidade gravimétrica foi determinada segundo EMBRAPA (1997). Estas mensurações foram realizadas em três pontos determinados logo ao lado dos litter bags, em intervalos de tempo de 30 dias, iniciando no dia do manejo de dessecação (novembro), em dezembro; janeiro; fevereiro; março e abril, na profundidade de 0,10 m.

3.6 COLETA DO SOLO PARA ANÁLISES DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA SOLO

No estádio R8 da cultura soja (12/01/2018 e 17/01/2019) foram coletadas amostras de solo em cada parcela experimental, na profundidade de 0 a 0,10 m para a avaliação da atividade enzimática do solo, com o auxílio de trado tipo sonda. As amostras foram coletadas na seção transversal à linha de semeadura da soja. Foi coletada uma amostra em cada parcela, sendo que cada amostra foi formada por quatro pontos distribuídos na parcela, e cada ponto

foi composto por três subamostras, duas coletadas nas entrelinhas e uma coletada na linha da soja.

3.7 COLHEITA DOS GRÃOS DA SOJA

A colheita da soja foi realizada nos dias 13/03/2017, 26/02/2018 e 25/02/2019. Para a determinação da produtividade de grãos (PG), foram estabelecidos oito pontos ao longo das parcelas experimentais, em cada ponto foram coletadas duas fileiras de plantas com 5 metros de comprimento cada. Estas plantas foram levadas para o galpão de avaliações morfológicas da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - FCAT - Unesp – Dracena, e trilhadas mecanicamente. A partir da determinação do teor de umidade de amostras dos grãos de cada parcela, os dados de produção de grãos foram corrigidos para de 13% de umidade e extrapolados para kg ha^{-1} .

3.8 COLETA DO SOLO PARA ANÁLISES QUÍMICAS, FÍSICAS E FRACIONAMENTO DA MOS

Após a colheita da soja (13/03/2017, 26/02/2018 e 23/02/2019), foram coletadas amostras de solo para avaliação dos atributos químicos em cada parcela experimental, nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em 42 pontos distintos dentro de cada parcela, com o auxílio de trado tipo sonda. As amostras foram encaminhadas ao laboratório de Fertilidade de Solos da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS - Unesp - Ilha Solteira, onde foram analisadas quanto a fertilidade (RAIJ *et al.*, 2001).

Logo ao lado do ponto de amostragem para análise química foram coletadas amostras indeformadas de solo com auxílio de anéis volumétricos, em duplicatas, nas profundidades de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m. As amostras foram encaminhadas para o laboratório de análises físicas do solo da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - FCAT - Unesp – Dracena, onde foram determinados os atributos físicos apresentados na seção 3.10.

3.9 ANÁLISES DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO

Foram avaliadas as atividades de enzimas do solo associadas ao ciclo do carbono (β -Glucosidase); do fósforo (Fosfatase ácida) e do enxofre (Arilsulfatase), utilizando-se os

métodos descritos por Tabatabai (1994). Esses métodos baseiam-se na determinação colorimétrica do *p*-nitrofenol (coloração amarela) formado após a adição de substratos incolores específicos para cada enzima avaliada.

Após a coleta do solo descrita na seção 3.6, as amostras de solo foram tamisadas em peneira de malha de 2 mm, acondicionadas em recipientes plásticos de 250 mL e mantidas em câmara fria (10°C), em níveis de umidade de campo, até o momento das análises. Para cada amostra de solo, coletada no campo, foram efetuadas três repetições analíticas no laboratório. A atividade enzimática do solo foi expressa em µg *p*-nitrofenol liberado por grama de solo seco por hora. As metodologias de extração enzimáticas seguem descritas a seguir:

3.9.1 *β*-Glucosidase

O substrato utilizado na reação desta enzima é o *p*-nitrofenil- β -DGlucopyranosídeo 0,05 M (PNG 0,05 M). As amostras de solo (1,0 g) foram colocadas em erlenmeyer de 50 mL, sendo utilizado um controle onde só foi adicionado o substrato após a incubação. Em seguida, foi adicionado 250 µL de Tolueno, 4,0 mL da solução MUB pH 6,0 a todas as amostras e 1,0 mL de PBG 0,05 M, com exceção aos controles. Os erlenmeyers foram fechados com rolhas de borracha e incubados a 37 °C por 1 h. Após a incubação, foram adicionados 1,0 mL de CaCl₂ 0,5 M, 4,0 mL de Tris-hydroxymethylAmino-Metano (THAM pH 12) e 1,0 mL de PNG 0,05 M (somente aos controles).

Procedeu-se a filtragem em papel filtro nº2, e a intensidade da coloração amarela do filtrado foi mensurada em espectrofotômetro a 410 nm.

A quantidade de *p*-nitroferol formada em cada amostra é determinada com base em curva padrão preparada com concentrações conhecidas de *p*-nitroferol (0, 10, 20, 30, 40, 50 mg de *p*-nitroferol mL⁻¹). A atividade enzimática foi expressa em µg *p*-nitroferol h¹ g⁻¹ solo seco.

3.9.2 Fosfatase Ácida

O substrato utilizado na reação desta enzima é o *p*-nitrofenil- β -DGlucopyranosídeo 0,05 M (PNG 0,05 M).

As amostras de solo (1,0 g) foram colocadas em erlenmeyer de 50 mL, sendo utilizado um controle onde só foi adicionado o substrato após a incubação. Em seguida, foi adicionado

200 μ L de Tolueno, 4,0 mL da solução MUB pH 6,5 em todos os frascos e 1,0 mL de PNF 0,05 M, com exceção aos controles. Os erlenmeyers foram fechados com rolhas de borracha e incubados a 37 °C por 1 h. Após a incubação, foram adicionados 1,0 mL de CaCl_2 0,5 M, 4,0 mL de NaOH 0,5M e 1,0 mL de PNF 0,05 M (somente aos controles). Procedeu-se, a filtragem em papel filtro nº2. A intensidade da coloração amarela do filtrado foi mensurada em espectrofotômetro a 410 nm. A atividade desta enzima foi expressa na mesma unidade da β -Glucosidase.

3.9.3 Arilsulfatase

O substrato para determinação da atividade enzimática da enzima arilArilsulfatase é o *p*-nitrofenil 0,05 M (PNG 0,05 M).

Para cada amostra de utilizou-se 1,0 g de solo, colocada em erlenmeyer de 50 mL, com 4,0 mL da solução tampão de acetato, 1,0 mL de solução PNS, na qual incubou-se por 1 h sob temperatura de 37 °C, e após esse período, procedeu-se de forma idêntica à análise de β -glucosidase. A atividade desta enzima foi expressa na mesma unidade da β -Glucosidase.

3.10 ANÁLISES QUÍMICAS, FÍSICAS E FRACIONAMENTO FÍSICO E QUÍMICO DA MOS

Para a determinação dos atributos químicos do solo, foram utilizados os métodos propostos por Raij *et al.* (2001), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Foram avaliados os seguintes atributos: pH (CaCl_2), teores de P; S- SO_4 ; K; Ca; Mg; Al^{3+} ; H+Al; valores de soma de bases ($\text{SB} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}$); capacidade de troca catiônica ($\text{CTC} = \text{SB} + [\text{H} + \text{Al}]$) e saturação por bases ($\text{V}\% = [100 \times \text{SB}] / \text{CTC}$). Foram analisados também, os teores de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) e no último ano de avaliação (2018/19) foi determinado o N total do solo pelo método de Kjeldahl, como descrito por Bremner e Mulvaney (1982), os quais foram utilizados para cálculo da relação C/N da MOS.

Quanto aos atributos físicos, foram determinadas a porosidade total, pela saturação do solo - volume de poros totais do solo ocupado pela água, a microporosidade pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 0,060 kPa e a macroporosidade foi calculada por diferença entre a porosidade total e a microporosidade, segundo Embrapa (1997). A partir dos dados da porosidade total, a proporção macroporosidade/volume total de poros (MA/VTP) foi

também calculada (TAYLOR; ASHCROFT, 1972). A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico de acordo com Embrapa (1997).

Para o fracionamento granulométrico da MOS, 20 g de terra fina seca ao ar (TFSA) e 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) foram agitados durante 16 horas em agitador horizontal (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Em seguida, a suspensão foi passada em peneira de 53 μm , que consiste no carbono da matéria orgânica associada aos minerais (CM) das frações silte e argila, sendo este obtido por diferença entre COT e COP.

O fracionamento químico da MOS foi realizado segundo técnica de solubilidade estabelecida pela Sociedade Internacional de Substancias Húmicas (SWIFT, 1996) com adaptações de Benites, Mandari e Machado (2003). A partir da separação das frações dos ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH), e a humina (HUM) foram determinados os teores de C de cada fração mediante oxidação do C por dicromato de potássio em meio sulfúrico sob aquecimento, e posterior titulação por sulfato ferroso amoniacal.

No procedimento analítico pesou-se 1,0 g de solo, submetendo-o ao contato com 20 mL de NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) por 24 h. A separação entre o extrato alcalino ($\text{EA} = \text{C-AF} + \text{C-AH}$) e o resíduo (C-HUM) foi feita por centrifugação a 5000 rpm por 30 minutos. Em seguida mais uma lavagem foi realizada com a mesma solução anterior, juntando-se o extrato com o anteriormente obtido, resultando em um volume final de, aproximadamente, 40 mL. O resíduo foi retirado dos tubos da centrifuga, acondicionados em placa de petri e seco a 40°C , secando-se completamente. O pH do extrato alcalino (EA) foi ajustado a $1,0 (\pm 0,1)$ com H_2SO_4 20%, seguido de decantação por 18 h em geladeira. O precipitado (C-AH) foi separado da fração solúvel (C-AF) por filtragem e ambos os volumes aferidos a 50 mL, com água destilada. A partir dos teores de C determinados dos AF e AH HUM foram calculados o extrato alcalino ($\text{EA} = \text{AH} + \text{AF}$) e as relações AH/AF e EA/HUM, para verificação dos processos de humificação da MOS. Das amostras avaliadas foram determinados os teores do carbono total (COT).

Posteriormente, foram calculados os estoques de carbono (EstC) pelo método da camada equivalente (Eq. 1) (BAYER *et al.*, 2000) e corrigidos segundo o método da massa equivalente descrito na Eq. 2 (CARVALHO *et al.*, 2009). Este último método utiliza a massa de solo de um tratamento referência (sistema de preparo convencional) como base para o cálculo do estoque nos demais tratamentos. Para verificar as tendências de acúmulos ou perdas de COT em relação ao SPC, foram calculadas as variações dos EstC (Mg ha^{-1}), a partir das diferenças entre os valores médios dos EstC - massa em cada sistema em relação ao

sistema referência (SPC). Para tais avaliações, as amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m.

$$\text{EstC-camada} = (\text{COT} \times \text{Ds} \times \text{h})/10 \quad (1)$$

onde: EstC – camada é o estoque de carbono do solo (Mg ha^{-1}); COT é o teor de carbono do solo (g dm^{-3}); Ds é a densidade aparente do solo (kg dm^{-3}); e h é a espessura da camada amostrada (cm).

$$\text{EstC – massa} = [\text{COT} \times \text{Ds} \times (\text{Ds}_{\text{ref}}/\text{Ds}_{\text{trat}} \times \text{h.})]/10 \quad (2)$$

onde: EstC – massa é o estoque de carbono orgânico do solo (Mg ha^{-1}); COT é o teor de C orgânico na profundidade amostrada (g kg^{-1}); Ds_{trat} é a densidade aparente do solo na profundidade amostrada (kg dm^{-3}); e Ds_{ref} é a densidade do solo na camada amostrada na área de referência (kg dm^{-3}), e h é a espessura da camada considerada (cm).

3.11 AVALIAÇÕES DOS TEORES DE CLOROFILA NA NAS PLANTAS DE SOJA

No último ano de avaliações, foram realizadas na ocasião do pleno florescimento da cultura soja (R2) (09/02/2019), leituras dos teores de clorofila foliar (ICF) utilizando-se um clorofilômetro digital (CFL 1030 - Falker) equipamento portátil que permite medições instantâneas na folha por leituras. As leituras foram realizadas no terceiro trifólio completamente desenvolvido, a partir do ápice da planta, com uma média de 3 leituras por folíolo, em cinco plantas/parcela.

3.12 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Os dados de degradação de palhas foram submetidos à análise de regressão, para avaliação da degradação no tempo, e as demais variáveis foram submetidos ao teste de comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de significância, com o auxílio do no software SISVAR 5,3 (FERREIRA, 2008). As análises dos componentes principais foram realizadas com o R versão

4.0.1 software (DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019) utilizando os pacotes “FactoMiner”, “shiny”, “FactoInvestigate” e “ggplot2”.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARBONO ORGÂNICO TOTAL E FRAÇÕES FÍSICAS DA MOS - 2017 E 2019

A caracterização inicial do solo das áreas, para os teores de carbono das frações particuladas (COP) da matéria orgânica, mostrou que nas camadas de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m a área experimental apresentava uniformidade para este atributo no primeiro ano de avaliação. Esta uniformidade pode ser uma característica do solo em áreas com o mesmo histórico de uso (Tabela 2), visto que as entradas e saídas de C são fortemente influenciadas pelo preparo do solo, espécies cultivadas, composição das rotações, adubações e, principalmente, pelo manejo dos resíduos culturais (CAMPOS *et al.*, 2011; SÁ *et al.*, 2014).

Os teores médios iniciais de COT, COP e CM na camada de 0 a 0,10 m de profundidade do solo foram de 8,16; 2,6 e 5,6 g kg⁻¹, respectivamente, sendo os dois últimos atributos equivalentes a 31,9 e 68,1% do COT, respectivamente. Para a camada de 0,10 a 0,20 m, os teores foram de 7,83; 2,6 e 5,3 g kg⁻¹, sendo os dois últimos atributos equivalentes a 32,8 e 67,3 % do COT, respectivamente. Enquanto que para a camada de 0,20 a 0,40 m, os tores foram de 6,7; 2,0 e 4,7 g kg⁻¹, estes dois últimos representaram 29,9 e 70,2% do COT, respectivamente.

Neste estudo, a área experimental foi cultivada por cerca de 7 anos com capim Massai para fins de produção de sementes, logo, esta é uma condição para que as práticas de manejo, ao longo do tempo, proporcionassem uniformidade na incorporação de C da biomassa vegetal na área, gerando a homogeneização do solo na área total. Ademais, a uniformização do COP na camada de 0 a 0,20 m de profundidade evidencia a concentração do maior volume de raízes dessa espécie nessa profundidade (SARMENTO *et al.*, 2008), como na maioria das espécies, embora possam alcançar profundidades bem superiores.

O maior desenvolvimento radicular da *M. maximus* próximo à superfície do solo é uma característica comum da maioria das gramíneas (SINGH, 1999; STUMPF *et al.*, 2016), embora a textura do solo tenha grande influência nisso, sendo que o maior desenvolvimento em profundidade é favorecido nos solos arenosos comparado aos argilosos (SCHENK; JACKSON, 2002). Outras condições como a presença de teores tóxicos de Al³⁺ abaixo de 0,20 m, bem como condições físicas inadequadas no subsolo (compactação), podem contribuir para a concentração das raízes nos primeiros 0,20 m de profundidade (STUMPF *et al.*, 2014; STUMPF *et al.*, 2016).

Tabela 2. ¹Carbono orgânico total, matéria orgânica particulada e fração mineral da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2017 e 2019.

Sistemas	2017			2019		
	COT	COP	CM	COT	COP	CM
-----g kg ⁻¹ -----						
0 a 0,10 m						
S-MRUZ	8,41	2,51	5,90	9,09ab	2,67ab	6,08
S-MPIA	7,83	2,52	5,31	8,70ab	2,28ab	6,42
S-MPAI	8,12	2,52	5,60	9,28ab	3,18ab	6,58
S-MSPD	8,12	2,97	5,16	8,12b	2,39ab	5,57
S-MSPC	7,93	2,28	5,65	8,31b	2,14b	6,00
S-PAIPERE	8,40	2,45	5,94	8,89ab	2,36ab	6,53
S-PIAPERE	8,31	2,97	5,34	10,25a	3,38a	7,10
D.M.S.	1,7175	1,5645	2,1288	1,8537	1,2262	2,4198
F	0,7058	0,6477	0,8022	0,0299*	0,0261*	0,4578
C.V.%	6	21	13	7	16	13
0,10 a 0,20 m						
S-MRUZ	8,31	2,39	5,93	7,93	2,13	5,80
S-MPIA	7,83	2,21	5,62	8,12	1,75	6,37
S-MPAI	8,31	2,39	5,92	9,28	2,50	6,78
S-MSPD	7,64	2,72	4,92	7,73	2,02	5,71
S-MSPC	7,73	3,04	4,69	7,73	2,10	5,63
S-PAIPERE	7,35	3,03	4,32	7,93	2,36	5,56
S-PIAPERE	7,64	2,18	5,46	8,70	1,89	6,81
D.M.S.	1,8198	1,1795	2,2153	2,8995	1,4768	3,4970
F	0,4875	0,0949	0,1464	0,4811	0,6135	0,7243
C.V.%	8	16	15	12	25	20
0,20 a 0,40 m						
S-MRUZ	6,86	2,32ab	4,54	6,77	1,34ab	5,56
S-MPIA	6,77	2,60ab	4,18	6,57	2,01a	4,56
S-MPAI	6,96	1,54b	5,42	6,96	1,59ab	5,40
S-MSPD	6,48	1,45b	5,03	6,57	1,15b	5,36
S-MSPC	6,77	1,71ab	5,06	6,77	1,19b	5,50
S-PAIPERE	6,96	2,93a	4,03	6,77	1,62ab	5,15
S-PIAPERE	6,19	1,48b	4,71	7,35	1,62ab	5,73
D.M.S.	0,9287	1,3366	1,8452	1,4851	0,7784	2,2193
F	0,1045	0,0085**	0,1832	0,5933	0,0261*	0,6384
C.V.%	5	23	14	8	18	15

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e

* Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na camada de 0,20 a 0,40 m, os teores iniciais de COT e CM também não diferiram entre as áreas (Tabela 2). Entretanto, os teores de COP diferiram ($p < 0,05$), com a maior média no solo sob o sistema S-PAIPERE (soja sucedida de pastagem perene de BRS Paiaguás) comparado às áreas sob os sistemas S-MPAI, S-MSPD e o S-PIAPERE.

Embora toda a área tenha sido manejada com as mesmas práticas anteriormente, essas variações nos teores de COP em subsuperfície são, possivelmente, provenientes de resíduos remanescentes da vegetação natural do terreno, de antes da sua conversão para campo de produção de sementes, uma vez que as perturbações (revolvimento/homogeneização) causadas pelo preparo inicial da área são significativas na camada de 0 a 0,20 m (SÁ *et al.*, 2014). Estas considerações a respeito da primeira condição do solo da área experimental são importantes para interpretação dos reais efeitos dos sistemas sobre os teores de C do solo em função dos sistemas implantados.

A avaliação final dos teores de C das frações físicas da MO do solo na camada de 0 a 0,10 m, em 2019, indicou diferenças significativas ($p < 0,05$) para os teores de COP do solo em função dos sistemas, refletindo nos teores de COT, porém, não houve efeito sobre o CM ($p > 0,05$) (Tabela 2). Estes resultados diferem dos obtidos por Balin *et al.* (2017), os quais atribuem maior sensibilidade da fração CM às mudanças no manejo de um Latossolo Vermelho argiloso sob clima subtropical, em diferentes sistemas no estado do Paraná, BR, reafirmando a complexidade das transformações da MOS em função de fatores como a textura do solo, clima, sistema, tempo de adoção, entre outros.

Os incrementos ou tendências de incrementos nos teores de COP do solo em alguns tratamentos sob SIPAs e no SPD, contudo, não são necessariamente devido à evolução nos teores de COP, mas devido a menores perdas em relação às observadas no sistema SPC, desde a caracterização inicial. Resultados semelhantes foram obtidos por Zotarelli *et al.* (2012), para o estoque de C do solo, os quais notaram que os maiores valores sob SPD foram resultados da menor perda de C, comparado às perdas ocorridas sob SPC.

O sistema S-PIAPERE apresentou o maior teor médio de COT do solo, com incrementos de 26,2 e 23,4% em relação aos sistemas S-MSPD e S-MSPC, respectivamente. Por outro lado, embora os sistemas S-MRUZ, S-MPIA, S-MPAI e S-PAIPERE tenham apresentado teores semelhantes aos menores encontrados no S-MSPD e S-MSPC, estes também foram semelhantes ($p < 0,05$) aos maiores valores encontrados no S-PIAPERE, indicando a manutenção e/ou tendência de aumento nos teores de COT (SALTON *et al.*, 2014; SULC; FRANZLUEBBERS, 2014).

As alterações do COT na camada de 0 a 0,10 m foi um reflexo da dinâmica observada para o COP, para o qual ficaram evidentes os efeitos deletérios do sistema convencional (SPC), uma vez que este foi o único sistema em que foi observada a menor média em relação ao sistema S-PIAPERRE, com cerca de 57,9% de diferença. Estes resultados são corroborados por Salton *et al.* (2014) e Sant-Anna *et al.* (2016), os quais demonstram que os efeitos deletérios do SPC sobre o C do solo são muito acelerados quando comparados aos efeitos positivos do SPD, que podem ser significativos apenas uma década ou mais (GUARECHI, PEREIRA e PERIN, 2013; ROSSET *et al.*, 2019) após sua adoção. A rápida mineralização do C biodegradável no SPC ocorre devido às mudanças nos mecanismos físicos de proteção dos agregados, recalcitrância bioquímica e tempo de exposição (KOUTIKA *et al.*, 1999), aqui agravadas em solo arenoso.

Assim como observado na caracterização inicial, em 2017, na avaliação final (2019) não houve efeito significativo ($p > 0,05$) dos sistemas sobre os teores de COT, COP e CM na camada de 0,10 a 0,20 m de profundidade do solo, com os respectivos valores médios gerais de 8,2, 2,1 e 6,1 g kg⁻¹, com os dois últimos atributos representando 25,7 e 74,3% do COT, respectivamente. Provavelmente, o curto período de condução dos sistemas (3 anos), somado à uniforme incorporação de C pelas raízes das gramíneas (SINGH, 1999; SARMENTO *et al.*, 2008) cultivadas anteriormente na área, contribuíram para este resultado.

Na camada de 0,20 a 0,40 m é possível observar a manutenção dos teores de COP no solo sob os SIPAs em relação aos sistemas S-MSPD e S-MSPC. Este resultado corrobora com Loss *et al.* (2009), Rossi *et al.* (2012) e Piano *et al.* (2020), que relataram a maior sensibilidades do COP às alterações no manejo do solo em curto prazo, comparado ao COT, demonstrando a maior incorporação de C no perfil do solo sob SIPAs, por meio do maior volume de raízes remanescentes (soja, milho e as forrageiras) nesses sistemas ao longo dos anos (SALTON e TOMAZI, 2014; MARCHINI *et al.*, 2015; GAZOLLA *et al.*, 2015), visto que no SPD e SPC são incorporados apenas C das raízes do milho e soja, que tem menor potencial para aprofundamento em relação às forrageiras.

O solo sob o S-MPIA apresentou o teor de COP superior ($p < 0,05$) aos obtidos no S-MSPD e no S-MSPC, com média de 1,17 g kg⁻¹ entre ambos os sistemas, o que equivale 41,8% a menos em relação ao S-MPIA (Tabela 2). Os sistemas S-MRUZ, S-MPIA, S-PAIPERE e S-PIAPERRE não diferiram entre si, nem entre os demais sistemas, porém, mantiveram os teores de COP similares aos monocultivos (S-MSPD e S-MSPC), com valores semelhantes ao do tratamento com a maior média (S-MPIA). Os resultados das camadas de 0

a 0,10 e 0,20 a 0,40 m corroboram com Don *et al.* (2011) e Zinn *et al.* (2018), ao afirmarem que as perdas médias de C nos solos tropicais, após a conversão de matas nativas em pastagens, são menores do que quando convertidos em áreas agrícolas.

Estes resultados demonstram o potencial para o uso do COP como indicador dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre a conservação do C facilmente oxidável. Porém, neste caso não se pode atribuir este efeito ao revolvimento do solo, pois ocorreu na camada de 0,20 a 0,40 m, portanto, fora do alcance de operação dos implementos usados no preparo do solo. Ademais, a redução ou tendência de redução do COP ocorreu tanto no SPC como no SPD, o que evidencia a pouca incorporação de C em profundidade, em função da sucessão soja-milho, diferente do que ocorre nos SIPAs, principalmente pelas raízes das *Urochloas*, que podem proporcionar significativas melhorias químicas e físicas ao solo (SALTON e TOMAZI, 2014; MARCHINI *et al.*, 2015; GAZOLLA *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2019).

4.2 ATRIBUTOS FÍSICOS E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO – 2017

Os atributos físicos e os estoques de C do solo na camada de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m de profundidade apresentaram uniformidade em todas as áreas (Tabela 3), o que se deve provavelmente ao histórico de cultivo de gramínea forrageira para produção de sementes na área por 7 anos, que com os mesmos manejos ao longo do tempo contribuíram para a incorporação de raízes ao solo, gerando uniformidade física nessa camada, visto que o sistema radicular de gramíneas forrageiras concentra o maior volume na profundidade de 0 a 0,20 m (SARMENTO *et al.*, 2008; STUMPF *et al.*, 2014; STUMPF *et al.*, 2016). Contudo, na camada de 0,10 a 0,20 m houve exceção para a porosidade total (PT), que foi superior ($p < 0,05$) na área sob o sistema S-PIAPER, comparada à observada no sistema S-MPAI.

As médias gerais para macroporosidade (MA), microporosidade (MI) e porosidade total (PT) foram de 0,23; 0,18 e 0,41 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente. A média geral da relação MA/VTP foi de 0,56 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, superior a 0,33 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, limite mínimo ideal para o desenvolvimento das culturas (TORRES *et al.*, 2011) e a média geral da Ds foi de 1,61 Mg m^{-3} , valor esse inferior ao limite máximo ideal para o desenvolvimento radicular das plantas em solos arenosos (1,75 Mg m^{-3}) (REICHERT *et al.*, 2003). Portanto, as características físicas iniciais do solo, na camada de 0 a 0,20 m, não eram limites ao desenvolvimento vegetal (Tabela 3).

Tabela 3. Atributos físicos e estoque de carbono (EstC) do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo nas profundidades de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m. Caiuá – SP, 2017.

Tratamento	MA	MI	PT	Relação MA/VTP	Ds	EstC camada	EstC massa
	-----m ³ m ⁻³ -----				Mg m ⁻³	Mg ha ⁻¹	
	0 a 0,10 m						
S-MRUZ	0,24	0,16	0,40	0,59	1,65	13,81	13,07
S-MPIA	0,20	0,19	0,39	0,51	1,65	12,92	12,14
S-MPAI	0,20	0,18	0,39	0,52	1,66	13,46	12,62
S-MSPD	0,25	0,18	0,43	0,59	1,56	12,62	12,62
S-MSPC	0,25	0,18	0,43	0,59	1,56	12,32	12,32
S-PAIPERE	0,26	0,17	0,43	0,58	1,57	13,22	13,05
S-PIAPERE	0,26	0,18	0,44	0,59	1,60	13,28	12,89
D.M.S.	0,1550	0,0922	0,1020	0,2723	0,1738	2,9035	2,2110
F	0,7265	0,9518	0,4394	0,8759	0,2299	0,6181	0,7006
C.V.%	23	18	7	17	4	8	6
	0,10 a 0,20 m						
S-MRUZ	0,20	0,18	0,38b	0,53	1,67	14,04	13,78
S-MPIA	0,18	0,20	0,39ab	0,49	1,65	12,94	12,81
S-MPAI	0,19	0,18	0,38b	0,51	1,68	13,61	13,30
S-MSPD	0,25	0,16	0,42ab	0,60	1,63	13,28	13,28
S-MSPC	0,25	0,16	0,42ab	0,60	1,63	12,98	12,98
S-PAIPERE	0,23	0,18	0,41ab	0,57	1,62	13,59	13,75
S-PIAPERE	0,24	0,18	0,43a	0,57	1,60	13,28	13,61
D.M.S.	0,0882	0,0850	0,0452	0,1977	0,1149	2,4941	2,3510
F	0,0694	0,8149	0,0099**	0,3141	0,2494	0,7318	0,7075
C.V.%	14	17	4	13	2	7	6

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e * Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. MA: Macroporosidade; MI: Microporosidade; PT: Porosidade Total, Ds: Densidade do solo. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3 ATRIBUTOS FÍSICOS E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO – 2019

Houve efeito significativo ($p < 0,05$) para a maioria dos atributos físicos na camada de 0 a 0,10 m (Tabela 4). A macroporosidade (MA) foi superior no solo sob o S-MSPC comparado ao sistema S-MPIA e às pastagens perenes (S-PAIPERE e S-PIAPERE), porém, a MA nestes e nos demais tratamentos sob SIPAs não diferiram em relação ao S-MSPD, demonstrando que o pastejo animal conduzido de forma criteriosa nos SIPAs reduz ou elimina os prejuízos sobre a aeração do solo (MOREIRA *et al.*, 2014). A maior aeração do solo sob S-MSPC é normal,

uma vez que neste sistema são realizadas operações contínuas de revolvimento do solo, com aração e gradagem, porém este efeito é passageiro, sobretudo em solos arenosos com estrutura fraca (DONAGEMMA *et al.*, 2016), deixando solo desestruturado e com maiores riscos de erosão com consequente degradação em médio e curto prazo.

Os resultados da MA refletiram, integralmente, sobre os valores de porosidade total (PT) e na relação entre a macroporosidade e volume total de poros (MA/VTP), os quais diferiram entre os sistemas S-MSPC e S-PAIPERE, de modo que neste primeiro sistema a PT foi 25,0% e a MA/VTP foi 38,0% superiores. Vale ressaltar que, embora estes atributos tenham diferido entre os sistemas S-MSPC e S-PAIPERE, os valores das relações MA/VTP foram superiores a $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, limite mínimo, considerado ideal para o desenvolvimento das culturas (TORRES *et al.*, 2011).

Por outro lado, com exceção ao sistema S-PAIPERE, as médias de PT e MA/VTP em todos os sistemas sob SIPAs, incluindo a modalidade S-PIAPERE, não diferiram em relação ao S-MSPC (Tabela 4). Isso demonstra que a integração de diversos atributos físicos para avaliação da qualidade física do solo é desejável para evitar avaliações equivocadas (MOREIRA *et al.*, 2014). Estes resultados demonstram que os efeitos do pisoteio animal nos SIPAs sobre os atributos físicos do solo, não são significativamente prejudiciais quando o pastejo animal é conduzido adequadamente sob ajustes da lotação e altura de pastejo.

Como esperado, a maior aeração do solo no sistema S-MSPC, indicada pelos atributos apresentados anteriormente, influenciou diretamente as proporções do volume de sólidos em relação ao ar nesse sistema, de modo que apresentou a menor Ds do solo comparado aos demais sistemas, como, também, foi constado por Braz *et al.* (2013), sendo considerado o tratamento referência para a estimativa dos estoques de C nos demais sistemas, pelo método da massa equivalente (CARVALHO *et al.*, 2009).

Segundo Possamai *et al.* (2021), os menores valores de MA e Ds no solo sob SIPAs refletem os efeitos do tráfego de máquinas somados ao pisoteio animal na estação de pastejo, mesmo com revolvimento mínimo do solo e os resíduos vegetais mantidos na superfície. Entretanto, a manutenção da cobertura do solo ao longo dos anos, após a implantação dos SIPAs, com mínima perturbação do solo e uso de gramíneas com vigoroso sistema radicular fasciculado na fase de consórcio, não acarretou em limitações físicas do solo. Outros estudos têm demonstrado que o aumento da Ds do solo nas camadas superficiais, devido ao pisoteio animal, geralmente não atingem valores prejudiciais às culturas subsequentes ao período de pastejo (FLORES *et al.*, 2007, MARCHÃO *et al.*, 2007; POSSAMAI *et al.*, 2021).

Os valores de Ds do solo verificados no presente estudo são considerados adequados, pois em solos arenosos podem limitar o desenvolvimento radicular das plantas quando acima de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ (REICHERT *et al.*, 2003). Além disso, Possamai *et al.* (2021) corroboram com os obtidos no presente estudo, pois os maiores valores de MA nos SIPAs e monocultivos em SPD não comprometem, necessariamente, o desenvolvimento das culturas, visto que são bem superiores a 10% da PT, valor mínimo considerado adequado para o desenvolvimento das culturas (GIRARDELLO *et al.*, 2011; BAQUERO *et al.*, 2012), reafirmando a aeração adequada demonstrada pela relação MA/VTP, condição esta potencializada pela textura arenosa do solo da área experimental.

Os estoques de carbono (EstC) do solo estimados pelos métodos da camada e da massa equivalente não diferiram entre os SIPAs. Porém, o S-PIAPERRE se destacou com incremento de 29,0% pelo o método da camada (EstC camada) e 24,7% pela massa equivalente (EstC massa), quando comparado aos S-MSPC e S-MSPD ($p < 0,05$) (Tabela 4). O revolvimento intensivo do solo sob SPC, espécies cultivadas, o manejo dos resíduos culturais, entre outros, influenciam fortemente as entradas e saídas de C no solo (CAMPOS *et al.*, 2011; SÁ *et al.*, 2014; PURWANTO e ALAM, 2019). A semelhança entre o SPD e o SPC, até então, pode ser justificada pelo curto período de adoção dos sistemas (3 anos), visto que são esperadas mudanças significativas em médio ou longo prazo (GUARECHI, PEREIRA e PERIN, 2013; ROSSET *et al.*, 2019), além disso, no SPD não há a contribuição do volume de raízes remanescentes das forrageiras, como ocorre nos SIPAs (SALTON e TOMAZI, 2014; MARCHINI *et al.*, 2015).

Os resultados de Salton *et al.* (2014) e Sant-Anna *et al.* (2016) corroboram com os obtidos no presente estudo, pois em experimento de longa duração, mas em solo argiloso, Salton *et al.* (2014) observaram que os estoques de C do solo, na camada de 0 a 0,20 m, atingiram os níveis mais altos em uma pastagem perene bem manejada, seguida pelos SIPAs em SPD com cultivo de soja. Eles também observaram que o manejo do solo sob SPC contínuo resultou em menores estoques de C do solo.

O maior estoque de C no solo no sistema S-PIAPERRE indica a capacidade das cultivares de *Urochloa* em incorporar carbono no solo, sobretudo em áreas sob pastagens por maiores espaços de tempo no sistema, devido a fatores como suas taxas de rebrota e deposição de serapilheira (BRAZ *et al.*, 2013). Esta afirmação é fundamentada no fato de que, assim como no S-PIAPERRE, o S-PAIPERE e todos os outros que incluíram as *Urochloas*, apresentaram tendência para o incremento de C no solo na camada de 0 a 0,20 m (Figura 3), o

que não ocorreu até então, provavelmente devido ao curto período de implantação dos sistemas, sugerindo um aumento nos estoques à medida em que os sistemas avançarem no processo de estabilização.

Tabela 4. Atributos físicos e estoque de carbono (EstC) do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m. Caiuá – SP, 2019

Tratamento	MA	MI	PT	Relação MA/VTP	Ds	EstC camada	EstC massa
	-----m ⁻³ m ⁻³ -----				Mg m ⁻³	Mg ha ⁻¹	
0 a 0,10 m							
S-MRUZ	0,19ab	0,13	0,32ab	0,59ab	1,62a	14,78ab	13,88ab
S-MPIA	0,16b	0,14	0,30ab	0,54ab	1,67a	14,54ab	13,29ab
S-MPAI	0,18ab	0,12	0,30ab	0,59ab	1,66a	15,36ab	14,17ab
S-MSPD	0,19ab	0,11	0,30ab	0,62ab	1,67a	13,55b	12,41b
S-MSPC	0,25a	0,11	0,35a	0,69a	1,53b	12,70b	12,70b
S-PAIPERE	0,14b	0,14	0,28b	0,50b	1,69a	15,09ab	13,58ab
S-PIAPERE	0,16b	0,14	0,31ab	0,52ab	1,65a	16,93a	15,65a
D.M.S.	0,0744	0,0492	0,0578	0,1860	0,0800	3,3624	2,8151
F	0,0083**	0,1546	0,0356*	0,0402*	0,0002**	0,0207*	0,0291*
C.V.%	14	14	7	11	2	8	7
0,10 a 0,20 m							
S-MRUZ	0,20	0,13	0,33a	0,60	1,64	13,16ab	12,73ab
S-MPIA	0,17	0,11	0,27b	0,62	1,67	13,70ab	13,00ab
S-MPAI	0,16	0,12	0,28b	0,57	1,69	15,60a	14,65a
S-MSPD	0,19	0,11	0,29ab	0,64	1,66	13,01ab	12,42b
S-MSPC	0,19	0,13	0,32ab	0,59	1,59	12,39b	12,39b
S-PAIPERE	0,17	0,12	0,28ab	0,57	1,71	14,06ab	12,99ab
S-PIAPERE	0,15	0,15	0,30ab	0,50	1,68	15,44ab	14,48ab
D.M.S.	0,1141	0,0823	0,0511	0,3187	0,1217	3,1506	2,1808
F	0,8163	0,5984	0,0167*	0,8178	0,0881	0,0260*	0,0122*
C.V.%	23	23	6	19	3	8	6

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e

* Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. MA: Macroporosidade; MI: Microporosidade; PT: Porosidade Total, Ds: Densidade do solo. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

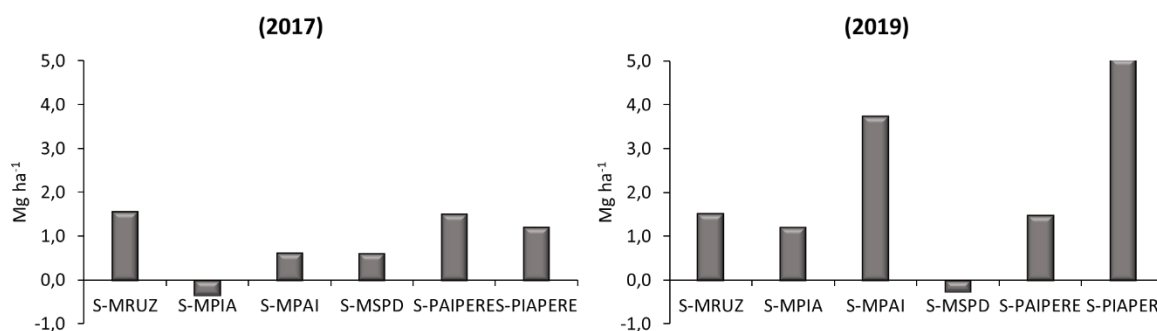
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na camada de 0,10 a 0,20 m de profundidade, embora os sistemas e modalidades de cultivos não tenham influenciado significativamente os valores de MA e MI ($p>0,05$), a PT foi significativamente superior no solo sob o sistema S-MRUZ, comparado ao S-MPIA e S-

MPAI, com incremento de 20% no S-MRUZ em relação à média entre os dois últimos sistemas (Tabela 4).

Em relação aos EstC na camada de 0,10 a 0,20 m, os resultados foram semelhantes aos obtidos na camada de 0 a 0,10 m (Tabela 4). Com base nestes resultados, a Figura 3 representa as variações na manutenção ou incrementos dos EstC do solo (Δ EstC) na profundidade de 0 a 0,20 m, em todos os sistemas conservacionistas em relação ao S-MSPC. Isso pode ser atribuído à MOS adicionada pelas raízes apresentar grande recalcitrância (alta relação lignina/N) contribuindo para o acúmulo de C e mitigando o adensamento do solo em profundidade (SILVA; MENDONÇA, 2007). Neste caso, vale destacar o S-MPAI, que apresentou média superior ao S-MSPC ($p < 0,05$), com incremento na ordem de 25,9% pelo método da camada e 18,2% pelo método da massa equivalente. Ademais, diferente do ocorrido na camada de 0 a 0,10 m, houve tendência de incremento no EstC pelo método da camada equivalente no S-MSPD, em relação ao S-MSPC (Tabela 4).

Figura 3. Variação dos estoques de C do solo pelo método da massa equivalente (Δ EstC) nos sistemas e modalidades de cultivos, na profundidade de 0 a 0,20 m, em relação ao sistema de preparo convencional do solo. Caiuá – SP, 2017 e 2019.



S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPER = Soja-BRS Piatã perene.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na avaliação dos estoques de C corrigidos pelo método da massa equivalente, contudo, a tendência de incremento no EstC do solo sob S-MSPD não se confirma, uma vez que este método possibilita a comparação do EstC numa unidade de solo no sistema avaliado, equivalente a uma unidade de massa do solo na mesma camada do tratamento referência (S-MSPC), possibilitando maior fidelidade na estimativa de reduções ou incrementos de C no solo em função dos tipos de manejos. Isto significa que, assim como observado na camada de

0 a 0,10 m, na camada de 0,10 a 0,20 m os estoques de C incrementaram (S-MPAI) ou apresentaram tendência de aumentos nos SIPAs (S-MRUZ, S-MPIA, S-PAIPERE, S-PIAPERE) em relação às áreas que contemplaram apenas o monocultivo, independente do sistema de preparo (Tabela 4).

Vale ressaltar que são esperados incrementos nos estoques de C no solo sob SPD (BODDEY *et al.*, 2010; CARVALHO *et al.*, 2010b), entretanto, uma série de fatores bióticos e abióticos podem contribuir para estes resultados no presente estudo, entre eles, a textura arenosa do solo (BRAZ *et al.*, 2013), que torna lento os mecanismos de proteção e conservação do C incorporado ao solo em relação aos solos argilosos (HASSINK, 1997; BARBERA *et al.*, 2012), além da ausência de restrições à atividade microbiana no solo sob condições tropicais, somado ao curto período de condução dos sistemas.

4.4 DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS FRAÇÕES HÚMICAS DA MOS – 2017 E 2019

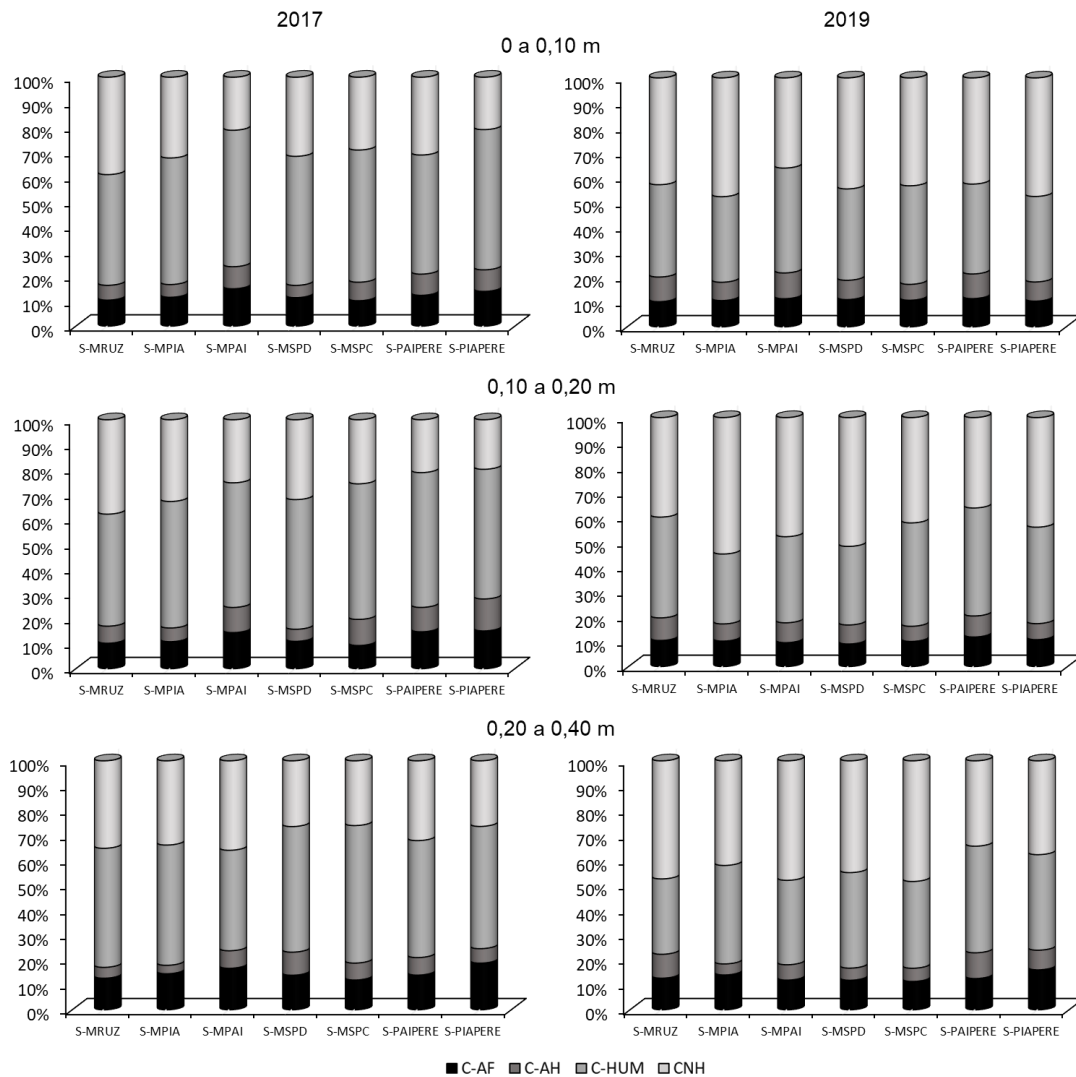
A média geral da fração humina (HUM) na seção de 0 a 0,40 m foi de 50% do COT na avaliação inicial (2017), e sendo reduzida para 37% na avaliação final (2019). A maior participação percentual da HUM em relação às demais frações (Figura 4) é, normalmente, relatada em estudos envolvendo substâncias húmicas (SHs) do solo (GUARECHI, PEREIRA e PERIN, 2013; GAZOLLA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016; PEGORARO *et al.*, 2018; ROSSET *et al.*, 2019; FREITAS *et al.*, 2020; MARINHO JUNIOR *et al.*, 2021).

Por ser a fração mais estabilizada da MOS, a redução percentual da HUM no COT pode evidenciar a perturbação natural causada pelas práticas de manejo, em curto prazo (CORBEELS *et al.*, 2016; SIX *et al.*, 2020). A reversão desta situação, contudo, é esperada com a estabilização dos sistemas ao longo do tempo (OGLE *et al.*, 2019; PURWANTO e ALAM, 2019). Conforme Caetano *et al.* (2013), a conversão de solo do Cerrado nativo em lavoura, com sucessão soja- milho, reduziu inicialmente em 1,8 vezes a percentagem de C-HUM, entretanto, após dois anos de cultivo, houve recuperação percentual de HUM para valores mais elevados, demonstrando a grande contribuição do novo resíduo vegetal para a estabilização do C na fração mais humificada das SHs.

As percentagens das SHs no COT foram de 71, 72 e 69% em 2017, e 52, 55 e 57 em 2019, nas camadas de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, respectivamente (Figura 4), médias superiores a 39, 36 e 38%, obtidas por Gazolla *et al.* (2015) em Latossolo Vermelho Distroférico, textura argilosa, sob diferentes sistemas em clima tropical quente, e inferiores a

90, 86 e 85%, obtidas por Rosset *et al.* (2016) em Latossolo Vermelho Eutroférrico, textura muito argilosa, sob diferentes sistemas em clima subtropical, nas respectivas profundidades.

Figura 4. Distribuição percentual das frações de ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH), humina (HUM) e carbono não humificado (CNH) do solo nos sistemas e modalidades de cultivo avaliados, nas profundidades de 0 a 0,10, 10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2017 e 2019.



S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As percentagens médias gerais da fração C-AF, em 2017 e 2019, foram de 12, 12, 15 e 11, 10 e 13% nas profundidades de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, respectivamente (Figura 4), evidenciando a maior movimentação desta fração no perfil do solo, comum em

relatos de outros estudos, como por Caetano *et al.* (2013), em Neossolo Quartzarênico com cultivo sucessivo de soja/milheto, em médio e longo prazos, no estado do Mato Grosso do Sul, BR e por Rosset *et al.* (2016), em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo, no estado do Paraná, BR.

4.5 FRAÇÕES HÚMICAS DA MOS – 2017 E 2019

A caracterização inicial do solo apresentou homogeneidade para as frações químicas da matéria orgânica e suas relações na camada de 0 a 0,10 m (Tabela 5). Embora as frações C-AF e C-AH não tenham diferido entre as áreas ($p>0,05$), o extrato alcalino (EA), representado pela soma de ambas as frações, diferiu significativamente em 48,1% a mais no S-MPAI em relação ao S-MPIA.

Na camada de 0,10 a 0,20 m houve efeito significativo para o C-AH, EA, AH/AF e o IH (Tabela 5). Inicialmente, o solo sob o sistema S-PIAPERE apresentou o teor médio de C-AH significativamente superior aos observados nos sistemas S-MPIA e S-MSPD, refletindo as mesmas diferenças nos valores do EA, nestes tratamentos. A relação AH/AF e o IH foram inferiores no sistema S-MSPD, enquanto que as maiores médias de AH/AF ocorreram no S-MSPC e os maiores IH foram observados nos sistemas S-MPAI e S-PIAPERE.

Tais resultados evidenciam o efeito *priming* negativo no solo sob SPC (BASTIDA *et al.*, 2019), pois a oferta de C proveniente dos resíduos vegetais frescos, favorece o predomínio dos microrganismos capazes de utilizar apenas este material como fonte de energia (r-estrategistas) (PAUL e CLARK, 1989), e, uma vez que este material se esgota, esta comunidade é substituída por outra menor, mas especializada em consumir o C mais recalcitrante (K-estrategistas) (PAUL e CLARK, 1989). Visto que a fração C-AF é mais lábil em relação à fração C-AH, a maior relação AH/AF no solo sob SPC, a 0,20 m de profundidade, indica uma MOS mais recalcitrante (Tabelas 5 e 7), e evidencia a necessidade do constante aporte e conservação de C sobre o solo e no subsolo, via raízes, para fins de manutenção/incremento do estoque de C, e evitar danos à ciclagem de nutrientes.

Na camada de 0,20 a 0,40 m, a área sob o S-MSPD apresentou as maiores médias para o C-AH, AH/AF e IH, em relação às áreas sob S-MRUZ e S-MPIA, exceto para a AH/AF, a qual foi significativamente superior no S-MSPD, apenas em relação ao S-MPIA. A relação EA/HUM foi superior no solo sob o sistema S-PIAPERE comparado ao S-MRUZ e S-MSPC (Tabela 5).

Tabela 5. ¹Frações húmicas da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10, 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá - SP, 2017.

Sistemas	COT	C-AF	C-AH	C-HUM	EA	AH/AF	EA/HUM	IH
-----g kg ⁻¹ -----								%
0 – 0,10 m								
S-MRUZ	8,41	0,88	0,50	3,74	1,38ab	0,58	0,37	6,13
S-MPIA	7,83	0,91	0,40	3,98	1,31b	0,45	0,34	5,29
S-MPAI	8,12	1,22	0,72	4,45	1,94a	0,59	0,44	9,02
S-MSPD	8,12	0,93	0,40	4,21	1,39ab	0,50	0,35	5,66
S-MSPC	7,93	0,81	0,59	4,21	1,40ab	0,75	0,34	7,38
S-PAIPERE	8,80	1,09	0,75	4,21	1,84ab	0,69	0,44	8,62
S-PIAPERE	8,31	1,16	0,72	4,68	1,88ab	0,66	0,42	8,87
D.M.S.	1,3523	0,5180	0,4096	2,4723	0,6237	0,3288	0,2007	5,6344
F	0,2841	0,1130	0,0531	0,8847	0,0093**	0,0776	0,3586	0,1497
C.V.%	6	18	24	20	14	19	18	27
0,10 – 0,20 m								
S-MRUZ	8,31	0,85	0,57ab	3,74	1,41ab	0,70bc	0,42	6,69bc
S-MPIA	7,83	0,85	0,43b	3,98	1,28ab	0,60bc	0,35	5,45bc
S-MPAI	8,41	1,22	0,85ab	4,21	2,07ab	0,76bc	0,50	10,41ab
S-MSPD	7,64	0,84	0,37b	3,98	1,20b	0,54c	0,32	4,71c
S-MSPC	7,73	0,72	0,81ab	4,21	1,53ab	1,44a	0,39	10,35abc
S-PAIPERE	7,35	1,09	0,72ab	3,98	1,81ab	0,68bc	0,49	9,72abc
S-PIAPERE	7,64	1,16	0,98a	3,98	2,14a	0,97b	0,55	12,59a
D.M.S.	1,9338	0,6099	0,5026	2,2031	0,8901	0,4059	0,2492	5,6639
F	0,4852	0,0902	0,0088**	0,9895	0,0141*	0,0001**	0,0519	0,0027**
C.V.%	9	22	26	19	19	17	20	23
0,20 – 0,40 m								
S-MRUZ	6,86	0,87	0,30b	3,28	1,17	0,32ab	0,34b	4,17b
S-MPIA	6,77	0,98	0,23b	3,27	1,21	0,23b	0,40ab	3,30b
S-MPAI	6,96	1,16	0,49ab	2,81	1,65	0,43ab	0,65a	6,78ab
S-MSPD	6,48	0,90	0,60a	3,27	1,50	0,63a	0,47ab	9,00a
S-MSPC	6,77	0,81	0,46ab	3,74	1,27	0,54ab	0,33b	6,54ab
S-PAIPERE	6,96	0,97	0,49ab	3,27	1,45	0,49ab	0,42ab	6,78ab
S-PIAPERE	6,19	1,16	0,36ab	3,04	1,52	0,33ab	0,48ab	5,53ab
D.M.S.	0,9287	0,4108	0,2683	1,8291	0,5592	0,3287	0,2997	4,0297
F	0,1045	0,0661	0,0057**	0,7359	0,0788	0,0127*	0,0411*	0,0065**
C.V.%	5	14	22	19	14	27	23	23

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e * Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na avaliação final das SHs do solo, em 2019, foram constatadas diferenças significativas para o C-AH na camada de 0 a 0,10 m, com incremento de 81,1% no solo sob o S-MPAI, comparado à média do sistema S-MSPC (Tabela 6). Vale ressaltar o aumento ou tendência de aumento do C-AH em todos os sistemas conservacionistas adequando-se integralmente nos valores do EA. No SPC, o contínuo revolvimento do solo prejudica os mecanismos físicos de proteção da MOS, isso altera a recalcitrância bioquímica dos diferentes “pools” de C (KOUTIKA *et al.*, 1999), expondo-o à acelerada decomposição microbiana (CORBEELS *et al.*, 2016; SIX *et al.*, 2020).

Na camada de 0,10 a 0,20 m, embora a maioria das variáveis sob o S-MSPC tenham sido inferiores aos demais sistemas, não foram significativas ($p > 0,05$). Na camada de 0,20 a 0,40 m ocorreram as maiores variações em relação à primeira camada. Os sistemas com pastagens perenes, S-PAIPERE e S-PIAPERE, se destacaram com os maiores teores de C-AH e C-AF, respectivamente, comparados aos sistemas S-MSPC e S-MSPD (Tabela 6).

O maior teor de C-AF apenas na camada de 0,20 a 0,40 m, no S-PIAPERE e levemente superiores nos demais SIPAs, em relação ao S-MSPD e S-MSPC, sugerem a perda seletiva desta fração mais solúvel nas camadas superiores e deposição nas camadas mais profundas, nos sistemas com maior aporte de resíduos vegetais, o que pode ser natural em solo mais arenosos (BENITES; MADARI e MACHADO, 2003).

Para os teores de C-AH, a maior média foi obtida no tratamento S-PAIPERE, comparado aos sistemas SPD, SPC e S-MPIA. Ambas as frações, C-AF e C-AH, apresentam grupamentos reativos que potencializam ter mais cargas dissociadas do que a capacidade de troca típica de uma argila 2:1 ($< 2 \text{ mol}_c \text{ kg}^{-1}$) (SILVA e MENDONÇA, 2007), o que demonstra a importância de seus teores, sobretudo, nos solos agrícolas tropicais altamente intemperizados.

Tabela 6. ¹Frações húmicas da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2019.

Tratamento	COT	C-AF	C-AH	C-HUM	EA	AH/AF	EA/HUM	IH
-----g kg ⁻¹ -----								%
0 – 0,10 m								
S-MRUZ	9,09ab	0,92	0,90ab	3,37	1,82ab	0,98	0,54	9,89
S-MPIA	8,70ab	0,92	0,64ab	2,99	1,56ab	0,68	0,52	7,12
S-MPAI	9,28ab	1,05	0,96a	3,91	2,01a	0,91	0,53	10,13
S-MSPD	8,12b	0,89	0,63ab	2,98	1,52ab	0,68	0,52	7,48
S-MSPC	8,31b	0,89	0,53b	3,29	1,42b	0,60	0,43	6,25
S-PAIPERE	8,89ab	1,01	0,88ab	3,21	1,89ab	0,85	0,58	9,68
S-PIAPERE	10,25a	1,06	0,79ab	3,52	1,85ab	0,74	0,56	7,48
D.M.S.	1,7678	0,3310	0,4088	2,2846	0,5605	0,4670	0,3516	4,5601
F	0,0217*	0,3379	0,0215*	0,8036	0,0223*	0,1146	0,8088	0,0555
C.V.%	7	12	19	24	11	21	23	19
0,10 – 0,20 m								
S-MRUZ	7,93	0,83	0,72	3,21	1,55	0,87	0,48	8,97
S-MPIA	8,12	0,83	0,56	2,28	1,39	0,61	0,68	6,63
S-MPAI	9,28	0,89	0,74	3,21	1,63	0,89	0,50	7,64
S-MSPD	7,73	0,70	0,59	2,44	1,33	0,81	0,57	7,72
S-MSPC	7,73	0,78	0,47	3,21	1,25	0,53	0,37	6,04
S-PAIPERE	7,93	0,94	0,67	3,44	1,61	0,73	0,47	8,21
S-PIAPERE	8,70	0,94	0,56	3,37	1,50	0,59	0,44	6,30
D.M.S.	2,8995	0,5474	0,4248	1,9934	0,7703	0,4758	0,4056	6,5995
F	0,4811	0,7148	0,3246	0,3139	0,5426	0,1063	0,2862	0,6911
C.V.%	12	23	24	23	18	23	28	31
0,20 – 0,40 m								
S-MRUZ	6,77	0,86ab	0,65ab	2,05	1,52	0,74ab	0,76	9,57ab
S-MPIA	6,57	0,92ab	0,29c	2,60	1,21	0,31b	0,54	4,31c
S-MPAI	6,96	0,83ab	0,43abc	2,36	1,26	0,52ab	0,55	6,11abc
S-MSPD	6,57	0,78b	0,32c	2,52	1,10	0,41b	0,46	4,86bc
S-MSPC	6,77	0,77b	0,36bc	2,36	1,13	0,45ab	0,47	5,20bc
S-PAIPERE	6,77	0,85ab	0,70a	2,90	1,56	0,87a	0,54	10,55a
S-PIAPERE	7,35	1,18a	0,58abc	2,82	1,76	0,50ab	0,61	7,96abc
D.M.S.	1,4851	0,3713	0,3147	2,1421	0,9485	0,4550	0,3851	5,0264
F	0,5933	0,0328*	0,0022**	0,8291	0,2027	0,0127*	0,2119	0,0048**
C.V.%	8	15	23	29	24	29	24	25

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e * Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O maior teor de C-AF no solo sob SIPAs é interessante, visto que esta fração pode contribuir mais significativamente para a geração de cargas no solo comparada às demais frações. Em solos orgânicos, Gondar *et al.* (2005) relataram incrementos de cargas superficiais em C-AF e C-AH na faixa de pH de 4 a 6, com maior contribuição na fração C-AF. No presente estudo, ainda não foi observada a contribuição significativa destes resultados sobre a CTC do solo na camada de 0,20 a 0,40 m, a pH médio de 5,1 (Tabela 10), entretanto, ressalta-se que Gondar *et al.* (2005) analisaram solos orgânicos, portanto, com maior poder tampão comparado ao solo arenoso avaliado no presente estudo. Isto sugere uma faixa de pH mais estreita para efeitos significativos sobre a CTC em solos arenosos do Cerrado, visto que Silva e Mendonça (2007) relatam pHs de 5 a 7 para que grande parte dos grupamentos acídicos se dissociem em solos minerais. Assim, estas variações abrem campos para novas hipóteses em estudos futuros.

Embora os teores de C-AH nos tratamentos S-MRUZ, S-MPAI e S-PIAPERRE não tenham diferido significativamente do S-MSPC, estes foram iguais ($p > 0,05$) aos obtidos no tratamento com a maior média para esta fração (S-PAIPERE) (Tabela 6), indicando tendência de incremento com o tempo, ao se considerar os resultados apresentados para esta mesma camada na caracterização inicial (Tabela 5).

A influência dos sistemas sobre os teores de C-AF e C-AH refletiu sobre a relação AH/AF na camada de 0,20 a 0,40 m, com a maior média obtida no sistema S-PAIPERE (Tabela 6), o que permite ressaltar um caráter mais fulvático das SHs onde leguminosas (soja) são cultivadas (SILVA; MENDONÇA, 2007). Quanto ao S-PIAPERRE, embora sem cultivo recente de soja, a menor relação AH/AF pode ser atribuída à maior lotação animal (5,3 UA ha⁻¹) em relação ao S-PAIPERE (3,8 UA ha⁻¹), o que gera maior deposição de esterco (CARPINELLI *et al.*, 2020), fonte de AF e AH (CASTILHOS *et al.*, 2008) reduzindo a relação AH/AF devido à maior mobilidade do AF em profundidade (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003).

Com base nos resultados da caracterização inicial da camada de 0,20 a 0,40 m (Tabela 5), nota-se, proporcionalmente, a mesma dinâmica na distribuição do C-AH no solo sob os diferentes sistemas na avaliação final (Tabela 6), exceto para o S-MSPD, que apresentou redução significativa ($p < 0,05$) em relação ao S-PAIPERE, o qual se destacou com incrementos de 141,7%, em relação à média entre os tratamentos S-MPIA e S-MSPD. As reduções/aumentos nas frações AF e AH não influenciaram no EA (AF+AH), porém, foram suficientes para homogeneizar a relação EA/HUM em subsuperfície, em relação à

caracterização inicial, reafirmando a iluviação de matéria orgânica para as camadas subsuperficiais do solo (BENITES; MADARI; MACHADO, 2003).

Ainda na camada de 0,20 a 0,40 m, a maior média para os teores de C-AH no sistema S-PAIPERE resultou em maior índice de humificação (IH) neste tratamento (Tabela 6). Embora o S-MSPD tenha apresentado uma das menores médias para a fração C-AH, o grau de humificação do solo (IH) apresentou tendência de manutenção ao se igualar ($p < 0,05$) às médias encontradas na maioria tratamentos. Ademais, assim como o C-AH, o IH no sistema S-MPIA foi inferior ($p < 0,05$) aos observados no S-MRUZ e no S-PAIPERE, porém, isto não significa um efeito prejudicial do S-MPIA, mas sim a manutenção do padrão de distribuição dessa fração desde a caracterização inicial, e espera-se o aumento na humificação neste tratamento, como tem ocorrido nos demais SIPAs, pois a amplitude da diferença em relação ao SPC reduziu de 57,4% na caracterização inicial (Tabela 5) para 31,1% na caracterização final (Tabela 6).

4.6 TEORES DE N TOTAL E RELAÇÃO C/N DO SOLO – 2019

Na avaliação final, os teores de N total do solo não diferiram ($p > 0,05$) (Tabela 7). As relações C/N foram equiparados entre os sistemas, com valores aproximados de 10, o que é usual para Latossolos (SISTI *et al.*, 2004; DIEKOW *et al.*, 2005), e todas classificadas como baixas (< 30), segundo Silva e Mendonça (2007).

Para Neu (2005), a baixa relação C/N nos Latossolos indica intensa atividade biológica, com maior grau de humificação e estabilidade da MOS, logo, a ausência de diferenças significativas para a relação C/N do solo nos diferentes sistemas avaliados (Tabela 7) é coerente ao grau de humificação semelhante entre os sistemas, embora, dest (Tabela 6).

As relações C/N médias globais variam tipicamente de 10 a 30 entre os tipos de solo, sendo geralmente baixas para Chernossolos e altas para Argissolos (POST e MANN, 1990), e especialmente altas em Histossolos (Organossolos) e Podzóis (Espodossolos) ricos em CO (BATJES, 1996). No presente estudo, com exceção das pastagens perenes, a análise de N total foi realizada logo após a colheita da soja, espécie fixadora de N_2 atmosférico, e portanto, que possui resíduos relativamente ricos em N (baixa relação C/N) e que contribui pouco para o aporte de C ao solo, cerca de $3,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (VARVEL, 1994), o que, provavelmente contribuiu para manter as relações C/N do solo próximas ao limite médio global inferior (POST; MANN, 1990), visto que, segundo Silva e Mendonça (2007), o estreitamento da

relação C/N da MOS, com o avanço da humificação, ocorre devido a perdas de CO₂ e incorporação de N no solo.

Assim, os resultados deste estudo podem ser uma resposta aos efeitos da sazonalidade climática sobre as flutuações da biomassa microbiana (STIEVEN *et al.*, 2014) e mobilidade dos elementos no perfil do solo, pois além da qualidade do material vegetal predominante na estação em que foi realizada a avaliação, quando, após o aumento temporário da relação C/N do solo, devido ao aporte de C facilmente oxidável e pouco humificado (TELLES, 2003), proveniente da serapilheira e raízes das gramíneas (BRAZ *et al.*, 2013; SANT-ANNA *et al.*, 2016; GUPTA *et al.*, 2020), e a acelerada decomposição dos resíduos (Figuras 2 e 3), implicou em valores de relação C/N semelhantes entre os sistemas, mesmo com diferentes aportes de resíduos vegetais das gramíneas.

Tabela 7. ¹Teores de N total e relação C/N do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, na profundidade de 0 a 0,10 m. Caiuá – SP, 2019.

Tratamentos	COT	N-Total	Relação C/N
	-----g kg ⁻¹ -----		
S-MRUZ	9,09ab	0,86	10,7
S-MPIA	8,70ab	0,89	10,0
S-MPAI	9,28ab	0,90	10,7
S-MSPD	8,12b	0,80	10,3
S-MSPC	8,31b	0,84	9,7
S-PAIPERE	8,89ab	0,84	11,0
S-PIAPERE	10,25a	1,07	9,7
D.M.S.	1,7678	0,4432	4,6213
F	0,0217*	0,5043	0,9163
C.V.%	7	17	16

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. * Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene; S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após oito anos em experimento com rotações de culturas, Varvel (1994) observou que a aplicação de N ao solo gerou mudanças mínimas no N total, nos sistemas de monocultura de soja e de rotação com milho-soja. No presente estudo, embora cada SIPA tenha a sua complexidade em relação à lotação animal, produtividades das espécies cultivadas, entre outras, a resiliência do solo em manter a relação C/N equiparada em todos os sistemas reflete

o grande desafio em aumentar os estoques de C em solos arenosos tropicais altamente intemperizados, mesmo sob sistemas conservacionistas diversificados.

Estudos realizados por Freitas *et al.* (2020) e Souza e Melo (2000) apontaram que as espécies C4, para a produção de grãos e forragem em SIPAs, podem aumentar os estoques de C e N do solo ao longo do tempo. Estes últimos autores relataram que a conversão do SPC para SPD (milho-pousio) foi suficiente para elevar em mais de 80% o N potencialmente mineralizável do solo, correspondente ao “pool” mais lábil, como o presente na biomassa microbiana, porém, esta diferença reduziu para 48% quando se incluiu a soja no esquema de sucessão nos sistemas, provavelmente pela adição de N via fixação biológica, permitindo que o SPC de milho-soja acumulasse maior quantidade de N em relação ao monocultivo do milho no mesmo sistema. Estes resultados permitem inferir que o curto período de avaliação no presente estudo é insuficiente para detectar mudanças significativas que poderão ocorrer mais lentamente, ao longo dos anos, em solo altamente oxidativo (arenoso).

4.7 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO – 2017

No primeiro ano de avaliação, os atributos químicos do solo nas camadas de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m de profundidade não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$) e os teores médios na camada de 0 a 0,20 m foram classificados como médios para P, pH, K e V%, e altos para Ca, Mg e $S-SO_4^{2-}$ (RAIJ *et al.*, 1996). A ausência de alterações nos atributos químicos entre os tratamentos é uma resposta esperada, uma vez que os sistemas são recentes, até então (Tabela 8), e pelo recente histórico de produção de sementes forrageiras na área (alta inserção de palhada de parte aérea e resíduos radiculares, fonte de nutrientes). Muitos anos devem se passar para que um SIPA possa se estabilizar e aumentar suas taxas de matéria orgânica e nutrientes (STIEVEN *et al.*, 2014).

Solos de texturas arenosa a média, diferentes de solos argilosos, apresentam baixo poder tampão (SANTOS *et al.*, 2015), por isso as mudanças no uso e manejo desses solos podem implicar em alterações mais imediatas sobre seus atributos químicos, físicos ou biológicos. Entretanto, mesmo submetido a diferentes usos e manejos, a fertilidade do solo foi uma característica que se manteve inalterada nas camadas superficiais, o que demonstra a importância de estudos de médio e longo prazo, para fins de avaliação na dinâmica fertilidade do solo.

Vale ressaltar que a palhada é uma fonte lábil de nutrientes (ROSSI *et al.*, 2013; VENDRAMIN *et al.*, 2014; COSTA *et al.*, 2015; MENDONÇA *et al.*, 2015; MATTEI *et al.*, 2018; CAVALLI *et al.*, 2018). Porém, a dinâmica de decomposição da palhada aportada nos sistemas ainda deve estar favorecendo o processo de imobilização de nutrientes em função da sua alta relação C/N (GUPTA *et al.*, 2020). Logo, embora os sistemas ainda estejam em fase estabelecimento, nos tratamentos com SIPAs, espera-se uma maior concentração de nutrientes na forma orgânica, os quais poderão beneficiar a fertilidade do solo ao longo do tempo.

Ademais, deve-se considerar ainda que, as alterações na fertilidade do solo no espaço e no tempo, são governadas por diversos processos complexos que envolvem desde características mineralógicas do solo, até características das culturas implantadas e objetivo da exploração na área. Assim, deve-se considerar outros possíveis efeitos no sistema solo antes de considerar os efeitos nas suas propriedades químicas, visto que, a curto prazo, os benefícios ou prejuízos proporcionados pelo tipo de uso ou manejo podem não se expressarem (Tabela 8).

Na camada de 0,20 a 0,40 m de profundidade, detectou-se efeito dos sistemas sobre os teores de Ca, valores de SB e CTC, onde o cultivo consorciado de milho com capim BRS Paiaguás e soja em sucessão (S-MPAI) proporcionou incremento nos teores de Ca, em relação ao solo sob cultivo de milho consorciado com capim BRS Piatã e soja em sucessão (S-MPIA). O incremento de Ca no tratamento S-MPAI influenciou positivamente na sua SB em relação ao S-MPIA e na sua CTC em relação ao tratamento milho com capim Ruziziensis e soja em sucessão (S-MRUZ).

Tabela 8. ¹Atributos químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2017

Sistemas	P-resina	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	S-SO ₄ ²⁻	V
0 a 0,10 m											
	mg dm ³	CaCl ₂				mmolc dm ⁻³				mg dm ³	%
S-MRUZ	28,9	5,4	3,0	19,5	8,3	17,3	0,0	30,5	48,0	7,9 ²	62,9
S-MPIA	39,3	5,3	3,0	20,7	8,8	19,3	0,2	32,5	51,8	16,0	63,0
S-MPAI	31,0	5,7	3,0	25,0	11,5	15,5	0,0	39,5	55,1	11,0	72,0
S-MSPD	39,4	5,6	2,5	27,7	8,8	16,3	0,0	39,0	55,2	12,9	70,5
S-MSPC	35,8	5,6	2,9	25,4	8,5	16,6	0,0	36,9	52,8	11,4	70,0
S-PAIPERE	28,8	5,8	3,9	24,0	12,1	14,9	0,2	41,7	55,2	9,6	71,9
S-PIAPERE	31,0	5,9	2,5	28,4	13,0	14,9	0,0	44,1	59,7	14,3	75,2
D.M.S.	19,422	0,7634	1,583	6,931	6,480	5,043	0,458	17,955	13,0	1,730	19,383
F	0,3272	0,2502	0,1198	0,1060	0,1054	0,1099	0,5897	0,1674	0,1791	0,4106	0,3145
C.V.%	25	6	23	19	27	13	11	19	10	21	12
0,10 a 0,20 m											
S-MRUZ	31,3	5,2	2,4	19,4	7,1	18,8	0,5	28,9	47,8	8,9	60,6
S-MPIA	26,1	5,2	2,2	19,5	6,8	19,0	0,3	28,4	47,4	10,2	59,9
S-MPAI	27,8	5,7	2,4	27,8	11,5	15,9	0,0	42,6	58,4	8,5	72,5
S-MSPD	34,5	5,5	2,3	26,2	7,4	16,1	0,3	37,2	53,3	10,0	68,3
S-MSPC	31,1	5,7	2,4	26,5	8,8	16,1	0,3	38,1	53,7	9,5	69,8
S-PAIPERE	27,8	5,6	2,6	19,5	8,0	16,1	0,3	32,8	46,5	6,8	63,5
S-PIAPERE	26,1	5,7	1,2	24,6	9,8	16,1	0,3	37,4	73,3	11,5	67,0
D.M.S.	19,949	0,741	1,451	13,103	5,755	3,588	0,444	21,244	2,632	1,423	20,005
F	0,7590	0,1530	0,0880	0,1512	0,1382	0,2918	0,8718	0,9810	0,5323	0,7579	0,3376
C.V.%	29	6	28	24	29	14	17	25	15	19	13
0,20 a 0,40 m											
S-MRUZ	7,4	4,9	1,3	14,0ab	4,8	19,1	0,9	20,1ab	39,2b	12,9	51,9
S-MPIA	6,9	4,8	1,3	12,0b	5,1	22,5	2,1	18,4b	40,9ab	15,8	45,9
S-MPAI	8,0	5,4	1,5	19,0a	8,0	18,9	0,0	28,5a	47,3a	12,9	60,1
S-MSPD	10,3	5,2	1,6	15,4ab	5,8	18,9	1,1	22,7ab	41,6ab	15,8	54,1
S-MSPC	9,3	5,3	1,6	16,7ab	6,6	17,6	0,5	25,0ab	12,6ab	13,1	57,0
S-PAIPERE	9,3	5,2	1,4	14,4ab	6,8	18,4	1,1	22,7ab	41,1ab	7,0	54,0
S-PIAPERE	9,3	5,1	1,0	13,5ab	7,5	20,0	1,6	22,0ab	41,1ab	14,3	52,0
D.M.S.	5,928	0,676	0,827	6,262	3,650	6,860	0,941	9,299	7,737	1,321	16,568
F	0,4956	0,0967	0,1963	0,0345*	0,0692	0,3777	0,2745	0,0464*	0,0718*	0,0821	0,2074
C.V.%	29	6	25	18	24	15	29	17	8	15	13

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e * Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.8 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO – 2018

No ano de 2018, houve efeito significativo dos sistemas e modalidades de cultivos, sobre os atributos químicos do solo nas três camadas avaliadas (Tabela 9), e os teores médios na camada de 0 a 0,20 m foram classificados com baixo para $S-SO_4^{2-}$, médios para P, pH, K e V% e altos para Ca e Mg (RAIJ *et al.*, 1996). Observa-se que entre os atributos influenciados significativamente ($p < 0,05$), o pH diferiu significativamente apenas na camada de 0 a 0,10 m, com destaque para o sistema S-PIAPERE em relação aos sistemas S-MPIA, S-MSPC e S-PAIPERE, com diferenças que variaram de 0,9; 0,8 e 0,8 unidades, respectivamente, em relação ao S-PIAPERE.

A acidificação do solo ocorre naturalmente nos campos de produção, sobretudo, nos cultivos mais intensivos, como no SPC, SPD e nos SIPAs, devido à periodicidade das adubações das culturas da rotação. No presente estudo, o fertilizante nitrogenado utilizado para adubação de cobertura no milho foi o nitrato de amônio que tem alto efeito acidificante (OENEMA, 1990). Além disso, a acidificação do solo nos sistemas produtores de grãos pode ter sido gerada devido aos cultivos da soja e milho (ŠPOLJAR *et al.*, 2019), pela maior absorção de cátions sobre os ânions (HAYNES, 1983), e condições climáticas (BOLAN *et al.*, 2003), visto que o solo da área é arenoso, e com a menor cobertura permanente nos sistemas recentes, em relação à pastagem perene, pode ter sido acometido por maior lixiviação de bases.

Da mesma forma como ocorreu para o pH, os atributos Mg, SB e V% foram superiores no solo sob o sistema S-PIAPERE, sendo os teores de Mg superiores aos observados nos sistemas S-RUZ, S-MPIA, S-MSPD e S-MSPC; de SB superiores às observadas nos tratamentos S-RUZ, S-MPIA e S-MSPC; e de V% superiores aos observados nos tratamentos S-MPIA e S-MSPC (Tabela 8). Na camada de 0,10 a 0,20 m de profundidade, a dinâmica foi semelhante à da camada de 0 a 0,10 m, porém, a CTC foi influenciada, sendo superior no tratamento S-PIAPERE em relação aos tratamentos S-PAIPERE, S-MPIA e S-MRUZ.

Na camada de 0,20 a 0,40 m de profundidade, as alterações foram menos expressivas, como esperado para uma avaliação a curto prazo. Porém, mesmo em subsuperfície, o tratamento S-PIAPERE, que se destacou com os melhores resultados nas camadas mais superficiais, pois apresentou o teor de Mg superior aos observados nos tratamentos S-MRUZ

e S-MPIA, sendo que este último tratamento com os maiores valores de H^+Al e Al , refletindo diretamente na $V\%$, em relação ao S-PIAPERRE.

Tabela 9. ¹Atributos químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2018.

Sistemas (S)	P-resina	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	S-SO ₄ ²⁻	V
0 a 0,10 m											
	mg dm ³	CaCl ₂					mmol _c dm ⁻³			mg dm ³	%
S-MRUZ	33,3	5,4ab	3,0	18,8	9,1b	19,6	0,2	31,0b	50,7	3,1	61,5ab
S-MPIA	42,6	5,2b	2,8	18,7	8,4b	21,8	0,7	29,9b	51,8	2,8	57,4b
S-MPAI	40,0	5,9ab	2,9	25,1	12,8ab	17,3	0,0	40,6ab	58,3	2,6	69,5ab
S-MSPD	31,0	5,5ab	3,1	20,5	9,9b	19,5	0,0	33,5ab	53,0	2,8	63,5ab
S-MSPC	45,5	5,3b	3,3	16,8	9,3b	23,0	0,5	29,3b	52,3	2,6	57,0b
S-PAIPERE	23,5	5,3b	3,1	19,6	12,6ab	17,6	0,2	35,3ab	53,0	3,8	65,8ab
S-PIAPERE	30,5	6,1a	3,5	27,5	16,5a	15,6	0,2	47,9a	66,9	2,9	75,7a
D.M.S.	23,550	0,781	1,430	12,071	5,340	7,671	0,345	16,647	16,557	0,627	17,492
F	0,0708	0,0069**	0,6469	0,0880	0,0009**	0,0589	0,0524	0,0157*	0,0515	0,6895	0,0251*
C.V.%	28	6	20	24	20	17	13	20	13	14	12
0,10 a 0,20 m											
S-MRUZ	27,3	5,1	1,7	16,5	6,3b	21,7	1,0	24,4ab	46,2b	3,6	53,4
S-MPIA	30,1	5,2	1,9	15,1	5,6b	21,6	0,9	22,7b	44,3b	2,8	51,7
S-MPAI	31,0	5,8	1,9	22,7	10,0ab	17,3	0,0	34,6ab	51,8ab	2,8	66,2
S-MSPD	25,8	5,3	2,1	18,6	6,9ab	21,3	0,3	27,6ab	49,0ab	2,6	56,6
S-MSPC	31,8	5,3	1,8	19,1	8,4ab	21,0	1,0	29,3ab	50,3ab	3,0	58,3
S-PAIPERE	17,0	5,7	2,7	17,5	6,8ab	16,9	0,3	27,0ab	43,9b	4,4	60,7
S-PIAPERE	26,3	5,9	2,5	24,0	11,5a	18,3	0,0	38,0a	56,3a	3,0	67,5
D.M.S.	17,810	0,877	1,327	9,718	5,048	7,363	0,5637	13,621	9,313	2,109	12,899
F	0,1688	0,0544	0,1331	0,0685	0,0104*	0,1336	0,1234	0,0171*	0,0035*	0,1179	0,1170
C.V.%	28	7	27	22	27	16	20	20	8	28	14
0,20 a 0,40 m											
S-MRUZ	7,6	4,7	1,4	10,0	3,4b	24,0a	2,2a	14,8	38,8	4,6	38,7b
S-MPIA	6,4	4,8	1,4	11,5	3,9b	23,5ab	1,6ab	16,7	40,2	4,0	41,9ab
S-MPAI	5,6	5,4	1,6	16,1	7,6ab	19,2ab	0,4ab	26,6	45,8	3,1	57,0ab
S-MSPD	7,5	5,1	1,6	15,8	6,2ab	21,5ab	1,1ab	25,4	46,9	4,8	53,7ab
S-MSPC	8,8	5,1	1,5	14,0	6,2ab	21,0ab	1,1ab	21,7	42,8	4,3	50,9ab
S-PAIPERE	5,6	5,3	1,6	13,9	6,7ab	20,0ab	0,8ab	22,3	42,4	6,0	51,0ab
S-PIAPERE	5,9	5,5	1,4	16,0	9,2a	18,0b	0,0b	26,8	44,9	4,1	59,0a
D.M.S.	4,557	0,887	0,747	7,293	4,296	5,854	2,169	12,248	10,275	3,049	19,610
F	0,1971	0,0579	0,8881	0,0753	0,0038**	0,0314*	0,0379*	0,0525	0,1504	0,1485	0,0221*
C.V.%	28	7	21	22	29	12	23	24	10	29	17

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e * Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.9 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO – 2019

No último ano de avaliação, houve efeito significativo ($p < 0,05$) dos sistemas e modalidades de cultivos sobre os atributos químicos do solo, nas três camadas avaliadas (Tabela 10), e os teores médios na camada de 0 a 0,20 m foram classificados como baixo para $S-SO_4^{2-}$, médios para P, pH, K e Mg e alto para o Ca (RAIJ *et al.*, 1996). Vale destacar os efeitos positivos mais predominantes nos tratamentos S-MPAI e S-PIAPERRE, tanto na camada de 0 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 m de profundidade.

Na camada de 0 a 0,10 m é notório o efeito residual das adubações fosfatadas no solo sob os SIPAs e sob SPD (S-MPIA, S-MPAI e S-MSPD), em relação às pastagens perenes. O P tende a se acumular próximo à superfície do solo em diferentes “pools”, nas formas minerais e orgânicas, nos compartimentos lábeis e moderadamente lábeis. Esta dinâmica do P é fortemente favorecida em sistemas conservacionistas com o mínimo revolvimento do solo (PAVINATO *et al.*, 2017; RIGO *et al.*, 2019; DAMIAN *et al.*, 2020; GUERA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2021).

Ainda na camada de 0 a 0,10 m, os sistemas S-MPAI e S-PIAPERRE apresentaram teores superiores de Mg, o que influenciou significativamente na SB e CTC do solo, provavelmente, devido aos incrementos no COT observados nestes tratamentos (Tabela 6). Os efeitos mais significativos sobre a CTC, SB e teores de Mg no S-PIAPERRE pode ser devido à maior deposição de esterco ao solo (CARPINELLI *et al.*, 2020), gerado pela maior lotação animal neste tratamento, no mês de janeiro, a qual foi ajustada conforme Euclides *et al.* (2016). Esta diferença entre as taxas de lotação animal ocorreu cerca de 2 meses antes da coleta de solo, sendo cerca de 5,3 UA ha⁻¹ no S-PIAPERRE e apenas 3,8 UA ha⁻¹ no S-PAIPERE.

Cabe destacar que o pH na camada de 0 a 0,10 m, do sistema S-PIAPERRE, diferente do ano anterior, não foi superior aos demais sistemas, o que pode ser mais um efeito da maior lotação animal no último ano. Segundo Velthof *et al.* (2011), o esterco contém altas concentrações de amônio, que tem efeito acidificante por absorção ou nitrificação. Quando o N orgânico é mineralizado, consome-se H⁺, resultando em alcalinização do meio, porém, este efeito é compensado pela nitrificação que produz 2 H⁺, e este processo combinado leva à acidificação. Logo, o pastejo causa um padrão heterogêneo, com acidificação nas placas de urina (nitrificação) e alcalinização/acidificação nas placas de esterco (mineralização).

Embora tenha sido detectado efeito significativo para a CTC nos sistemas S-MPAI e PIAPERE, na camada de 0 a 0,10 m, é notável a tendência de manutenção dos valores, em curto espaço de tempo, em todos os sistemas conservacionistas avaliados em relação ao SPC. Tal resultado é possível porque, além de atuar como uma barreira física e reduzir a velocidade de infiltração da água no perfil do solo (ROSSI *et al.*, 2013), levando consigo as bases (lixiviação), a palhada incorpora matéria orgânica no solo (CECAGNO *et al.*, 2018), sendo responsável por grande parte da CTC em solos arenosos.

A manutenção e a expectativa do aumento na CTC no solo em todos os sistemas conservacionistas avaliados, aqui sustentada, se baseia nos resultados dos anos anteriores (Tabelas 8 e 9) e no fato de que o aumento no teor de MOS ocorre gradualmente, portanto, seus efeitos benéficos são notados ao longo dos anos (STIEVEN *et al.*, 2014; ROSA *et al.*, 2017). Estes resultados evidenciam na manutenção da fertilidade do solo nos sistemas ILP, num curto espaço de tempo. Assim, o aporte de palha em sistemas conservacionistas integrados se mostra uma importante estratégia para geração de cargas em solos arenosos de baixa CTC natural (DONAGEMMA *et al.*, 2016).

Na camada de 0,10 a 0,20 m, o tratamento S-MPAI apresentou os maiores teores de Mg e P e valores de SB, CTC. Ressalta-se que, assim como na camada de 0 a 0,10 m, os teores do P foram superiores nos sistemas produtores de grãos (SIPAs e monocultivos), em relação às pastagens perenes, indicando o efeito residual/cumulativo relatado para este nutriente (PAVINATO *et al.*, 2017; RIGO *et al.*, 2019; GUERA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2021), pode influenciar até a camada de 0,10 a 0,20 m. Nessa camada, vale destacar ainda, a predominância de efeitos positivos no sistema S-PIAPERE, que também se destacou apresentando os maiores valores para o pH, Ca, Mg, SB e V%, comparado ao S-MSPD, S-MSPC e S-MRUZ.

Na camada de 0,20 a 0,40 m, o teor de Al foi superior no S-MRUZ comparado ao S-MPAI, e ambos os tratamentos não diferiram dos demais. O contrário ocorreu para a saturação por bases (V%), onde o tratamento S-MPAI apresentou valores superiores aos obtidos no S-MRUZ, diferindo significativamente ($p < 0,05$). Esta relação inversa é esperada devido à capacidade do Al em ocupar as cargas no complexo sortivo do solo, diminuindo a possibilidade da CTC reter maiores quantidades das bases trocáveis que contribuem para a SB.

Tabela 10. ¹Atributos químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2019.

Sistemas (S)	P-resina	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	S-SO ₄ ²⁻	V
0 a 0,10 m											
	mg dm ³	CaCl ₂								mg dm ³	%
S-MRUZ	38,3ab	5,2	3,2	13,3	7,5bc	17,7	0,7	24,1b	41,8ab	1,6	57,7
S-MPIA	53,6a	5,2	3,8	12,8	7,2bc	18,5	0,8	23,8b	42,3ab	1,1	56,7
S-MPAI	53,2a	5,6	3,7	17,5	12,0ab	15,1	0,0	32,3ab	47,1a	2,0	68,5
S-MSPD	56,2a	5,2	2,9	13,5	6,7c	17,7	0,7	23,2b	40,9ab	1,6	57,0
S-MSPC	41,2ab	5,1	2,5	13,1	6,1c	17,1	1,1	21,8b	38,9b	1,6	56,2
S-PAIPERE	26,3b	5,2	3,1	13,8	8,1bc	16,0	0,3	24,9ab	40,9ab	1,5	59,6
S-PIAPERE	27,1b	5,6	2,8	18,7	13,5a	13,6	0,0	35,3a	48,9a	2,3	71,5
D.M.S.	24,473	0,647	1,364	6,398	5,001	5,295	1,713	10,550	8,153	1,734	16,686
F	0,0017**	0,0520	0,0574	0,0502	0,0006**	0,0778	0,2340	0,0028**	0,0069**	0,3946	0,0596
C.V.%	25	5	19	19	24	14	22	17	8	13	12
0,10 a 0,20 m											
S-MRUZ	38,6ab	5,1b	2,4	11,7b	2,4c	17,9	1,2	19,5b	37,4b	1,8	52b
S-MPIA	34,5abc	5,3ab	2,4	16,2ab	6,1bc	16,8	0,5	24,8ab	4,2ab	1,3	59,3ab
S-MPAI	48,7a	5,5ab	2,9	18,8ab	9,3a	16,0	0,0	21,1a	48,1a	2,7	67,3ab
S-MSPD	47,6a	5,1b	2,4	12,8b	5,5c	17,6	1,0	20,8b	38,9ab	1,5	54,2b
S-MSPC	39,9ab	5,0b	2,1	12,2b	5,7c	18,2	1,2	20,1b	38,3ab	1,6	53,0b
S-PAIPERE	18,0c	5,4ab	2,3	14,8ab	6,3abc	14,5	0,1	23,6ab	38,1ab	2,1	61,2ab
S-PIAPERE	24,0bc	5,8a	2,2	20,1a	8,7ab	13,2	0,0	31,6a	47ab	2,7	71,6a
D.M.S.	17,769	0,675	0,956	7,171	2,851	5,280	1,510	9,380	10,338	2,590	17,170
F	0,0001**	0,0084**	0,2138	0,0053**	0,0008**	0,0961	0,0583	0,0010**	0,0096**	0,4346	0,0096**
C.V.%	21	5	17	20	8	14	20	16	11	18	12
0,20 a 0,40 m											
S-MRUZ	11,6	4,8	1,4	9,9	3,4	18,1	2,1a	14,6	32,7	1,8	45,0b
S-MPIA	10,1	5,0	1,5	11,3	3,6	16,7	1,5ab	16,4	33,2	3,0	49,6ab
S-MPAI	13,1	5,5	1,6	13,3	5,8	14,0	0,0b	20,8	34,8	2,3	59,6a
S-MSPD	11,0	5,1	1,6	11,3	4,2	15,7	0,8ab	17,2	33,0	1,8	51,9ab
S-MSPC	11,3	5,0	1,7	11,8	4,7	16,5	1,0ab	18,3	34,8	3,1	52,5ab
S-PAIPERE	6,8	5,3	1,5	11,7	5,3	15,5	0,3ab	18,6	34,1	3,0	53,6ab
S-PIAPERE	7,1	5,3	1,8	12,5	6,3	16,2	0,7ab	20,7	36,9	4,1	55,7ab
D.M.S.	8,696	0,705	0,660	4,165	3,423	5,209	2,013	7,549	9,041	2,701	13,001
F	0,1113	0,0625	0,2445	0,2431	0,0950	0,3120	0,0493**	0,1272	0,7420	0,0946	0,0449*
C.V.%	17	6	18	15	13	14	22	18	11	15	11

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e * Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.10 MICRONUTRIENTES NO SOLO – 2017, 2018 E 2019

A dinâmica para os micronutrientes do solo, sob os diferentes sistemas, foi pouco alterada no curto prazo. Tais alterações ocorreram apenas no segundo ano (2018) para o B e no terceiro ano para o Fe, nas profundidades de 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, respectivamente (Tabela 11).

No ano 2018, os tratamentos S-MRUZ e S-MPIA apresentaram os maiores teores de B na profundidade de 0,20 a 0,40 m, em relação aos demais sistemas, porém, com diferença significativa apenas quando comparado ao solo sob pastagem perene de BRS Piatã (S-PIAPERRE).

No ano 2019, destacou-se o tratamento S-MRUZ, que apresentou os maiores teores de Fe nas camadas subsuperficiais. Na profundidade de 0,10 a 0,20 m, o teor de Fe foi significativamente superior ao observado no tratamento S-PIAPERRE, enquanto que os demais tratamentos foram semelhantes quanto aos teores do micronutriente.

O teor de Fe também diferiu significativamente na profundidade de 0,20 a 0,40 m, onde o tratamento S-MRUZ destacou-se mais uma vez, apresentando-se superior aos observados nos tratamentos S-MPAI e S-PAIPERE, porém, não diferindo dos demais tratamentos. Observa-se os menores teores de Fe nos tratamentos que apresentaram os maiores valores de pH, nas duas profundidades, pois o Fe é um micronutriente metálico, o qual tem sua disponibilidade diminuída às plantas à medida em que o pH do solo se eleva (RAIJ *et al.*, 2011; FREITAS *et al.*, 2014).

Com exceção dos dois tratamentos com pastagens perenes, todos outros apresentaram teores de Fe disponível considerados altos, segundo Raij *et al.* (1996). Entre os micronutrientes, o Fe é o que ocorre em maiores quantidades no solo e, devido às condições edáficas predominantes no Cerrado, solos naturalmente ácidos, a sua deficiência tem sido raramente relatada. Por outro lado, em solos ácidos, a concentração do Fe^{2+} na solução pode ser fitotóxico (JUGSUJINDA; PATRICK, 1993).

Não obstante, levando em consideração a exigência nutricional das culturas em relação ao Fe, este maior valor apresentado nos tratamentos S-PIAPERRE (0,10 a 0,20 m de profundidade), nos sistemas S-MPAI e S-PAIPERE (0,20 a 0,40 m de profundidade) são interessantes pois os mantêm dentro da faixa adequada para as culturas (RAIJ *et al.*, 1996).

Em 2018, os tratamentos S-MRUZ e S-MPIA apresentaram os maiores teores de B em relação aos obtidos no S-PIAPERRE, na profundidade de 0,20 a 0,40 m, não diferindo dos

demais tratamentos. É importante ressaltar, contudo, que mesmo ocorrendo os maiores teores de B nestes dois tratamentos (S-MPAI e S-MRUZ), estes se encontram no limite entre as classes baixa e média (RAIJ *et al.*, 1996). Este resultado pode ser justificado pelos baixos teores de matéria orgânica do solo estudado, os quais espera-se elevar ao longo dos anos de estabelecimento dos sistemas integrados (STIEVEN *et al.*, 2014; ROSA *et al.*, 2017).

Tabela 11. ¹Micronutrientes do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivo, nas profundidades de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. Caiuá – SP, 2017, 2018 e 2019.

2018 a 2019															
Sistemas	B	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	2017					2018					2019				
	mg dm ⁻³														
	0 a 0,10 m														
S-MRUZ	0,18	0,58	7,75	6,83	0,93	0,20	0,65	19,75	8,25	1,12	0,18	0,53	15,13	7,13	1,02
S-MPIA	0,15	0,58	9,00	9,90	0,75	0,20	0,63	21,50	7,65	0,93	0,20	0,58	17,37	8,18	0,95
S-MPAI	0,18	0,58	6,50	9,10	1,10	0,18	0,48	14,13	8,10	1,17	0,18	0,55	14,50	6,93	1,15
S-MSPD	0,18	0,60	6,00	10,20	0,90	0,20	0,50	14,75	8,20	0,83	0,13	0,48	14,88	9,08	1,25
S-MSPC	0,15	0,60	6,12	10,17	0,97	0,20	0,63	18,37	12,27	1,00	0,13	0,55	14,50	9,17	1,12
S-PAIPERE	0,15	0,53	5,75	8,35	1,25	0,15	0,58	21,12	11,52	0,83	0,15	0,48	17,00	10,35	0,95
S-PIAPERE	0,18	0,58	5,87	9,00	1,27	0,15	0,58	18,00	10,63	1,00	0,20	0,50	13,88	9,35	0,95
D.M.S.	0,095	0,198	4,479	4,237	0,773	0,074	0,250	16,038	5,748	0,556	0,085	0,182	9,066	3,455	0,695
F	0,8503	0,5825	0,2032	0,1610	0,2837	0,0819	0,2260	0,4745	0,0708	0,3050	0,0527	0,4401	0,8183	0,0594	0,7637
C.V.%	25	14	28	20	16	17	19	17	26	24	22	15	25	17	28
	10 a 20 cm														
S-MRUZ	0,17	0,62	9,62	8,00	0,97	0,20	0,65	20,62	5,90	0,98	0,14	0,55	19,25a	6,85	1,00
S-MPIA	0,17	0,72	8,87	10,4	0,75	0,20	0,60	18,25	6,82	0,78	0,16	0,52	14,12ab	6,70	0,85
S-MPAI	0,17	0,55	7,12	9,53	1,17	0,15	0,48	13,87	8,70	1,05	0,18	0,45	14,37ab	8,20	1,32
S-MSPD	0,17	0,58	6,13	10,32	0,92	0,20	0,57	14,50	8,77	1,03	0,15	0,47	15,75ab	8,80	1,27
S-MSPC	0,17	0,60	5,88	10,25	0,95	0,17	0,60	18,25	10,57	1,25	0,14	0,50	14,37ab	6,82	1,25
S-PAIPERE	0,13	0,58	6,63	8,33	0,90	0,13	0,47	13,87	8,70	1,05	0,18	0,42	11,00ab	6,80	0,97
S-PIAPERE	0,17	0,68	7,50	9,85	1,22	0,13	0,60	14,87	7,62	1,03	0,16	0,45	9,50b	7,32	1,25
D.M.S.	0,083	0,223	4,678	4,549	0,616	0,078	0,224	11,228	6,085	0,658	0,059	0,161	8,535	2,996	0,7763
F	0,3872	0,1745	0,0545	0,4314	0,2198	0,0574	0,1246	0,2363	0,2527	0,4658	0,1509	0,1784	0,0324*	0,0933	0,3273
C.V.%	21	15	26	20	27	20	17	29	14	27	18	14	26	17	29
	20 a 40 cm														
S-MRUZ	0,17	0,77	7,37	3,75	0,40	0,20a	0,70	16,37	4,00	0,35	0,10	0,60	11,20a	2,61	0,35
S-MPIA	0,17	0,87	7,25	6,90	0,45	0,20a	0,72	12,62	3,60	0,27	0,15	0,62	9,25ab	3,01	0,23
S-MPAI	0,17	0,70	6,00	6,32	0,52	0,13ab	0,65	11,62	4,87	0,45	0,12	0,48	7,63b	3,85	0,40
S-MSPD	0,15	0,72	5,63	6,65	0,55	0,18ab	0,68	11,12	4,85	0,47	0,12	0,55	8,38ab	3,66	0,35
S-MSPC	0,15	0,70	5,25	6,45	0,57	0,17ab	0,70	10,37	3,77	0,32	0,12	0,52	8,75ab	3,21	0,40
S-PAIPERE	0,13	0,70	6,75	7,35	0,67	0,13ab	0,70	11,12	2,85	0,25	0,12	0,57	8,25b	2,91	0,35
S-PIAPERE	0,15	0,85	6,25	4,75	0,50	0,10b	0,70	10,00	3,20	0,30	0,12	0,62	8,75ab	3,46	0,27
D.M.S.	0,0721	0,300	2,708	4,872	0,652	0,091	0,215	7,557	2,483	0,375	0,115	0,273	3,210	1,694	0,289
F	0,2341	0,2846	0,1304	0,1214	0,8825	0,0076**	0,9450	0,1621	0,1038	0,3712	0,9041	0,5189	0,0236*	0,2457	0,3826
C.V.%	20	17	18	13	9	25	13	27	27	24	18	21	15	22	18

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e * Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação. Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.11 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO MILHO E DA SOJA – 2016/17, 2017/18, 2018/19

As produtividades médias de grãos (PG) do milho e da soja em todos os anos (Tabela 12) foram 27% e 18% a menos que as médias nacionais na safra 2019/20, que são 5455 e 3379 kg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2021). Não houve efeito significativo em função dos tratamentos até o ano agrícola 2017/18 ($p>0,05$) (Tabela 12), demonstrando que o curto período de condução dos sistemas de produção e modalidades de cultivo não foi suficiente para promover grandes mudanças sobre o ambiente de produção para essas culturas, visto que grandes mudanças no ambiente produtivo requerem tempo mais prolongado em sistemas conservacionistas (STIEVEN *et al.*, 2014; ROSA *et al.*, 2017).

Em condições diversas, muitos estudos têm demonstrado que o cultivo consorciado de milho com gramíneas forrageiras não tem efeito negativo sobre a produtividade de grãos do milho (GARCIA *et al.*, 2012; ALVES *et al.*, 2013; CRUSCIOL *et al.*, 2013; MARTINS *et al.*, 2019; MODESTO *et al.*, 2021). A maioria destes estudos, entretanto, abordam solos argilosos e as condições climáticas favoráveis da primeira safra (verão). No presente estudo, o desafio foi cultivar milho consorciado com forrageiras na segunda safra (outono/inverno), em solo arenoso.

Embora sem diferenças estatísticas no primeiro e segundo anos, a inadequada distribuição das precipitações em 2016 (336 mm) resultou em reduções de 23, 13 e 5% nas PGs do milho nos sistemas S-MRUZ, S-MPIA, S-MPAI, respectivamente, em relação à média obtida nos monocultivos (S-MSPD e S-MSPC), o que foi efeito da competição entre as culturas no consórcio (DUARTE *et al.*, 2013; PASCOALOTO *et al.*, 2017). Reduções de 13 e 23% na PG requerem atenção, pois podem reduzir o lucro da atividade, visto que a PG do milho representa um bônus nos sistemas consorciados para a recuperação de pastagens, gerando maior rentabilidade e amortizando os custos de produção do sistema (MODESTO *et al.*, 2019).

Por outro lado, a regularidade da distribuição hídrica durante o ciclo do milho em 2017 (Figura 2), proporcionou variação das PGs próximo a 0 % entre os sistemas S-MPIA, S-MPAI e S-MRUZ, com diferenças de 0, -2 e -1%, respectivamente, em relação à média obtida nos monocultivos. Este resultado pode ser devido, ainda, à baixa densidade das forrageiras, que foi de 8, 7 e 9 plantas por m² para *U. ruziziensis* e *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás e cv. BRS Piatã, respectivamente. Esta menor densidade foi devido à falta de chuvas logo após a semeadura, e resultou na baixa produtividade de matéria seca da parte aérea pelas forrageiras

(Tabela 13). Assim, estes resultados sugerem que a maior retenção de umidade do solo, decorrente do acúmulo e manutenção da palhada nos SIPAs (BONETTI *et al.*, 2017), ao longo do tempo, pode reduzir possíveis competições entre as culturas consorciadas, geradas devido às limitações do regime hídrico local.

Outro ponto importante a ser considerado para o estabelecimento adequado da cultura do milho nos SIPAs, é o arranjo espacial e o tipo de semeadura, que devem ser definidos conforme o objetivo do sistema (BORGHI *et al.*, 2012). No presente estudo, o objetivo foi produzir grãos, logo, o milho foi semeado com espaçamento de 0,90 m e as forrageiras semeadas nas entrelinhas, como medidas para amortizar os efeitos de previsíveis veranicos. Maiores densidades são recomendadas apenas quando não há restrição hídrica (FREITAS *et al.*, 2013).

O milho da safra 2018 foi o mais prejudicado pela falta de água em relação aos anteriores, com uma precipitação em torno de 159 mm durante o desenvolvimento da cultura (Figura 2). A PG do milho consorciado pode ser reduzida por efeito de competição com a forrageira em condições limitantes de água, luz e nutrientes (DUARTE *et al.*, 2013). O milho consorciado com a *U. ruziziensis* apresentou a menor PG, comparado ao monocultivo em SPD (S-MSPD). Os cultivares BRS Paiaguás e BRS Piatã possuem colmos finos que acamam com facilidade, e plantas com esta característica são menos competitivas no consórcio com grâníferas, diferentemente do observado com *U. ruziziensis*, que apresenta colmos mais grossos e longos (MACHADO *et al.*, 2017).

Um dos grandes desafios para a produção de culturas grâníferas na região em estudo é o déficit hídrico associado às elevadas temperaturas, sobretudo no mês de janeiro quando, geralmente, a soja está iniciando a fase de enchimento de grãos, como relatado por Franchini *et al.* (2016). Segundo estes autores, certamente essa restrição climática é o principal limitador de altas produtividades com estabilidade, mesmo utilizando todas as tecnologias relacionadas ao SPD e aos SIPAs na região.

Em contrapartida, este resultado atesta a capacidade que solos arenosos, tidos como sensíveis (DONAGEMMA *et al.*, 2016), podem suportar cultivos intensivos durante todo o ano, sem, contudo, gerar perdas de produtividade do milho consorciado com as forrageiras e da soja cultivada em sucessão. Estes resultados indicam que o cultivo da soja em solos arenosos apresenta potencial produtivo equivalente ao dos solos argilosos, em condições climáticas favoráveis, desde que adotado manejo adequado (SANTOS *et al.*, 2008).

Houve grandes variações nas produtividades das culturas ao longo dos anos agrícolas (Tabela 12). Tais variações são resultantes das peculiaridades climáticas de cada ano (Figuras 1). Os maiores volumes e melhores distribuições hídricas nos ciclos do milho e da soja 2016/17 e 2017/18, proporcionaram o mesmo padrão de produção entre os tratamentos, dentro de cada ano, sobretudo porque os sistemas ainda estão em fase de estabelecimento, logo, os atributos responsáveis por conferir resiliência ao solo em situações extremas, e que podem beneficiar as plantas cultivadas (MENDES *et al.*, 2018a), ainda estão em processo de estabelecimento.

Tabela 12. Produtividade de grãos (PG) de milho consorciado com forrageiras do gênero *Urochloa* e produtividade de grãos de soja cultivada em sucessão aos consórcios, em sistemas integrados de produção agropecuária. Caiuá-SP, 2016/17, 2017/18 e 2018/19.

Sistemas	PG Milho	PG Soja	Teor de Clorofila nas folhas a Soja
	<u>Ano 2016</u>	<u>Ano 2016/17</u>	-
S-MRUZ	3644	3312	-
S-MPIA	4110	3131	-
S-MPAI	4496	3386	-
S-MSPD	4471	3142	-
S-MSPC	5026	3026	-
D.M.S.	1455	529	-
F	0,0961	0,2481	-
C.V.%	15	7	-
	<u>Ano 2017</u>	<u>Ano 2017/18</u>	-
S-MRUZ	5719	2911	-
S-MPIA	5643	2705	-
S-MPAI	5699	2873	-
S-MSPD	5720	2911	-
S-MSPC	5759	2816	-
D.M.S.	1197	467	-
F	0,9985	0,6072	-
C.V.%	9	7	-
	<u>Ano 2018</u>	<u>Ano 2018/19</u>	<u>Ano 2019</u>
S-MRUZ	1465b	2441a	39,6
S-MPIA	2062ab	2417a	39,0
S-MPAI	1796ab	2426a	41,5
S-MSPD	2182a	2127ab	41,5
S-MSPC	1773ab	1828b	37,7
D.M.S.	609	362	5,2711
F	0,0223**	0,0005**	0,1645
C.V.%	15	7	6

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e

* Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No entanto, o rigoroso veranico ocorrido no estágio fenológico mais crítico (enchimento de grãos) para a soja, em 2017/18, prejudicou o desempenho da cultura, independente do sistema e modalidade de cultivo adotado. Além disso, a limitação hídrica na fase de estabelecimento das forrageiras consorciadas com o milho, no ciclo anterior à semeadura da soja do ano agrícola 2017/18 (Figura 2), acarretou em pouco aporte de palhada para a cobertura e retenção de água no solo (Tabela 13 e Tabela 15) contribuindo para a produtividade relativamente baixa ou baixa/média da cultura em todas os tratamentos, uma vez que o déficit hídrico é um dos principais fatores limitantes para a produtividade da leguminosa (GALÃO *et al.*, 2014).

No terceiro ano agrícola (2018/19) houve efeito significativo dos sistemas sobre a PG, tanto do milho como da soja e, embora tenha ocorrido um gradiente no teor de clorofila das folhas da soja no sentido S-MSPC < SPD e SIPAs, não foi detectado efeito significativo ($p < 0,05$) (Tabela 12). As respostas do milho e da soja aos tratamentos no último ano foi oportuna devido às condições climáticas adversas deste ano agrícola, que permitiram a manifestação da resiliência do solo frente à condição de estresse para a cultura (MENDES *et al.*, 2018a).

Os resultados do presente estudo, neste último ano de avaliação, corroboram com os relatos na literatura sobre a responsividade da soja em curto espaço de tempo, em solos arenosos. Santos *et al.* (2008) estudaram o cultivo da soja em solos de cerrado com diferentes texturas e observaram que, em uma década, a produtividade média de cultura elevou-se de 3,1 e 2,6 t ha⁻¹ para os patamares de 3,5 e 3,3 t ha⁻¹ nos solos argilosos e de textura arenosa média, respectivamente. Estes números evidenciam a alta responsividade da cultura às técnicas empregadas no processo produtivo em solos arenosos, desde que haja maior aporte de palha no sistema.

4.12 PRODUTIVIDADE DAS FORRAGEIRAS CONSORCIADAS COM O MILHO – 2017 E 2018

No primeiro ano de avaliação da degradação da palha (2017/18) houve baixa produtividade de matéria seca da parte aérea das forrageiras (PMSF) (Tabela 13) em função do baixo estabelecimento das plantas no campo, devido às condições climáticas. Neste ano, aproveitou-se a umidade do solo após a colheita da soja (2016/17), e semeou-se os consórcios, entretanto, após a semeadura estendeu-se um período de estiagem que inviabilizou a adequada

emergência das forrageiras, resultando num baixo estande de plantas nas áreas, em torno de 8, 7 e 9 plantas por m² para *U. ruziziensis*, *U. brizantha* cv. BRS Paiguás e *U. brizantha* cv. BRS Piatã, respectivamente.

Neste primeiro ano, a produtividade de massa seca da parte aérea das forrageiras cultivadas em consórcio com o milho não diferiu entre as cultivares ($p>0,05$). As quantidades e a dinâmica de decomposição da palhada das forrageiras foi similar, e os dados se ajustaram num modelo linear.

Tabela 13. Produtividade de matéria seca da parte aérea de forrageiras (PMSF) do gênero *Urochloa* consorciadas com a cultura do milho e degradação de matéria seca remanescente de braquiárias em sistemas integrados de produção agropecuária. Caiuá-SP, 2017/18 e 2018/19.

Fatores	2017/18	2018/19 ²
<u>Sistemas (S)</u>	----- kg ha ⁻¹ -----	
S-MRUZ	901	-
S-MPIA	1013	-
S-MPAI	1092	-
D.M.S.	410	-
<u>Dias (D)</u>		
0	1629	-
30	1253	-
60	1028	-
90	894	-
120	692	-
150	518	-
Equação	L ¹	-
R ² (%)	97**	-
	F	
Bloco	0,2373	0,2163
S	0,2579	0,0374*
D	0,0001	0,0001**
S x D	0,7936	0,0429*
C.V. (%) - S	29	30
C.V. (%) - D	12	10

¹Modelo ajustado para os dados de degradação de palha em 2017: $y = -7,021^{**}x + 1528,9^{**}$; ²Interação significativa entre sistema e épocas de avaliação. ** e * Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiguás. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No primeiro mês após o manejo, os resíduos das forrageiras apresentaram maior velocidade de decomposição, o que é normal devido à composição da matéria seca inicial possuir compostos mais lábeis e fácil degradação pela biota do solo. A oferta de C fresco proveniente dos resíduos vegetais e rizodeposições, como exsudatos, mucilagens e secreções (KUZUYAKOV, 2002), favorece o predomínio inicial de microrganismos, comumente classificados como r-estrategistas (PAUL; CLARK, 1989), os quais apresentam um rápido

desenvolvimento e utilizam rapidamente as formas mais facilmente oxidáveis de C, sendo as fases de decomposição seguintes menos aceleradas (Tabela 13).

Ao final dos 30 DAM, houve decomposição de aproximadamente 23% da palhada, em relação à quantidade inicial aportada sobre o solo. Com o avanço da mineralização, no final do segundo mês de avaliação (60 dias), quando as plantas de soja em sucessão se encontravam no estágio de enchimento de grãos, permaneceram sobre o solo aproximadamente 63% do conteúdo inicial. A baixa PMSF para cobertura do solo, portanto, não foi suficiente para manter a umidade do solo durante o veranico que ocorreu neste período (Figura 2). Até a data de colheita da soja (26/02/2018), a palhada das forrageiras remanescente sobre o solo equivalia a cerca de 55% da quantidade inicial, e no final do período de avaliação, 150 DAM, a palhada remanescente equivalia a cerca de 32% da quantidade inicial.

Em 2018/19 houve interação significativa entre os fatores sistemas e épocas de avaliação (Dias). A quantidade de palhada produzida pelas cultivares BRS Piatã e BRS Paiaguás foram superiores à produzida pela *U. ruziziensis* ($p < 0,05$), em cerca de 24 e 29% a mais, respectivamente (Tabela 14).

As diferenças nas quantidades de palhada se mantiveram até o segundo mês (60 dias), e ao final dos 90 DAM permaneciam cerca de 54, 59 e 59 % da quantidade inicial da *Ruziziensis*, BRS Piatã e BRS Paiaguás, respectivamente. O processo de decomposição igualou as quantidades de palhada da *Ruziziensis* e da BRS Piatã, esta última, porém, continuou similar à BRS Paiaguás. Esta dinâmica da decomposição se manteve até o quarto mês de avaliação (120 DAM).

Na fase final de avaliação da degradação, aos 150 DAM, não houveram diferenças significativas entre as quantidades de palhada remanescente para cada capim, permanecendo sobre o solo apenas 30, 29 e 30% para *Ruziziensis*, BRS Piatã e BRS Paiaguás, respectivamente, em relação à quantidade inicial. Estes valores então dentro dos limites observados por Costa *et al.* (2014a), que demonstraram o alto potencial de utilização *U. brizantha* e *U. ruziziensis* em SIPAs, tanto na produtividade de forragem no outono, quanto na produção de palhada, acima de 4.000 kg ha⁻¹ na entressafra, com persistência de 15 a 60% aos 120 DAM, em Latossolo Vermelho distroférico sob SPD, no estado São Paulo, BR.

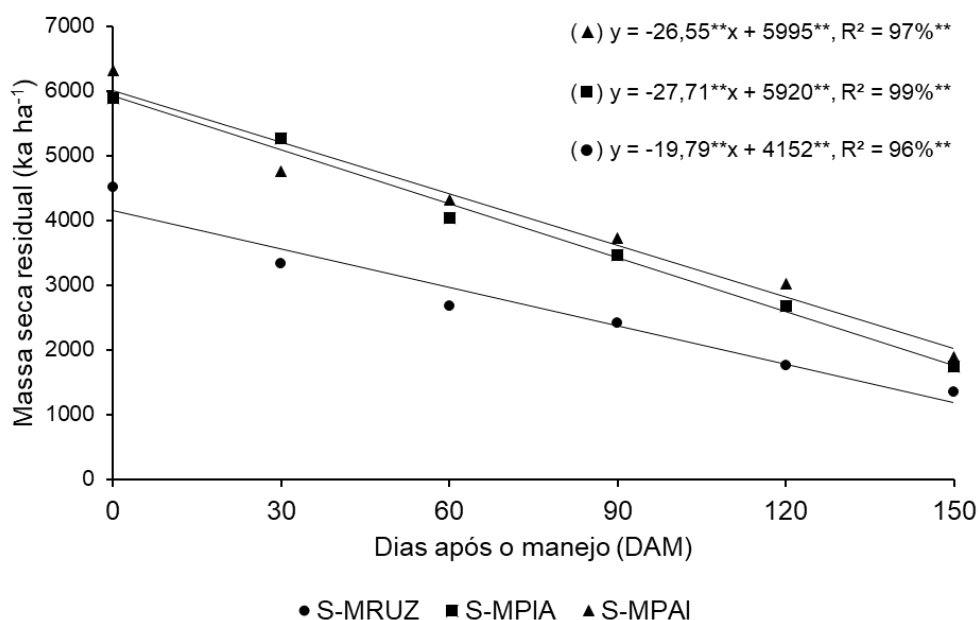
Tabela 14. ¹Desdobramento da interação entre modalidades de cultivo e épocas de avaliação para a matéria seca remanescente da parte aérea de forrageiras consorciadas com milho em sistemas integrados de produção agropecuária (kg ha⁻¹) Caiuá - SP, 2018/19.

Sistemas	Dias após o manejo (DAM)					
	0	30	60	90	120	150
S-MRUZ	4502b	3327b	2672b	2414b	1750b	1344a
S-MPIA	5886a	5261a	4033a	3461ab	2672ab	1733a
S-MPAI	6309a	4756a	4317a	3728a	3017a	1894a

Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 5. Degradação de matéria seca remanescente de braquiárias em sistemas integrados de produção agropecuária. Caiuá – SP, 2018/19.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os dados referentes à degradação da palhada de cada forrageira apresentaram ajustes lineares (Figura 5). Até os 60 DAM foi constatada a persistência de 59, 69 e 68% dos resíduos da Ruziziensis, BRS Piatã e BRS Paiaguás, respectivamente. A menor velocidade inicial na decomposição das *U. brizantha*, em relação à Ruziziensis, pode estar associada à melhor qualidade química desta última cultivar (PARIZ *et al.*, 2010) e ao menor volume pluvial precipitado no ciclo 2018/19 (Figura 2). A decomposição é um processo essencialmente biológico envolvendo macro, meso e microrganismos, estes são influenciados diretamente por fatores abióticos (climáticos) (AMADO, 2000), os quais podem ter limitado a atividade biótica sobre os resíduos mais resistentes (*U. brizantha*).

Como visto, a baixa disponibilidade hídrica no período de emergência das plântulas em 2017 prejudicou a PMSF, entretanto, o aporte adicional dos resíduos das forrageiras, além dos resíduos do milho e da soja ao longo do tempo é de grande importância para a proteção do solo e manutenção do estoque C, sobretudo em condições tropicais. Sob clima subtropical úmido, Ferreira *et al.* (2012) estimaram 6,8 Mg ha⁻¹ como quantidade mínima de resíduos para manter o estoque de C de um Latossolo Vermelho, textura média (23% de argila). No presente estudo, as condições climáticas locais, a textura do solo e as características específicas dos sistemas estudados sugerem, portanto, que apenas o porte de resíduos de soja e milho não são suficientes para a manutenção do C do solo, sendo necessário a inclusão de espécies forrageiras do gênero *Urochloa* para incrementar ou manter o equilíbrio e entradas e saídas de C.

4.13 TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO – 2017/18 E 2018/19

No ano agrícola 2017/18 houve interação significativa para a temperatura do solo, entre sistemas e épocas de avaliação ($p < 0,05$). O solo sob o sistema S-MSPC apresentou as maiores temperaturas nos meses de novembro e dezembro, o que era esperado (Tabelas 15 e 16). Segundo Moitinho *et al.* (2021), dependendo da quantidade e distribuição da cobertura vegetal, a temperatura da superfície do solo pode reduzir em até 4 °C, no presente estudo, esta diferença média foi de 12,8 e 13,9 °C (novembro e dezembro, respectivamente) a mais no S-MSPC em relação aos demais tratamentos. Foi notório a maior amplitude térmica no solo sob S-MSPC (Tabela 16).

Em 2018/19, houve apenas efeito isolado dos sistemas e épocas de avaliação sobre a temperatura do solo ($p < 0,05$). Neste ano, os efeitos dos sistemas se mostraram bem definidos, de modo que o sistema S-MSPC apresentou a maior temperatura média do solo em relação aos demais sistemas. A maior temperatura na superfície do solo no sistema S-MSPC, em curto período, pode representar uma condição inicial para a decadência do sistema, haja vista que a alta temperatura acelera a decomposição da MOS e a atividade microbiana (SILVA-OLAYA *et al.*, 2013), o que influencia diretamente no fluxo de CO₂ (ACRECHE *et al.*, 2014; KARHU *et al.*, 2014; MOITINHO *et al.*, 2021). Estes resultados corroboram com os dados obtidos para o estoque de carbono no solo, visto que o S-MSPC apresentou o menor valor do EstCMas na profundidade de 0 a 0,20 m (Figura 3).

Para a umidade do solo, em 2017/18 a interação não foi significativa (Tabela 15), provavelmente pela pouca persistência da palhada remanescente sobre o solo, devido ao ambiente quente acelerar a decomposição do material orgânico (FRANCHINI *et al.*, 2016). Houve, contudo, efeito isolado da época de avaliação sobre os teores de umidade do solo, de modo que os meses de janeiro e fevereiro se destacaram, coincidindo com a época mais crítica para a cultura da soja, o estágio de enchimento dos grãos (LI *et al.*, 2020).

Os teores de umidade do solo apresentados na Tabela 15 refletem os dados de precipitação apresentados na Figura 2. As diferenças nessa variável em 2017/18, em função da sazonalidade ambiental, embora pareçam mínimas, representam a condição de cada sistema num determinado momento da avaliação, e demonstra como todos os sistemas foram influenciados igualmente por serem recentes.

Tabela 15. Teores de temperatura e umidade do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidades de cultivos. Caiuá-SP, 2017/18 e 2018/19.

Fatores	2017/18		2018/19	
Sistemas (E)	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Temperatura (°C)	Umidade (%)
S-MRUZ	34,1	6,5	32,4b	6,4
S-MPIA	32,6	6,7	32,2b	6,6
S-MPAI	32,5	7,0	31,9b	7,3
S-MSPD	35,3	6,2	33,6b	6,7
S-MSPC	41,2	5,6	39,9a	5,7
S-PAIPERE	32,0	6,7	31,2b	6,6
S-PIAPERE	31,6	6,8	31,1b	6,9
D.M.S.	3,66	1,52	3,00	2,14
Época (É)				
Novembro	36,4	5,7c	37,5a	5,8
Dezembro	36,7	3,6d	36,3a	3,3
Janeiro	34,2	8,8ab	32,8b	9,8
Fevereiro	34,7	9,3a	33,3b	9,1
Março	32,6	3,5d	30,4c	3,3
Abril	30,4	8,0b	28,9c	8,3
D.M.S.	2,01	0,91	2,29	1,07
	F			
Bloco	0,0004**	0,0001**	0,0001**	0,0002**
S	0,0000**	0,1075	0,0000**	0,3531
É	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0000**
S x É	0,0395*	0,5214	0,0860	0,0118*
C.V.% (S)	9	20	8	27
C.V.% (D)	7	16	8	18

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** e * Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Em 2018/19 houve efeito significativo da interação entre sistemas e épocas de avaliação, para a umidade do solo (Tabelas 15 e 16). Neste ano, todos os sistemas apresentaram maior umidade do solo em janeiro, além disso, os sistemas S-MRUZ, S-MPIA, S-MPAI e S-MSPC apresentaram maior teor de umidade em fevereiro, e os dois últimos sistemas também se destacaram em abril. Diferente dos demais sistemas, as pastagens perenes apresentaram os maiores teores de umidade apenas no terceiro e sexto mês. Apenas em fevereiro a umidade do solo diferiu entre os sistemas ($p < 0,05$), de modo que o tratamento S-MPAI se destacou, diferindo significativamente do S-PAIPERE.

Em sistemas onde há a presença do animal, o pastejo intensivo e mal manejado, pode reduzir a biomassa vegetal, diminuindo a proteção e interferindo na umidade e temperatura do solo (BONETTI *et al.*, 2017). No presente estudo, contudo, o criterioso manejo animal nos sistemas com pastejo não interferiu nestas variáveis em relação às observadas no SPD e nos SIPAs (Tabelas 15 e 16).

Tabela 16. Desdobramento das interações entre sistemas e época de avaliações para a temperatura (°C) (2017/18) e umidade do solo (%) (2018/19) em diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivo. Caiuá-SP.

Sistemas	Épocas de avaliação					
	Temperatura do solo (°C) 2017/18					
	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
S-MRUZ	36,5Ab	36,1Ab	34,8Aab	35,1Aab	32,6AB	29,3Bab
S-MPIA	34,1b	34,6b	32,2b	34,0b	31,2	29,7ab
S-MPAI	34,4Ab	34,7Ab	33,3ABab	33,2ABb	31,3AB	27,9Bb
S-MSPD	36,3b	36,5b	36,3ab	36,2ab	34,2	32,01ab
S-MSPC	47,4Aa	48,6Aa	38,6BCa	40,9Ba	36,2BC	35,2Ca
S-PAIPERE	33,4b	33,5b	32,2b	32,0b	31,2	29,7ab
S-PIAPERE	32,7b	33,1b	32,0b	31,3b	31,7	28,8b
Umidade do solo (%) 2018/19						
S-MRUZ	5,0BC	3,1C	9,0A	10,1Aab	4,1C	7,3AB
S-MPIA	5,8BC	2,6D	9,8A	9,7Aab	4,2CD	7,7AB
S-MPAI	5,2B	3,8B	9,2A	11,0Aa	4,8B	10,0A
S-MSPD	6,4B	2,9C	10,3A	8,8ABab	2,9C	8,8AB
S-MSPC	4,7B	2,6B	8,6A	8,6Aab	2,3B	7,5A
S-PAIPERE	7,0B	2,9C	11,0A	7,5Bb	2,8C	8,4AB
S-PIAPERE	6,7BC	5,2C	10,6A	7,8BCab	2,3D	8,7AB

¹Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes na linha e minúsculas diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As variações entre as épocas dentro de cada sistema e entre os sistemas no mês de fevereiro, ocorreram principalmente devido à água da chuva ter sido retida, em parte, na biomassa das forrageiras (nas pastagens perenes) e na serapilheira que se forma naturalmente pelas suas folhas senescentes. Este efeito também foi notado por Moitinho *et al.* (2021), em área de cana-de-açúcar com e sem manutenção dos resíduos da cultura na superfície do solo. Isso pode ser possível devido aos baixos volumes de chuva predominantes no período correspondente (em média 10 mm por precipitação) (Figura 2). Enquanto nos demais sistemas, o solo ainda fica mais exposto devido à efêmera cobertura (exceto no S-MSPC, este não mantém cobertura), logo, o seu contato com a água da chuva é direto, porém são sujeitos a maiores amplitudes do regime hídrico, o que era notável no campo.

A repetição dos maiores teores de umidade no solo sob sistema convencional em janeiro, fevereiro e abril, pode induzir ao erro de que considerar que nesse sistema há maior manutenção de umidade, porém, é importante ressaltar que estes valores retratam apenas a umidade no momento da avaliação, ou seja, não indicam manutenção de umidade ao longo do tempo, uma vez que esta manutenção é determinada, sobretudo, pelos volumes e distribuição das precipitações, bem como pela presença de palhada sobre o solo (BORGES *et al.*, 2014; SEKI *et al.*, 2015; IAMAGUTI *et al.*, 2015; MOITINHO *et al.*, 2021), o que não ocorre no S-MSPC.

4.14 ATIVIDADE ENZIMÁTICA – 2018 E 2019

No primeiro ano de avaliação da atividade enzimática do solo, a análise de variância não detectou diferenças entre os tratamentos ($p > 0,05$) (Tabela 17). As enzimas do solo têm papel de grande importância para a catalisação das reações mediadas pela biomassa microbiana, ou estão diretamente envolvidas na degradação de substratos complexos e nos processos de ciclagem de nutrientes (ŠTURSOVÁ; BALDRIAN, 2011; SNAJDR *et al.*, 2013; DEMISIE *et al.*, 2014), logo, estes resultados são coerentes com os obtidos para os teores dos nutrientes, dos quais estas enzimas participam do processo de mineralização (P, C e S).

Ainda que o curto período de implantação dos sistemas não tenha sido suficiente para alterar, estatisticamente, a atividade enzimática do solo, contudo, observa-se um padrão diferente nos monocultivos milho-soja (sob S-MSPC e S-MSPD), onde a atividade da Fosfatase foi menos intensa em relação aos SIPAs, enquanto que a atividade da β -Glicosidase foi menos intensa nas pastagens perenes em relação aos sistemas mais intensivos produtores

de grãos. Esta mesma tendência foi observada na avaliação final, porém, a menor intensidade foi mais notada no S-MPC. Este comportamento representa os efeitos dos sistemas de cultivos, sobretudo devido aos diferentes materiais vegetais aportados, e reforça sobre a sensibilidade desses bioindicadores ao tipo de uso e manejo do solo no Cerrado brasileiro (LOPES *et al.*, 2018, FRANCO *et al.*, 2020).

No último ano de avaliação, a Fosfatase ácida e a β -Glicosidase continuaram sem resposta, porém, houve efeito significativo para a Arilsulfatase, com atividade superior no sistema S-MPIA. Uma vez que a quantidade de substrato vegetal aportado neste sistema foi semelhante aos demais SIPAs, com consórcios, alguma variável ambiental ou intrínseca da cv BRS Piatã pode ter contribuído para este resultado, pois as forrageiras foram dessecadas na estação seca (outubro), época em que esta cultivar pode apresentar qualidade química diferente da BRS Paiaguás (EUCLIDES *et al.*, 2016), o que pode representar uma condição para a modificação da comunidade microbiana do solo (LI *et al.*, 2018; ARAUJO *et al.*, 2019; GUPTA *et al.*, 2020).

Embora ainda não tenham sido desenvolvidos limites críticos oficiais para a interpretação da atividade enzimática em solos arenosos do Cerrado, considerando fatores que diferenciam as classes texturais arenosa e argilosa, como os teores de argila e MOS, é possível estabelecer uma comparação entre os resultados do presente estudo com os limites para bioindicadores em solos argilosos, com coleta de amostras de solo na fase de floração das culturas, com o solo úmido, propostos por Mendes *et al.* (2019). Segundo esses autores, as médias gerais para Fosfatase ácida, Arilsulfatase e β -Glicosidase obtidas no presente estudo são 1,9; 1,6 e 1,5 vezes abaixo do limite inferior estabelecido para solos argilosos, respectivamente. No segundo ano, a atividade da Fosfatase ácida, Arilsulfatase e β -Glicosidase foi de 11,5; 1,9 e 1,1 vezes abaixo dos limites propostos por Mendes *et al.* (2019).

A Fosfatase ácida e a Arilsulfatase, entretanto, apresentaram valores próximos ao limite inferior para solos argilosos, com destaque para os SIPAs. Isto significa que, embora a atividade enzimática seja naturalmente inferior em solos arenosos, principalmente devido aos reduzidos teores de argila e matéria orgânica (MENDES *et al.*, 2018b), a aproximação dos valores obtidos para a β -Glicosidase e Arilsulfatase no presente estudo, aos limites mínimos estabelecidos para solos argilosos, demonstra que nesta condição de solo arenoso, a atividade dessas enzimas possa estar mais adequada nos SIPAs em relação ao monocultivo milho-soja sob o SPC, sugerindo melhor qualidade da saúde do solo nos sistemas com maior diversidade de vegetal e aporte de palhada.

Tabela 17. ¹Atividade enzimática do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017/18 e 2018/19.

Tratamentos	Fosfatase ácida	β -Glicosidase	Arilsulfatase
<u>mg de p-nitrofenol kg de solo⁻¹ h⁻¹</u>			
<u>2017/18</u>			
S-MRUZ	330,3	74,3	24,3
S-MPIA	310,5	71,7	23,4
S-MPAI	331,8	75,4	34,9
S-MSPD	260,5	75,5	23,6
S-MSPC	291,1	73,8	24,7
S-PAIPERE	341,9	66,7	35,9
S-PIAPERE	296,1	62,4	22,9
D.M.S.	139,9	22,3	21,3
F	0,4560	0,3519	0,1908
C.V.%	16	11	27
<u>2018/19</u>			
S-MRUZ	61,5	116,5	24,1ab
S-MPIA	60,8	102,7	35,3a
S-MPAI	40,1	86,0	21,9b
S-MSPD	56,7	101,8	16,2b
S-MSPC	39,1	78,8	19,0b
S-PAIPERE	52,8	103,9	22,7b
S-PIAPERE	55,7	96,6	21,8b
D.M.S.	36,8	59,1	11,6
F	0,2484	0,4221	0,0025**
C.V.%	25	21	17

¹Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**Significativo ao nível de 1 de probabilidade pelo teste F. S-MRUZ = Soja-Milho+Ruziziensis; S-MPIA = Soja-Milho+BRS Piatã; S-MPAI = Soja-Milho+BRS Paiaguás; S-MSPD = Soja-Milho/Sistema Plantio Direto; S-MSPC = Soja-Milho/Sistema de Preparo Convencional; S-PAIPERE = BRS Paiaguás perene S-PIAPERE = Soja-BRS Piatã perene. D.M.S = Diferença Mínima Significativa, C.V.% = Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Estes resultados são a base para o monitoramento da atividade enzimática do solo ao longo dos anos deste estudo, e uma vez que a produção de material vegetal para o satisfatório acúmulo de material orgânico sobre o solo, tende a aumentar ao longo do tempo, até uma estabilização, e espera-se o aumento da atividade enzimática do solo como resposta ao aumento da atividade dos microrganismos decompositores nas áreas com maior aporte de resíduos (S-MRUZ, S-MPIA e S-MPAI).

4.15 ANÁLISES DOS COMPONENTES PRINCIPAIS PARA AS VARIÁVEIS ESTUDADAS

Para a análise dos componentes principais (PCA) dos atributos químicos e físicos do solo no primeiro ano, foram extraídos dois componentes, que juntos explicaram 74,01% da variância total observada nos dados originais. O primeiro processo (PC1) representou 52,55% da variância total, enquanto o segundo processo (PC2) representou 21,46% da variância total (Tabela 18 e Figura 6). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

Tabela 18. Análises dos componentes principais para as frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo, estoque de carbono, atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017.

PCA	PC1	PC2
Autovalor	7,36	3,00
Variância explicada (%)	52,55	21,46
Variância acumulada (%)	52,55	74,01
Variáveis ¹	Correlação ²	
COT	0,72	0,59
CM	0,73	0,37
EstCMas	0,73	0,56
pH	-0,81	0,49
K	0,58	0,56
Ca	-0,65	0,62
Mg	-0,68	0,66
H+Al	0,87	-0,14
CTC	-0,60	0,67
B	0,78	0,04
Cu	0,87	0,11
Fe	0,88	-0,00
Mn	0,73	0,00
Zn	0,35	0,59

¹Avaliações realizadas ao final do ciclo da soja. ²Correlações consideradas na análise dos componentes principais. COT: carbono orgânico total; CM: carbono da fração mineral; EstCMas: estoque de carbono do solo pelo método da massa equivalente.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

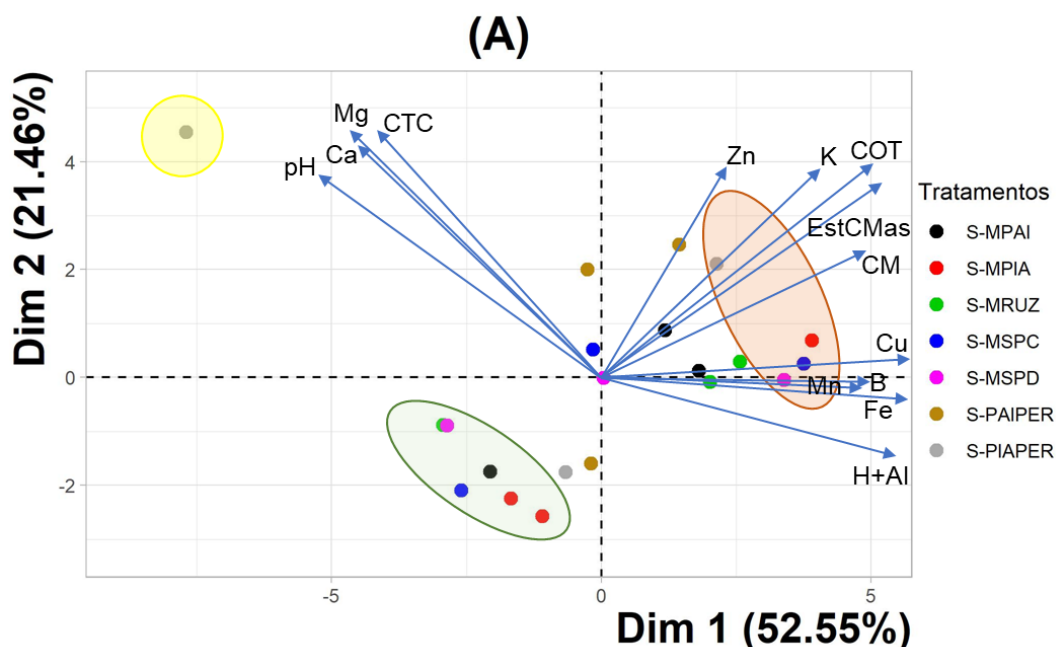
O grupo formado pelos sistemas S-MPIA, S-PIAPER, S-MSPC e S-MSPD (agrupadas à direita do gráfico na PC1) estão compartilhando as variáveis K, COT, EstCMas, Fe, Cu,

CM, H + Al, B, Mn e Zn, as quais são direta e fortemente relacionados entre si e inversamente relacionados ao pH, que está representado à esquerda do gráfico, também na PC1 (Figura 6).

O grupo localizado no canto superior, à esquerda do gráfico (na coordenada negativa da PC1) representa o sistema S-PIAPER, onde as variáveis Ca, CTC, Mg e pH são direta e fortemente relacionadas entre si (Figura 6). O grupo localizado na parte inferior, à esquerda do gráfico (na coordenada negativa da PC1) é formado pelos sistemas S-MPAI, S-MPIA, S-MSPC, S-MSPD e o S-MRUZ, e está compartilhando baixos valores para o COT, EstCMas, K, CM, Fe, Cu, B, Zn e H+Al.

No segundo processo (PC2), o grupo localizado no canto superior, à esquerda do gráfico (na coordenada positiva da PC2) representa o sistema S-PIAPER, e está compartilhando altos valores para Ca, CTC, Mg e pH. O grupo localizado na parte inferior do gráfico é formado pelos sistemas S-MPAI, S-MPIA, S-MSPC, S-MSPD e o S-MRUZ, e está compartilhando baixos valores para as variáveis COT, EstCMas, K, CM, Fe, Cu, B, Zn e H + Al (na coordenada negativa da PC2).

Figura 6. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) das frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo, estoque de carbono, atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a PCA dos atributos químicos e físicos do solo no último ano, foram extraídos dois componentes, que juntos explicaram 72,43% da variância total observada nos dados originais. O primeiro processo (PC1) representou 49,84% da variância total, enquanto o

segundo processo (PC2) representou 22,59% da variância total (Tabela 19 e Figura 7). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará também restrita a eles.

Tabela 19, Análises dos componentes principais para as frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo, estoque de carbono, atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2019.

PCA	PC1	PC2
Autovalor	9,47	4,29
Variância explicada (%)	49,84	22,59
Variância acumulada (%)	49,84	72,43
Variáveis¹	Correlação²	
AF	0,97	-0,07
AH	0,89	-0,04
HUM	0,71	0,19
COT	0,92	0,21
N total	0,77	0,24
COP	0,59	0,57
CM	0,68	-0,12
MA	-0,50	-0,04
EstCMas	0,89	0,17
pH	-0,33	0,91
K	0,82	-0,27
Ca	0,42	0,83
Mg	0,30	0,90
H+Al	0,66	-0,63
Al	0,38	-0,65
CTC	0,74	0,52
Cu	0,72	-0,3
Fe	0,85	-0,44
Mn	0,72	-0,08

¹Avaliações realizadas ao final do ciclo da sucessão milho-soja (SPC e SPD), milho+forrageira-pastejo (nos SPIA) e durante o pastejo contínuo nas pastagens perenes. ²Correlações consideradas na análise dos componentes principais. AF: ácidos fúlvicos; AH: ácidos húmicos; HUM: humina; COT: carbono orgânico total; COP: carbono orgânico particulado; CM: carbono da fração mineral; MA: macroporosidade do solo; EstCMas: estoque de carbono do solo pelo método da massa equivalente.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As variáveis que mais contribuíram para o primeiro processo foram a AF (0,97), COT (0,92), AH (0,89), EstCtMas (0,89), Fe (0,85), K (0,82), N total (0,77), CTC (0,74), Cu (0,72), Mn (0,72), HUM (0,71), CM (0,68), H+Al (0,66), COP (0,59) e a Al (0,38) (Tabela

19). O grupo formado pelos sistemas S-MPIA, S-PIAPER, S-MSPC e S-MSPD, à direita do gráfico na PC1 (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo), está compartilhando altos valores para o Fe, H+Al, Cu, Al e K e baixos valores para o pH (Figura 7).

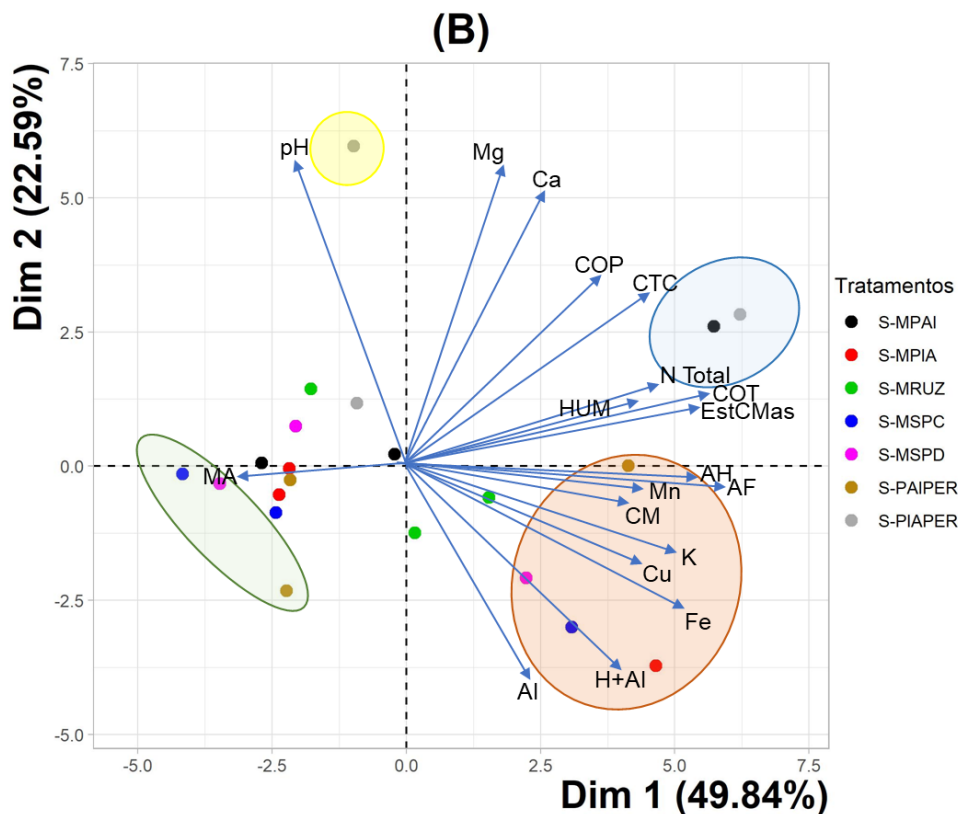
O grupo formado pelos sistemas S-MPAI e S-PIAPER (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo) está compartilhando altos valores de N total, HUM, COT, EstCMas e CM. O grupo formado pelos sistemas S-MSPC, S-MSPD e S-PAIPERE (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo) estão compartilhando baixos valores para CTC, COT, EstCMas, AF COP, Mn, AH, HUM, Fe e Cu. Ressalta-se alta correlação do AF com esta dimensão, e esta variável poderia, portanto, resumir-se a esta dimensão (Figura 7).

O maior aporte de resíduos vegetais sobre os solos em sistemas conservacionistas, como os SIPAs, aumenta o teor de MOS (SALTON *et al.*, 2014; SULC E FRANZLUEBBERS, 2014), como demonstrado pela força da correlação do Estoque de C (EstCMas) na PC1. Isso pode aumentar a formação de complexos solúveis com a MOS e seus produtos de decomposição, aumentando a disponibilidade de micronutrientes (JONES *et al.*, 2003). Isso pode ocorrer quando compostos hidrossolúveis lixiviados dos resíduos vegetais em processo de decomposição, como os ácidos orgânicos de baixa massa molecular (FRANCHINI *et al.*, 2003) podem complexar os micronutrientes catiônicos do solo (PEGORARO *et al.*, 2006).

No segundo processo (PC2) o sistema S-PIAPERE apresentou altos valores para Mg, pH e Ca (parte superior do gráfico, na coordenada positiva do eixo) (Figura 7). A alta correlação do Mg com a PC2 pode estar relacionada à sua menor preferência às cargas do solo (série liotrópica), que, uma vez disponíveis pelo aumento do pH, têm maior afinidade com o Ca, este, por sua vez, também apresentou uma elevada correlação, embora menor do que o Mg.

O grupo formado pelos sistemas S-MPAI e S-PIAPER (caracterizado por uma coordenada positiva no eixo), está compartilhando altos valores para a N total, HUM, COT, EstCMas e CM, enquanto o grupo formado pelos sistemas S-MPIA, S-PAIPERE, S-MSPC e S-MSPD está compartilhando altos valores para Fe, H+Al, Cu, Al, K e valores baixos de pH (Figura 7). É de se esperar a mesma tendência das correlações para o pH e seus componentes (H+Al e Al). Quanto aos micronutrientes Fe e Cu, suas disponibilidades na solução do solo aumentam em pH ácido (RAIJ *et al.*, 2011; FREITAS *et al.*, 2014).

Figura 7. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) das frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo, estoque de carbono, atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2019.



AF: ácidos fúlvicos; AH: ácidos húmicos; COT: carbono orgânico total; COP: carbono orgânico particulado; EstCMas: estoque de carbono do solo pelo método da massa equivalente.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a análise dos componentes principais (PCA), considerando as produtividades de grãos, atributos, químicos, físicos e bioquímicos do solo no primeiro ano, foram extraídos dois componentes, que juntos explicaram 76,47% da variância total observada nos dados originais. O primeiro processo (PC1) representou 58,1% da variância total, enquanto o segundo processo (PC2) representou 18,4% da variância total (Tabela 20 e Figura 8). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere restringir a análise à descrição do primeiro eixo, visto que este foi o mais importante para este estudo por possuir o maior autovalor e o maior percentual de explicação (58,1%).

As variáveis que mais contribuíram para o primeiro processo foram a PGMilho (0,88), β -Glicosidase (0,84), Umidade (0,83), Fosfatase (0,82) e Arilsulfatase (0,81). As variáveis Umidade, Arilsulfatase, Fosfatase e PGMilho, agrupadas à direita do gráfico na PC1 são direta e fortemente relacionados entre si e inversamente relacionados à Temperatura, que está

representada à esquerda do gráfico, também na PC1 (Figura 8). Estes resultados estão associados aos SIPAs, mais precisamente ao S-MPAI.

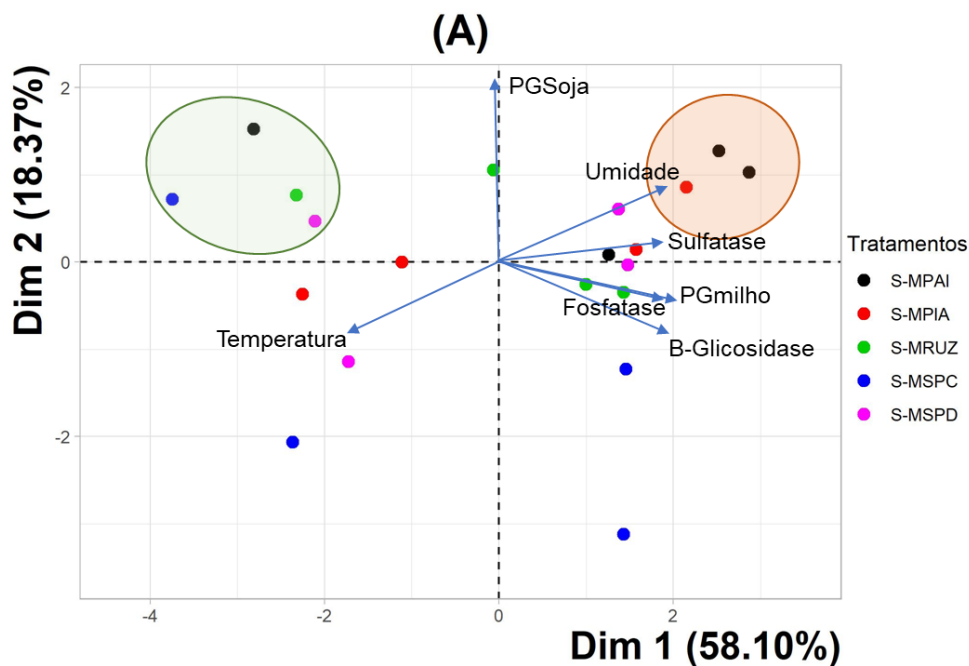
Tabela 20. Análises dos componentes principais para a produtividade de grãos do milho e da soja, temperatura e umidade do solo e atividade enzimática durante o cultivo da soja sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017/18.

PCA	PC1	PC2
Autovalor	4,07	1,29
Variância explicada (%)	58,10	18,37
Variância acumulada (%)	58,10	76,48
Variáveis ¹	Correlação ²	
PGMilho	0,88	-0,20
PGSoja	-0,02	0,90
Temperatura	-0,75	-0,36
Umidade	0,83	0,37
β -Glicosidase	0,84	-0,36
Fosfatase	0,82	-0,19
Arilsulfatase	0,81	0,09

¹A Temperatura e Umidade do solo foram medidas durante o ciclo da soja. A atividade enzimática foi avaliada ao final do ciclo da soja. ²Correlações consideradas na análise dos componentes principais.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 8. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) da produtividade de grãos do milho e da soja em 2017/18, temperatura e umidade do solo e atividade enzimática durante o cultivo da soja sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2017/18.



PGMilho: produtividade de grãos do milho em 2017; PGSoja: produtividade de grãos da soja em 2017/18; Temperatura: temperatura do solo em 2017/18; Umidade: umidade do solo em 2017/18.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Embora, grandes alterações em função do sistema de produção sejam esperadas ao longo do tempo, o efeito ocorrido relativamente imediato pode ter sido potencializado pela textura arenosa do solo, a qual limita a estocagem de água. Quando esses solos são manejados adequadamente, contudo, os efeitos positivos são bem visíveis, pela cobertura que ameniza a temperatura e reduz a perda de água para a atmosfera, gerando benefícios consideráveis na função do ecossistema por meio da maior diversidade de plantas que, segundo Yukicevich *et al.* (2016), Araujo *et al.* (2019) e Damian *et al.* (2021), aumenta a diversidade e estimula a atividade microbiana na camada superficial do solo devido ao aporte de palha, conferindo maior resiliência do solo às intempéries (BONETTI *et al.*, 2017; MENDES *et al.*, 2018a).

O grupo formado à esquerda do gráfico, na PC1 (caracterizado por uma coordenada negativa no eixo), está fortemente associado ao SPC, onde as variáveis Fosfatase, PGMilho, Arilsulfatase e β -Glicosidase são direta e fortemente relacionados entre si (Figura 8). Este resultado é decorrente dos menores aportes de matéria orgânica e rápida oxidação do C, devido ao revolvimento continuado, o que exaure o C do solo (PURWANTO *et al.*, 2019), o qual é fonte mantenedora da microbiota (Figura 8).

Para o último ano, foram extraídos dois componentes, que juntos explicaram 66,36% da variância total observada nos dados originais. O primeiro processo (PC1) representou 44,05% da variância total, enquanto o segundo processo (PC2) representou 22,31% da variância total (Tabela 21 e Figura 9). A estimativa do número adequado de eixos a serem interpretados sugere que apenas estes eixos estão carregando informações importantes e, como consequência, a descrição ficará restrita a eles.

As variáveis que mais contribuíram para o primeiro processo foram a Temperatura (-0,79), Arilsulfatase (0,77), Clorofila (0,72) e Umidade (0,71). O S-MSPD representado pelo grupo mais à direita do gráfico, na PC1 apresentou altos valores para a PGMilho, Clorofila e Umidade, as quais são direta e fortemente relacionadas entre si. O grupo formado à esquerda do gráfico, também na PC1, está compartilhando altos valores para a Temperatura e baixos valores para a Arilsulfatase (Figura 9), e este grupo é formado pelo S-MSPD e o S-MSPC.

Estes resultados demonstram como o regime hídrico do solo pode influenciar fortemente a atividade enzimática. Isso ocorre devido a produção de enzimas pelas raízes das plantas (BALOTA *et al.*, 2013) e microrganismos do solo ser regulada pela sua demanda e pela disponibilidade do substrato, que, por sua vez, é alterado por vários fatores como temperatura, umidade do solo, pH e outros (BURNS *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2018), fatores estes limitantes sobretudo no SPC, comparado aos SIPAs.

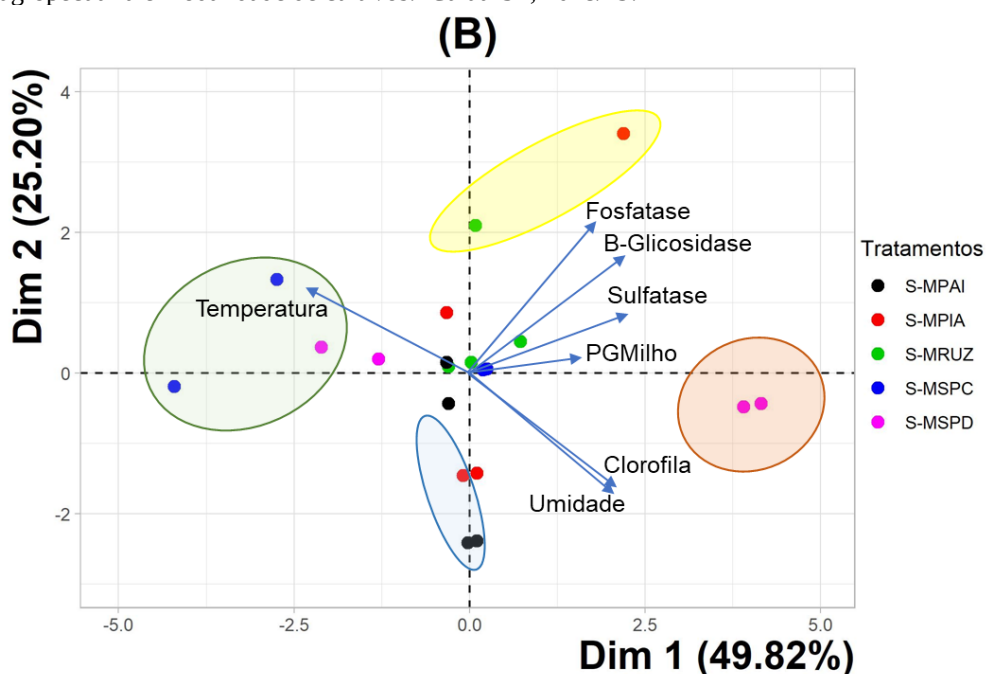
Tabela 21. Análises dos componentes principais para a produtividade de grãos do milho e da soja, temperatura e umidade do solo e atividade enzimática durante o cultivo da soja sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2018/19.

PCA	PC1	PC2
Autovalor	3,49	1,76
Variância explicada (%)	49,82	25,20
Variância acumulada (%)	49,82	75,03
Variáveis ¹	Correlação ²	
PGMilho	0,55	0,07
Clorofila	0,72	-0,55
Temperatura	-0,79	0,41
Umidade	0,71	-0,59
β -Glicosidase	0,76	0,57
Fosfatase	0,62	0,73
Arilsulfatase	0,77	0,28

¹A Temperatura e Umidade do solo foram medidas durante o ciclo da soja. A atividade enzimática foi avaliada ao final do ciclo da soja e a clorofila foi medida no estágio de florescimento pleno (R2) da soja. ²Correlações consideradas na análise dos componentes principais.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 9. Biplot para a análise dos componentes principais (PCA) da produtividade de grãos do milho e da soja, temperatura e umidade do solo e atividade enzimática durante o cultivo da soja sob diferentes sistemas de produção agropecuária e modalidade de cultivos. Caiuá-SP, 2018/19.



Temperatura: temperatura do solo em 2018/19; Umidade: umidade do solo em 2018/19.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

No segundo processo (PC2), as variáveis que mais contribuíram foram a Fosfatase (0,73) e a β -Glicosidase (0,57) (Figura 9). O grupo formado pelos sistemas S-MRUZ e S-MPIA está compartilhando altos valores no de β -Glicosidase (parte superior do gráfico, na coordenada positiva do eixo). O grupo formado pelos sistemas S-MPIA e o S-MPAI está compartilhando baixos valores para a Fosfatase (parte inferior do gráfico, na coordenada negativa do eixo). No Sul do Brasil, Barbieri *et al.* (2019) observaram aumento da atividade da fosfatase em áreas com maior diversidade de plantas na segunda safra. Outros estudos indicam que a maior diversidade vegetal, em comparação aos monocultivos, desencadeia a maior atividade enzimática do solo, com maior ou menor intensidade para determinados grupos (BŁOŃSKA *et al.*, 2016; GUANGMING *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2018).

A atividade enzimática é, portanto, influenciada tanto pelo regime hídrico, como pelo sistema de manejo do solo (EVANGELISTA *et al.*, 2012; GUPTA *et al.*, 2020). Entretanto, outras variáveis fora da abrangência deste estudo, podem ter corroborado para menores atividades de Fosfatase no S-MPIA e o S-MPAI, o que demonstra a necessidade da inclusão de outras variantes em estudos futuros, para aumentar o poder de compreensão e explicação dos fenômenos bioquímicos do solo sob sistemas complexos como os SIPAs

5. CONCLUSÕES

Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária que incluem braquiárias em consórcio com o milho safrinha contribuem para a formação de palha e cobertura do solo, o que mostrou ser de grande valia no curto prazo para as condições do solo arenoso, pelo aumento da sua resiliência quando às condições de estresse para as culturas em sucessão.

A fertilidade do solo arenoso sob SIPAs tende a estabilizar em curto período, podendo-se inferir que, em médio prazo os benefícios relacionados à atividade enzimática e ciclagem de nutrientes poderão ser mais pronunciados, em comparação aos sistemas convencionais ou ao SPD na sucessão milho-soja. Em geral, o consórcio do milho com a BRS Paiaguás foi mais expressivo na melhoria da qualidade do solo e produção das culturas, quando comparado aos demais, porém vale destacar que as pastagens perenes superaram os SIPAs.

As cultivares de *Urochloa* utilizadas neste estudo foram semelhantes quanto à capacidade produtiva de matéria seca para o pastejo animal e posterior formação de pastagem na estação de outono/inverno (boi safrinha). A *U. ruziziensis* é de fácil manejo na dessecação, entretanto, apresenta desvantagem pela sua rápida mineralização em relação às demais cultivares, portanto, este comportamento prejudica a formação de palhada por tempo mais prolongado, sobretudo nas condições de solos arenosos da formação Caiuá, região acometida por ciclos regulares de veranicos.

O sistema convencional contínuo de preparo do solo (SPC) deve ser evitado nos solos arenosos, visto que sua fragilidade não permite colheitas equiparadas aos demais sistemas conservacionistas, ou seja, os benefícios do preparo do solo para o cultivo são sobrepostos por perda de C do solo, menor capacidade de estocar água, agravada pela maior temperatura do solo sem proteção, devido à falta de cobertura, tendência à redução da atividade microbiana, pela, consequente falta de substrato, reduzindo atividade enzimática, indicando atenção para a qualidade do solo.

Quando é realizado pastejo animal com taxas de lotação controlada de acordo com a oferta de alimento, os SIPAs não prejudicam a qualidade física do solo. Os SIPAs, em especial, o sistema com consórcio milho + capim Paiaguás contribuem para aumentar os teores de ácidos húmicos do solo na camada superficial e tendem a incorporar ácidos fúlvicos e húmicos em profundidade, bem como em incrementar os estoques de carbono do solo.

7. APÊNDICE



Figura 10. Milho no estágio fenológico V4, em consórcio com *Urochloa*. Março-julho de 2018. Fonte: Autor



Figura 11. Milho no estágio fenológico R6 (maturidade fisiológica), em consórcio com *Urochloa*. Julho de 2018. Fonte: Autor.



Figura 12. Animais pastejando após colheita dos grãos do milho. Agosto de 2018. Fonte Autor



Figura 13. Animais pastejando no tratamento pastagem perene de Piatã. Agosto de 2018. Fonte: Autor.



Figura 14. Animais pastejando no tratamento pastagem perene de Paiaguás. Agosto de 2018. Fonte: Autor



Figura 15. Animais pastejando no tratamento pastagem perene de Paiaguás. Agosto de 2018. Fonte: Autor



Figura 116. Colheita manual do milho nas parcelas úteis. Foto: Autor. 11/07/2018



Figura 17. Corte da biomassa das forrageiras para determinar a produtividade de matéria seca e estimar quantidades de biomassa para que serão. 02/10 2017 Foto: Autor.



Figura 18. Litter bags preenchidos com palha de *Urochloa ruziziensis*, acomodados sobre o solo e a soja no estágio de plântula. 10/10/2017. Foto: Autor.



Figura 19. Lavoura de soja semeada em sucessão ao monocultivo do milho, em sistema de preparo convencional do solo, sem. 15/12/2018. Foto: Autor.



Figura 20. Lavoura de soja semeada em sucessão ao consórcio milho x *Urochloa* (ILP em SPD). 09/02/2019. Foto: Autor.



Figura 21. Medições da temperatura do solo em lavoura de soja cultivada em sucessão ao milho (monocultivo), em área com preparo convencional do solo, às 11:58h. 20/12/2019. Fonte: Autor.



Figura 22. Medições de temperatura do solo em lavoura de soja cultivada em plantio direto na palhada de milho (monocultivo), às 12:01h. 20/12/2019. Fonte: Autor.



Figura 23. Medições de temperatura do solo em lavoura de soja cultivada em plantio direto na palhada de milho e *Urochloa*, às 12:06h. 20/12/2018 Fonte: Autor.



Figura 24. Coleta de amostras de solos para determinação da umidade gravimétrica e medições de temperatura do solo em área com pastagem perene de *Urochloa*. 20/12/2018 Fonte: Autor.

REFERÊNCIAS

- ACRECHE, M. M.; PORTOCARRERO, R.; CHALCO VERA, J.; DANERT, C.; VALEIRO, A. H. Greenhouse gas emissions from green-harvested sugarcane with and without post-harvest burning in Tucumán. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 2, p. 195–199, 2014.
- ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; MARTINS, A. P.; COSTA, S. E. V. G.; CECAGNO, D.; CARLOS, F. S.; CARVALHO, P. C. F. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock under no-tillage in Southern Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Netherlands, v. 190, p. 52-59, 2014.
- ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; DENARDIN, L. G. de O.; NICHEL, G. de H.; COSTA, S. E. V. G de A.; SILVA, R. A. P. E.; BALERINI, F.; CARVALHO, P. C. de F.; FRAN, A. J. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Netherlands, v. 108, p. 21-33, 2017.
- ALBERS C. N.; BANTA G. T.; HANSEN P. E.; JACOBSEN O. S. Effect of different humic substances on the fate of diuron and its main metabolite 3,4-dichloroaniline in soil. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 1, p. 8687-91. 2008.
- ALVES, V. B.; PADILHA, N. de S.; GARCIA, R. A.; CECCON, G. Milho safrinha consorciado com *Urochloa ruziziensis* e produtividade da soja em sucessão. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 12, n. 3, p. 280-292, 2013.
- AMADO, T.J.C. Manejo da palha, dinâmica da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes em plantio direto. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 7., 2000, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** Ponta Grossa: FEBRAPDP, 2000. p.105-111.
- ARAUJO, T. dos S.; GALLO, A. de S.; ARAUJO, F. dos S.; SANTOS, L. C. dos; GUIMARÃES, N. de F.; SILVA, R. F. DA; Biomassa e atividade microbiana em solo cultivado com milho consorciado com leguminosas de cobertura. **Revista de Ciências Agrárias**, Recife, v. 42, p. 347-357, 2019.
- ARLAUSKIENĖ, A.; MAIKŠTĖNIENĖ, S. e ŠLEPETIENĖ, A. Effect of cover crops and straw on the humic substances in the clay loam Cambisol. Cambisol. **Agronomy Research**, v.8, p. 397–402, 2010.
- ASHAGRIE, Y., ZECH, W.; GUGGENBERGER, G., MAMO, T. Soil aggregation and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, p.101–108, 2007.
- BAGNATO, V.S. Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy. **Soil Science**, Philadelphia, v. 167, p. 739–749, 2002.
- BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 31, p. 697-710, 2000.
- BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Ácidos húmicos. **Revista Ceres**, Viçosa v. 61, p. 856-881, 2014.

BALIN, N. M.; ZIECH, N. R. D.; OLIVEIRA, J. P. M. DE; GIRARDELLO, V. C.; STUMPF, L.; CONCEIÇÃO, P. C. Frações da matéria orgânica, índice de manejo do carbono e atributos físicos de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 3, p. 85-94, 2017.

BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. J. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 08, p. 189-250, 2013.

BAQUERO, J. E., RALISCH, R., MEDINA, C. C., TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F. Propriedades físicas de solo e crescimento radicular de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 63-70, 2012.

BARBERA, V.; POMA, I.; GRISTINA, L.; NOVARA, A.; EGLI, M. Long-term cropping systems and tillage management effects on soil organic carbon stock and steady state level of C sequestration rates in a semiarid environment. **Land Degradation & Development**, United Kingdom, v. 23, n. 1, p. 82-91, 2012.

BARBIERE, M.; DOSSIN, M. F.; NORA, D. D.; SANTOS, W. B. D.; BEVILACQUA, C. B.; ANDRADE, N. D.; ANTONIOLLI, Z. I. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, Recife, v. 42, p. 121-13, 2019.

BARRETO, A. C.; FREIRE, M. B. G. S.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J.; INÁCIO, E. S. B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1471-1478, 2008.

BARROS, J. A.; MEDEIROS, E. V.; COSTA, D. P.; DUDA, G. P.; LIMA, J. R. S.; SANTOS, U. J.; HAMMECKER, C. Human disturbance affects enzyme activity, microbial biomass and organic carbon in tropical dry sub-humid pasture and forest soils. **Archives of Agronomy and Soil Science**, United Kingdom, v. 66, n. 4, p. 458-472, 2020.

BASTIDA, F., GARCÍA, C., FIERER, N.; ELDRIDGE, D. J.; BOWKER, ; ABADES, S.; ALFARO, F. D.; BERHE, A. A.; CUTLER, N. A.; GALLARDO, A.; GARCÍA-VELÁZQUEZ, L.; HART, S. C.; HAYES, P. E.; HERNÁNDEZ, T.; HSEU Z.-Y.; JEHLICH, N.; KIRCHMAIR, M.; LAMBERS, H.; NEUHAUSER, S.; PEÑA-RAMÍREZ, V. M.; PÉREZ, C. A.; REED, S. C.; SANTOS, F.; SIEBE, C.; SULLIVAN, B. W.; TRIVEDI, P.; VERA, A.; WILLIAMS, M. A.; MORENO, J. L.; DELGADO-BAQUERIZO, M. Global ecological predictors of the soil priming effect. **Nature Communications**. Cambridge, v. 10, n. 3481, p. 1-9, 2019.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, London, v. 47, p. 151-163, 1996.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 677-683, 2004.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN NETO, L.; FERNANDES, S. A. Organic matter storage in a sandy loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p.101-109, 2000.

BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo**: Um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2003. 7p. (Comunicado Técnico, 16).

BEZERRA, R. P. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Formas de carbono em Latossolo sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no cerrado, Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, p. 2637-2654, 2013.

BŁOŃSKA, E., LASOTA J., GRUBA P. Effect of temperate forest tree species on soil dehydrogenase and urease activities in relation to other properties of soil derived from loess and glaciofluvial sand. **Ecological Research**, New York, v.31, n.5, p. 655–664, 2016.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; ZANATTA, J. A.; CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture in southern Brazil. **Global Change Biology**, United Kingdom, v. 16, p. 784–795, 2010.

BOENI, M.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; CONCEIÇÃO, P. C.; DICK, D. P.; KNICKER, H.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M. Organic matter composition in density fractions of cerrado ferralsols as revealed by CPMAS ¹³C NMR: Influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 80-86, 2014.

BOLAN, N. S.; ADRIANO, D. C.; CURTIN, D. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 78, p. 215 –272, 2003.

BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; ZULPO, L. Temperatura e umidade do solo em sistemas de integração soja-bovinos de corte com diferentes manejos da altura do pasto. **Scientia Agricola**, Curitiba, v. 18, p. 11-21. 2017.

BONETTI, J. D. A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. D.; CARNEIRO, M. A. C.; CAETANO, J. O. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n.11, p. 1239-1247, 2018.

BORGES, T. K. S., MONTENEGRO, A. A. A., SANTOS, T. E. M., SILVA, D. D.; SILVA JUNIOR, V. P. Influência de práticas conservacionistas na umidade do solo e no cultivo do milho (*Zea mays* L.) em semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1862-1873, 2014.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; MATEUS, G. P.; MARTINS, P. O.; COSTA, C. Effects of row spacing and intercrop on corn grain yield and forage production of palisade grass. **Crop and Pasture Science**, Canberra, v. 63, p. 1106–1113, 2012.

BRADFORD, M. A. Soil carbon: a leaky sink. **Nature Climate Change**, London, v. 7, n. 7, p. 475–476, 2017.

BRAZ, S. P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; GUIMARÃES, A. P.; DOS SANTOS, C. A.; DOS SANTOS, S. C.; MACHADO, PINHEIRO, E. F.; BODDEY, R. M. Soil carbon stocks under productive and degraded *Brachiaria* pastures in the Brazilian Cerrados. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 914–928. 2013.

BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Total nitrogen. In: PAGE, A. L. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, p. 595-624, 1982.

BROOKES, P. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 19, p. 269-279, 1995.

BURNS, R. G.; DEFOREST, J. L.; MARXSEN, J.; SINSABAUGH, R. L.; STROMBERGER, M. E.; WALLENSTEIN, M. D.; WEINTRAUB, M. N. ZOPPINI, A. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, United Kingdom, 58:216–234, 2013.

CAETANO, J. O.; BENITES, V. M.; SILVA, G. P.; SILVA, I. R.; ASSIS, R. L.; CARGNELUTTI FILHO, A. Dinâmica da matéria orgânica de um Neossolo Quartzarênico de cerrado convertido para cultivo em sucessão de soja e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1245 – 1255, 2013.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 777-783, 1992.

CAMPOS, B. H. C.; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; NICOLOSO, R. S.; FIORIN, J. E. Carbon stock and its compartments in a subtropical Oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 805-817, 2011.

CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; IWATA, B. de F.; NÓBREGA, J. C. A. Atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 12, p. 1681-1689, 2011.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. Van.; CAMARGO, C. E. O. Cereais. In: RAIJ, B. Van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Boletim Técnico 100: Recomendação de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo; IAC, 1997. p.43-71.

CARDELLI R., MARCHINI F., SAVIOZZI A. Soil organic matter characteristics, biochemical activity and antioxidant capacity in Mediterranean land use systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 120, p. 8-14, 2012.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. DE; REIS, E. F. DOS; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. DE; 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, p. 147-157, 2009.

CARPINELLI, S.; FONSECA, A. F. DA; WEIRICH NETO, P. H.; DIAS, S. H. B.; PONTES, L. DA S. Spatial and temporal distribution of cattle dung and nutrient cycling in integrated crop–livestock systems. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 5, p. 672-691, 2020.

CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, I.; MORAES, A.; SOUZA, E. D.; SULC, R. M.; LANG, C. R.; FLORES, J. P. C.; LOPES, M. L. T.; SILVA, J. L. S., CONTE, O.; WESP, C. L.; LEVIEN, R.; FONTANELLI, R. S.; BAYER, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Netherlands, v. 88, n. 2, p. 259-73, 2010a.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGEL, B. J.; PICCOLO, M. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazil Amazon. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 2, 103, p. 342-349, 2009.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; RUCK, F. J.; CERRI, C. C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 175–186, 2010b.

CASTILHOS, R. M. V.; DICK, D. P.; CASTILHOS, D. D.; MORSELLI, T. B. A. G.; COSTA, P. F. P. DA; CASAGRANDE, W.; ROSA, C. M. DA. Distribuição e caracterização de substâncias húmicas em vermicompostos de origem animal e vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. spe, p. 2669-2675, 2008.

CASTRO, G. S. A CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 0, n. 1, p. 1-8, 2014.

CAVALLI, E.; LANGE, A.; CAVALLI, C.; BEHLING, M. Decomposition and release of nutrients from crop residues on soybean-maize cropping systems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, p. e5527, 2018.

CECAGNO, D.; GOMES, M. V.; ANDRADE, S. E. V. G. DE; MARTINS, A. P.; DENARDIN, L. G. de O.; BAYER, C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F. Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.13, n. 3, e5553, 2018.

CELANO, G.; SMEJKALOVÁ, D.; SPACCINI, R.; PICCOLO, A. Interactions of three striazines with humic acids of different structure. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 27, p. 7360-6, 2008.

CHEN, J.; ARAFAT, Y.; WU, L.; XIAO, Z.; LI, Q.; KHAN, M. A.; KHAN, M. U.; LIN, S.; LIN W. Shifts in soil microbial community, soil enzymes and crop yield under peanut/maize intercropping with reduced nitrogen levels. **Applied Soil Ecology**, Netherlands, v. 124, p.327-334, 2017.

CHIODEROLI, C. A; MELLO, L. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN AL. Atributos físicos do solo, produtividade de soja em sistema de consórcio milho, braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p 37-43, 2012.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advance in Soil Science**, New York, v. 20, p. 1-90, 1992.

CLEMMENSEN, K. E.; BAHR, A.; OVASKAINEN, O.; DAHLBERG, A.; EKBLAD, A.; WALLANDER, H.; STENLID, J.; FINLAY, R. D.; WARDLE, D. A.; LINDAHL, B. D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. **Science**, v. 339, n. 6127, p. 1615–1618, 2013.

CONAB. PORTAL DE INFORMAÇÕES AGROPECUÁRIAS. Brasília, Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>>, Acesso em: 18/05/2021.

CONCEIÇÃO, P. C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil**. 2006. 138f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 777– 788, 2005.

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da Matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.541549, 2008.

CORBEELS, M.; MARCHÃO, R. L.; SIQUEIRA NETO, M.; FERREIRA, E. G.; MADARI, B. E.; SCOPEL, E.; RODRIGUES BRITO, O. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports**, Berlin, v. 6, n. 21450, p. 1-8, 2016.

COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. D. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 7, p. 1185-1191, 2006.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M. BUZETTI, S.; LOPES, K. S. M.; SANTOS, F. G. DOS; PARIZ, C. M. Acúmulo de macronutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em razão da adubação nitrogenada durante e após o consórcio com a cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1223-1233, 2014a.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. DOS S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015b.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; ULIAN, N. de A.; COSTA, B. S.; PARIZ, C. M.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Acúmulo de nutrientes e tempo de decomposição da palhada de espécies forrageiras em função de épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 3, p. 818829, 2015a.

COSTA, S. E. V. G. A; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; MARTINS, A. P.; KUNRATH, T. R.; CECANO, T.; BALERINI, F. Impact of an integrated no-till crop–

livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. **Agriculture, ecosystems & environment**, Netherlands, v. 190, p. 43-51, 2014b.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; MATEUS, G. P.; BORGHI, E.; LELES, E. P.; SANTOS, N. C. B. Effect of intercropping on yields of corn with different relative maturities and Palisade grass, **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, n. 3, p. 599–606, 2013.

DAMIAN, J. M.; FIRMANO, R. F.; CHERUBIN, M. R.; PAVINATO, P. S.; de SOARES, T. M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. E. P. Changes in soil phosphorus pool induced by pastureland intensification and diversification in Brazil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 703, p. 135463, 2020.

DAMIAN, J. M.; MATOS, E. DA S.; PEDREIRA, B. C. E.; CARVALHO, P. C. de F.; SOUZA, A. J. de; ANDREOTE, F. D.; PREMAZZI, L. M.; CERRI, C. E. P. Pastureland intensification and diversification in Brazil mediate soil bacterial community structure changes and soil C accumulation. **Applied Soil Ecology**, Netherlands, v. 160, p. 103858, 2021.

DE SANT-ANNA, S. A. C.; JANTALIA, C. P.; SÁ, J. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Netherlands, v. 108, p. 101-120, 2016.

DEMISIE, W.; LIU, Z. Y.; ZHANG, M. K. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil. **Catena**, Netherlands, v.121, p.214–221, 2014.

DICK, R. P.; BREACKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W. e JONES, A. J., eds. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. v. 2, p. 247-272.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; and KOGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, Netherlands, v. 81, p. 87–95. 2005.

DIJKSTRA, F. A.; CARRILLO, Y.; PENDALL, E.; MORGAN, J. A. Rhizosphere priming: a nutrient perspective. **Frontiers in Microbiology**, New York, v. 4, n. 216, p. 1–8, 2013.

DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. **Global Change Biology**, United Kingdom, v. 17, p. 1658 – 1670, 2011.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L. DE; BALIEIRO, F. de C. FONTANA, A., SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C. DE; SANTOS, F. C. DOS; ALBUQUERQUE, M. R. de; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. S.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, p. 1003-1020, 2016.

DUARTE, A. P.; KURIHARA, C. H.; CANTARELLA, H. Adubação do milho safrinha em consórcio com braquiária. In: CECCON, G. (Ed.) **Consórcio milho braquiária**. Brasília, DF: Embrapa, 2013. p.113-141.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. ILPF em números. Sinop, 2016. Disponível em: <
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/158636/1/2016-cpamt-ilpf-em-numeros.pdf>>, Acesso em: 04/08/ 2021.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2ª ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EPELDE, L.; BURGESS, A.; MIJANGOS, I.; GARBISU C. Microbial properties and attributes of ecological relevance for soil quality monitoring during a chemical stabilization field study. **Applied Soil Ecology**, Netherlands, v. 75, p. 1–12, 2014.

EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B.; BARBOSA, R. A.; VALLE, C. B.; NANTES, N. N. Animal performance and sward characteristics of two cultivars of *Brachiaria brizantha* (BRS BRS Paiguás and BRS Piatã). **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 45, n. 3, p. 85-92, 2016.

EVANGELISTA, C. R.; PARTELLI, F. L.; FERREIRA, E. P. de B.; CORRECHEL, V. Atividade enzimática do solo sob sistema de produção orgânica e convencional na cultura da cana-de-açúcar em Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 4, p. 1251-1262, 2012.

FAO. FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. An international consultation on integrated croplivestock systems for development: The way forward for sustainable production intensification. Rome, 2010. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/images/iclsd/documents/crop_livestock_proceedings.pdf>, Acesso em: 04/08/ 2021.

FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 69-116, 1997.

FERREIRA, E. P. de B.; STONE, L. F.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 1, p. 22-31, 2017.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Científica Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2, p.36-41, 2008.

FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. de F.; LEITE, J. G. DAL B.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 771-780, 2007.

FONTAINE, S. MARIOTTI, A.; ABBADIE, L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 6, p. 837-843, 2003.

FRACETTO, G. G. M.; AZEVEDO, L. C. B.; FRACETTO, F. J. C.; ANDREOTE, F. D.; LAMBAIS, M. R.; PFENNING, L. H. Impact of Amazon land use on the community of soil fungi. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 70, p. 59-67, 2013.

FRANCHINI, J. C.; VELLINI, C. L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; WATANABE, R. H. **Integração Lavoura-Pecuária em solo arenoso e clima quente: duas décadas de experiência**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. (Embrapa Soja. Circular técnica, 118).

FRANCO, A. de J.; SILVA, A. P. V. da; SOUZA, A. B. S.; OLIVEIRA, R. L.; BATISTA, É. R.; SOUZA, E. D. de; SILVA, A. O.; CARNEIRO, M. A. C. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 50, e64026. 2020.

FRANZLUEBBERS, A. J. Fostering the future with forage: the case for pasture crop rotations. **Better Crops with Plant Food**, v. 101, n. 4, p. 3-5, 2017.

FREITAS, I. C. DE; RIBEIRO, J. M.; ARAÚJO, N. C. A.; SANTOS, M. V.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; AZEVEDO, A. M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; FRAZÃO, L. A. Agrosilvopastoral systems and well-managed pastures increase soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado. **Rangeland Ecology & Management**, Amsterdam v. 73, n. 6, p. 776-785, 2020.

FREITAS, L. DE; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A. DE; SOUZA JÚNIOR, P. R. DE; CAMPOS, M. C. C. Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 8, n. 2, p. 155-164, 2014.

FREITAS, R. J. DE; NASCENTE, A. S.; SANTOS, F. L. de S. População de plantas de milho consorciadas com *Urochloa ruziziensis*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 1, p. 79-87, 2013.

GALÃO, O. F., CARRÃO-PANIZZI, M. C., MANDARINO, J. M. G., JÚNIOR, O. O. S., MARUYAMA, S. A., FIGUEIREDO, L. C., BONAFE, E. G. AND VISENTAINER, J. V., Differences of fatty acid composition in Brazilian genetic and conventional soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill) grown in different regions. **Food Research International**, Barking, p. 589-594, 2014.

GARCIA, C. M. P.; ANDREOTTI, M.; TARSITANO, M. A. A.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; LIMA, A. E. DA S.; BUZETTI, S. Análise econômica da produtividade de grãos de milho consorciado com forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum* em sistema plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2, p.157-163, 2012.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. dos S.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691-699, 2007.

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.

GIRARDELLO, V. C., AMADO, T. J. C., NICOLOSO, R. S., HÖRBE, T. A. N., FERREIRA, A. O., TABALDI, F. M.; LANZANOVA, M. E. Alterações nos atributos físicos de um latossolo vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2115-2126, 2011.

GOEDERT, W. J.; OLIVEIRA, S. A. Fertilidade do solo e sustentabilidade da atividade agrícola. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.991-1017.

GONDAR, D.; LOPEZ, R.; FIOL, S. ANTELO, J. M.; ARCE, F. Characterization and acid–base properties of fulvic and humic acids isolated from two horizons of an ombrotrophic peat bog. **Geoderma**, Amsterdam, v. 126, p. 367-374, 2005.

GREEN, V. S.; STOTT, D. E.; CRUZ, J. C.; CURI, N. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxissol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1/2, p.114-121, 2007.

GREGORICH, E. G.; BEARE, M. H.; McKIM, U. F.; SKJEMSTAD, J. O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.70, p.975-985, 2006.

GUANGMING, L.; XUECHEN, Z.; XIUPING, W.; HONGBO, S.; JINGSONG, Y.; XIANGPING, W. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 237, 274–279, 2017.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Frações da matéria orgânica em áreas de Latossolo sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado do estado de Goiás. **Semina. Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 2615-2628, 2013.

GUENET, B.; CAMINO-SERRANO, M.; CIAIS, P.; TIFAFI, M., MAIGNAN, F.; SOONG, J. L.; JANSSENS, I. A. Impact of priming on global soil carbon stocks. **Global Change Biology**, New Jersey v. 24, n. 5, p. 1873–1883, 2018.

GUERA, K. C. S.; FONSECA, A. F. da; RIBEIRO, F. Stocks and distribution of soil carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur in an integrated crop-livestock system treated with phosphates. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 63, e20190520, 2020.

GUPTA, V. V. S. R.; ROPER, M. M.; THOMPSON, J. Harnessing the benefits of soil biology in conservation agriculture. In: PRATLEY, J., KIRKEGAARD, J. (Eds.). Australian Agriculture. In **2020: from conservation o automation**. Wagga Wagga: Charles Sturt University; 2020. p. 237-253.

HAN, L.; SUN, K.; JIN, J.; XING, B. Some concepts of soil organic carbon characteristics and mineral interaction from a review of literature. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford v.94, p.107-121, 2016.

HASSINK, J. A model of the physical protection of organic matter in soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 191, p. 77–87, 1997.

HAYNES, R. Soil acidification induced by leguminous crops. **Grass and Forage Science**, Oxford, v. 38, p. 1–11, 1983.

HU, W.; JIAO, Z.; WU, F.; LIU, Y.; DONG, M.; MA, X.; FAN, T.; AN, L.; FENG, H. Long-term effects of fertilizer on soil enzymatic activity of wheat field soil in Loess Plateau, China. **Ecotoxicology**, v. 23, n. 10, p. 2069-2080, 2014.

IAMAGUTI, J. L.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; BICALHO, E da S.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA JUNIOR, N. Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 5, p. 497-504, 2015.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Climatologia e histórico de previsão do tempo em Caiuá, BR. Brasília. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/2248/caiua-sp>>, Acesso em: 23/07/2021.

JAGADAMMA, S.; LAL, R. Distribution of organic carbon in physical fractions of soils as affected by agricultural management. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 46, n. 6, p. 543-554, 2010.

JAMALA, G. Y.; OKE, D. O. Humic substances and Mineral-Associated soil organic carbon as influenced by land use in Southeastern Adamawa State, Nigeria. **IOSR Journal of Environmental Science**, v. 5, n. 5, p. 59-70, 2013.

JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C. A.; BRANDT G. P.; LAFOND, G. P.; TOWNLEY-SMITH, L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1799-1806, 1992.

JONES, D. L.; DENNIS, P. G.; OWEN, A. G. e VAN HEES, P. A. W. Organic acid behavior in soils - Misconceptions and knowledge gaps. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 248, p. 31-41, 2003.

JOBBAGY, E. G. e JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, Ithaca, v. 10, n. 2, p. 423–436. 2000.

JUGSUJINDA, A. e PATRICK JUNIOR, W. H. Evaluation of toxic conditions associated with orangizing symptoms of rice in a flooded Oxisol in Sumatra, Indonesia. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 152, p. 237-243, 1993.

KARHU, K.; AUFFRET, M. D.; DUNGAIT, J. A. J.; HOPKINS, D. W.; PROSSER, J. I.; SINGH, B. K.; SUBKE, J.; WOOKEY, P. A.; ÅGREN, G. I.; SEBASTIA, M.; GOURIVEAU, F.; BERGKVIST, G.; MEIR, P.; NOTTINGHAM, A. T.; SALINAS, N.; HARTLEY, I. P. Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. **Nature**, London, v. 513, p. 81–84, 2014.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; COBUCCI, T. Opções e vantagens da integração lavoura-pecuária a produção de forragens na entressafra. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, p.16-29, 2007.

- KOUTIKA, L. S.; CHONÉ, T.; ANDREUX, F.; BURTIN, G. e CERRI, C. C. Factors influencing carbon decomposition of topsoils from the Brazilian Amazon Basin. **Biology and Fertility of Soils**, Florence, v. 28, n. 4, p. 436-438. 1999.
- KRAGT, M. E.; PANNELL, D. J.; ROBERTSON, M. J.; THAMO, T. Assessing costs of soil carbon sequestration by crop-livestock farmers in Western Australia. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 112, p. 27- 37, 2012.
- KUZYAKOV, Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 42, n. 9, p. 1363–1371, 2010.
- KUZYAKOV, Y. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, New York, v. 165, n. 4, p. 382–396, 2002.
- LAL, R. Soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. e CERRI, C. E. P. **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York, Haworth Press, p. 49-64, 2006.
- LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 27, p. 1–8. 1994.
- LI, J.; TONG, X.; AWASTHI, M. K.; WU, F.; HA, S.; MA, J.; SUN, X.; HE, C. Dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities along a chronosequence of desertified land revegetation. **Ecological Engineering**, v.111, p.22–30, 2018.
- LI, S.; XIE, Y.; LIU, G.; WANG, J.; LIN, H.; XIN, Y.; ZHAI, J. Water use efficiency of soybean under water stress in different eroded soils. **Water**, Basel, v. 12, n. 2, p 373. 2020.
- LIMA, C. L. R.; PILLON, C. N.; SUZUKI, L. E. A. S.; CRUZ, L. E. C. Atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo comparados aos do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1849-1855, 2008.
- LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JÚNIOR, F. B.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; SOUZA, L. M.; MENDES, I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, Madison, v. 12, p. 72-82, 2018.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; BEUTLER, S. J.; ANJOS, L. H. C. dos. Oxidizable carbon and humic substances in rotation systems with brachiaria/livestock and pearl millet/no livestock in the Brazilian Cerrado. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 11, p. 217-231, 2013.
- LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; DOS ; ANJOS, L. H. C. dos; SILVA, E. M. R. da. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1067-1072, 2009.

MACCARTHY, J. F. Subsurface transport of dissolved humic substances and associated contaminants. In: CLAPP, C. E.; HAYES, M. H. B.; SENSI, N.; BLOOM, P. R.; JARDINE, P. M. **Humic Substances and Chemical Contaminants**, Soil Science Society of America, Madison, p. 429-448, 2001.

MACHADO, L. A. Z.; CECATO, U.; COMUNELLO, E.; CONCENÇO, G.; CECCON, G. 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.

MACHADO, P. L. O. de A. **Fracionamento físico do solo por densidade e granulometria para a quantificação de compartimentos da matéria orgânica do solo: um procedimento para a estimativa pormenorizada do sequestro de carbono pelo solo**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2002. 6p. (Comunicado Técnico, 9).

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M.; SANTOS JÚNIOR, J. DE D. G.; SÁ, M. A. C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 873-882, 2007.

MARCHINI, D. C.; LING, T. G. C.; ALVES, M. C.; CRESTANA, S.; SOUTO FILHO, S. N.; ARRUDA, O. G. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 19, n. 6, p. 574-580, 2015

MARINHO JUNIOR, J. L.; PISCOYA, V. C.; FERNANDES, M. M.; GONÇALVES, S. B.; HOLANDA, F. S. R.; CUNHA FILHO, M.; GOMES FILHO, R. R.; PEDROTTI, A.; ARAÚJO FILHO, R. N. Carbon dynamics in humic fractions of soil organic matter under different vegetation cover in southern Tocantins. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 28, n. 2, p. e20200024, 2021.

MARTINS, D. A.; JAKELAITIS, A.; PEREIRA, L. S.; MOURA, L. M. F.; GUIMARÃES, K. C. Intercropping Between Corn and *Urochloa brizantha* Managed with Mesotrione Underdoses. **Planta daninha**, Viçosa, v. 37, e019186923, 2019.

MATTEI, E.; OLIVEIRA, P. S. R. de; RAMPIM, L.; EGEWARTH, J. F.; REGO, C. A. R. de M.; PIANO, J. T.; HERRERA, J. L. de. Remaining straw and release of nutrients from oat managed in integrated crop-livestock. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 34, supplement 1, p. 206-215, 2018.

MCCARTHY, P. The principles of humic substances. **Soil Science**, Amsterdam, v. 166, p. 738-751, 2001.

MENDES, I. C.; FERNANDES, M. F.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. Biological functioning of brazilian cerrado soils under different vegetation types. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 359, p. 183-195, 2012.

MENDES, I. de C.; SOUSA, D. M. G. DE; REIS JUNIOR, F. B. DOS; LOPES, A. A. de C. **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2018a. 23 p. URL: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199833/1/CircTec-38-IedaMendes.pdf>

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G. ; REIS JUNIOR, F. B. DOS ; LOPES, A. de C. A. **Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos.** Boletim Informativo (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo), v. 44, p. 20-25, 2018b.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises.** Viçosa, MG: UFV, 2005. 107 p.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M. ANDREOTTI, M., PARIZ, C. M.; YANO, É. H.; PEREIRA, F. C. B. L. Liberação de nutrientes da palhada de forrageiras consorciadas com milho e sucessão com soja. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 183 - 193, 2015.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, F. C. B. L.; LIMA, R. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; YANO, E. H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras, milho em sucessão com soja em região de cerrados **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 251-9, 2013.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A. *et al.* **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais.** 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.1-5.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MEA. **Ecosystems and human well-being: Synthesis.** Washington: Island Press, 2005. 137p.

MILORI, D. M. B. P.; MARTIN-NETO, L.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; BAGNATO, V. S. Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy. **Soil Science**, Philadelphia, v. 167, p.739-749, 2002.

MODESTO, V. C.; ANDREOTTI, M.; NAKAO, A. H.; SOARES, D. A.; FROIO, L. L.; DICKMANN, L.; PASCHOALOTO, I. M.; FERNANDES, I. M. M. Yield and production components of corn under straw of Marandu palisade grass inoculated with *Azospirillum brasilense* in the low-land Cerrado. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 1-4, 2021.

MODESTO, V. C.; ANDREOTTI, M.; SABBAG, O. J.; SOARES, D. A.; PECHOTO, E. A. P.; PASCHOALOTO, I. M.; NAKAO, A. H. Economic analysis of the corn intercropped with Marandu grass as a function of *Azospirillum brasilense* application. **Journal of Agricultural Science**, Ontario, v. 11, p. 387, 2019.

MORAES, G. M.; XAVIER, F. A. S.; MENDONCA, E. S.; ARAUJO FILHO, J. A.; OLIVEIRA, T. S. Chemical and structural characterization of soil humic substances under agroforestry and conventional systems. **Brazilian Journal of Soil Science**, Viçosa, v. 35, p. 1597– 1608, 2011.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** 2ª ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729p.

MOREIRA, W. H., TORMENA, C. A., JUNIOR, E. B., PETEAN, L. P., ALVES, S. J. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1315-1326. 2014.

MORETI, D.; ALVES, M. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; CARVALHO, M. P. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubações e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 167-175, 2007.

MOITINHO, M. R.; LA SCALA JUNIOR., N.; PANOSSO, A. R.; BICALHO, E. S.; TEIXEIRA, D. B.; FERRAUDO, A. S.; FERRARI, B.; MUI, T. S.; MARCONDES, J.; BARBOSA, M. A.; CANNAVAN, F. S. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO₂ emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. **Catena**, Netherlands, v. 196, p. 104903, 2021.

MOTT, G. O.; LUCAS, H. L. The design, conduct, and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In: International Grassland Congress, 6., State College, 1952. **Proceedings**. State College, State College Press, 1952. p. 1380-1385.

NAVARRETE, I. A.; TSUTSUKI, K. Land-use impact on soil carbon, nitrogen, neutral sugar composition and related chemical properties in a degraded Ultisol derived from volcanic materials in Leyte, Philippines. **Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 54, p. 321–331, 2008.

NEU, V. **Influência da cobertura vegetal na ciclagem de nutrientes via solução do solo na região de Manaus**. 2005. 93f. (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, Piracicaba-SP.

OENEMA, O. Calculated rates of soil acidification of intensively used grassland in the Netherlands. **Fertilizer Research**, v. 26, p. 217 –228, 1990.

OGLE, S. M.; ALSAKER, C.; BALDOCK, J.; BERNOUX, M.; BREIDT, F. J.; MCCONKEY, B. REGINA, K.; VAZQUEZ-AMABILE, G. G. Climate and soil characteristics determine where no-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions. **Scientific Reports**, Berlin, v. 9, n. 11665, p. 1-8, 2019.

PACHECO, L. P.; BARBOSA, J. M.; LEANDRO, W. M.; MACHADO, P. L. O. A.; ASSIS, R. L. DE; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura e produtividade de soja e arroz em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 9, p.1228-1236, 2013.

PARIZ, C.M. ANDEOTTI, M.; BUZETTI, S.; BERGAMASCHINE, F. A.; ULIAN, N. A.; FURLAN, L. C.; MEIRELLES, P. R. L.; CAVASANO, F. A. Straw decomposition of nitrogen-fertilized grasses intercropped with irrigated maize in an integrated crop livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 2029 - 2037, 2011.

PARIZ, C.M; ANDREOTTI, M.; AZENHA, M.V.; BERGAMASCHINE, A.F.; MELLO, L.M.M. de ; LIMA, R.C. Massa seca e composição bromatológica de quatro espécies de braquiárias semeadas na linha ou a lanço, em consórcio com milho no sistema plantio direto na palha. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 147-154, 2010.

PARTELLI, F. L.; VIEIRA, H. D.; FERREIRA, E. P. B.; VIANA, A. P.; MARTINS, M. A.; URQUIAGA, S. Chemical and microbiological soil characteristics under conventional and organic coffee production systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 43, n. 5, p. 847-864, 2012.

PASCOALOTO, I. M.; ANDREOTTI, M.; CRUZ, S. S. DA.; SABBAG, O. J.; BORGHI, E.; LIMA, G. C. DE; MODESTO, V. C. Economic analysis of sorghum consortia with forages or with dwarf pigeon pea succeeded by soybean or corn. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 10, p. 833-840, 2017.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil Microbiology and Biochemistry**. San Diego: Academic Press, 1989. 273p.

PAUL, E. A., COLLINS, H. P., LEAVITT, S. W. Dynamics of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring ¹⁴C abundance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 104, p. 239–256, 2001.

PAVINATO, P. S.; SOLTANGHEISI, M. R. M. A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A. Effects of cover crops and phosphorus sources on maize yield, phosphorus uptake, and phosphorus use efficiency. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, n. 3, p. 1039-1047, 2017.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R. DA; NOVAIS, R. F. DE; MENDONÇA, E. de S.; GEBRIM, F.; MOREIRA, F. F. Fluxo difusivo e biodisponibilidade de zinco, cobre, ferro e manganês no solo: influência da calagem, textura do solo e resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 859-868, 2006.

PEGORARO, R. F.; MOREIRA, C. G.; DIAS, D. G.; SILVEIRA, T. C. Carbon and nitrogen stocks in the soil and humic substances of agricultural crops in the semi-arid region. **Revista Ciencia Agronomica**, Fortaleza, v. 49 n. 4, p. 574-583, 2018.

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 508-514, 2010.

PIANO, J. T.; MORAES REGO, C. A. R.; VENGEM, A. P.; EGEWARTH, J. F.; EGEWARTH, V. A.; MATTEI, E.; OLIVEIRA, P. S. R.; HERRERA, J. L. Soil organic matter fractions and carbon management index under integrated crop-livestock system. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 36, n. 3, p. 743-760, 2020.

PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances. A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. **Advances in Agronomy**, New York, v. 75, p. 57–134, 2002.

PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances. **Soil Science**, Madison, v. 166, p. 810-832, 2001.

PICCOLO, A.; CONTE, P.; SPACCINI, R.; MBAGWU, J. S. C. Influence of land use on the characteristics of humic substances in some tropical soils of Nigeria. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 56, p. 343–352. 2005.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ), **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 731-737, 2004.

- POSSAMAI, E. J.; CONCEIÇÃO, P. C.; STUMPF, L.; PAIER, C. D.; ROSA, J. K. DA; ADAMI, P. F. Long term crop-livestock managements on physical soil attributes and total organic carbon. **Journal of Agricultural Studies**, Las Vegas, Nevada, v. 9, n. 1, p. 77, 2021.
- POST, W. M.; MANN, L. K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation, A.F. Bowman (Ed.), **Soils and the Greenhouse Effect**, John Willey and Sons, West Sussex, p. 401-406, 1990.
- PURWANTO, B. H.; ALAM, S. Impact of intensive agricultural management on carbon and nitrogen dynamics in the humid tropics, **Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 66, n. 1, p. 50–59, 2020.
- RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.
- RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 284p.
- RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação IAC, 1996. 255p. (Boletim técnico, 100).
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1609-1623, 2007.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 14, n. 27, p. 29-48, 2003.
- RIGO, A. Z.; CORRÊA, J. C.; MAFRA, Á. L.; HENTZ, P.; GROHSKOPF, M. A.; GATIBONI, L. C.; BEDENDO, G. Phosphorus fractions in soil with organic and mineral fertilization in integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 43, e0180130, 2019.
- RODRIGUES, M.; WITHERS, P. J. A.; SOLTHANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil & Tillage Research**, Netherlands, v. 205, 104770, 2021.
- ROSA, D. M.; NÓBREGA, L. H. P. ; MAULI, M. M ; PICCOLO de LIMA, G. ; PACHECO, F. P. Humic substances in soil cultivated with cover crops rotated with maize and soybean. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 2, p. 221-230, 2017.
- ROSA, R.; SANO, E. E.; ROSENDO, J. DOS S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do rio Paranaíba. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 333-351, 2014.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. . Organic matter and soil aggregation in agricultural systems with different adoption times. **Semina. Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 6, p. 3443-3459, 2019.

ROSSET, J. S.; LANA, M. DO C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; LEANDRO RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1529-1538, 2016.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIACOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia**, Campinas v. 70, n. 3, p. 622-630, 2011.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de braquiária, sorgo e soja em áreas de plantio direto no cerrado goiano. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, p. 1523-1534, 2013.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIACOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações lábeis da matéria orgânica do solo em sistema de cultivo com palha de braquiária e sorgo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, p. 38-46, 2012.

ROZANE, D. E.; CENTURION, J. F.; ROMUALDO, L. M.; TANIGUCHI, C. A. K.; TRABUCO, M.; ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, Uberlândia v. 26, p. 24-32, 2010.

ROUSK. J., HILL, P. W.; JONES, D. L. Priming of the decomposition of ageing soil organic matter: Concentration dependence and microbial control. **Functional Ecology**, United Kingdom, v. 29, n. 2, p. 285–296. 2015.

SÁ, J. C. de M.; TIVET, F.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z.; SANTOS, J. B. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, Netherlands, v. 136, p. 38-50, 2014.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 70-79, 2014.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 11-21, 2008.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. 6p. (Comunicado Técnico, 198)

SANT'ANNA, S. A. C.; FERNANDES, M. F.; IVO, W. M. P. M.; COSTA, J. L. S. Evaluation of soil quality indicators in sugarcane management in sandy loam soil. **Pedosphere**, v. 19, n. 3, p. 312-322, 2009.

SANTOS, D. C.; FARIAS, M. O.; LIMA, C. L. R.; KUNDE, R. J.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo

Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 5, p. 838–844, 2013.

SANTOS H. P.; FONTANELI R. S.; SPERA S. T.; DREON G. Fertilidade, teor de matéria orgânica do solo em sistemas de produção com integração lavoura, pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, p. 474-82. 2011.

SANTOS, D. C.; LIMA, C. L. R.; KUNDE, R. J.; CARVALHO, J. S.; ABEIJON, L. M.; PILLON, C. N. Agregação e proteção física da matéria orgânica em planossolo háplico sob diferentes sistemas de manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, Supplement 1, p. 54-63, 2012.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 353p.

SANTOS, C. A. DOS; KRAWULSKI, C. C.; BINI, D. GOULART FILHO, T.; KNOB, A.; MEDINA, C. C.; ANDRADE FILHO, G.; NOGUEIRA, M. A.; Reclamation status of a degraded pasture based on soil health indicators. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, p. 195-202, 2015.

SANTOS, F. C. DOS; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; FOLONI, J. M., ALBUQUERQUE FILHO, M. R. DE; KER, J. C. Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v. 32, n. 5, p. 2015-2025, 2008.

SANTOS, L. N. S.; PASSOS, R. R.; SILVA, L. V. M.; OLIVEIRA, P. P.; GARCIA, G. O.; CECÍLIO, R. A. Avaliação de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho amarelo sob diferentes coberturas vegetais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, p. 940-947, 2010.

SANTOS, C. A.; REZENDE, C. D. P.; PINHEIRO, É. F. M.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, p. 394-401, 2019.

SANTOS, U. J.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; MARQUES, M. C.; SOUZA, E. S. D.; BROSSARD, M.; HAMMECKER, C.; Land use changes the soil carbon stocks, microbial biomass and fatty acid methyl ester (FAME) in Brazilian semiarid area. **Archives of Agronomy and Soil Science**, United Kingdom, v. 65, p. 755-769, 2019.

SARMENTO, P.; RODRIGUES, L. R. de A.; LUGÃO, S. M. B.; CRUZ, M. C. P. DA; CAMPOS F. P. DE; FERREIRA, M. E.; OLIVEIRA, R. F. DE. Sistema radicular do *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio adubado com nitrogênio e submetido à lotação rotacionada. **Revista Brasileira de Zootecnia** [online]. Viçosa, v. 37, n. 1, p. 27-34, 2008.

SARTO, M. V.; BORGES, W. L.; SARTO, J. R.; PIRES, C. A.; RICE, C. W.; ROSOLEM, C. A. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, Netherlands, v. 145, p. 1-11, 2020.

SCHENK, H. J.; JACKSON, R. B. Rooting depths, lateral root spreads, and belowground/aboveground allometries of plants in water limited ecosystems. **Journal of Ecology**, London, v. 90, p. 480-494, 2002.

SCHMIDT, M. W. I.; TORN, M. S.; ABIVE, S.; DITTIMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLEBER, M.; KOGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D. A. C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, Cambridge, v. 478, p. 49– 56, 2011.

SEKI, A. S.; SEKI, F. G.; JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A.; BENEZ, S. H. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 460-468, 2015.

SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E. P.; LA SCALA, N.; DIAS, C. T. S.; CERRI, C. C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 8, n. 1, p. 1–8, 2013.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007 p.

SILVA, J. R.; SILVA, D. J.; GAVA, C. A. T.; OLIVEIRA, T. C. T.; FREITAS, M. S. C. Carbon in humic fractions of organic matter in soil treated with organic composts under mango. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, n. 1, p. 1-11, 2016.

SINGH, K. A. Effect of nitrogen levels on yield, root biomass distribution, nitrogen recovery by forage grasses and changes in soil properties of acid Inceptisol. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 69, n. 8, p. 551-554, 1999.

SISTI, C. P. J.; DOS SANTOS, H. P.; KOCHHANN, R. A.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; and BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Netherlands, n. 76, p. 39–58, 2004.

SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, n. 241, p. 155–176 2020.

SMALLA, K.; WIELAND, G.; BUCHNER, A.; ZOCK, A.; PARZY, J.; KAISER, S.; ROSKOT, N.; HEUER, H.; BERG, G. Bulk and rhizosphere soil bacterial communities studied by denaturing gradient gel electrophoresis: Plant-dependent enrichment and seasonal shifts revealed. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 67, p. 4742–4751, 2001.

SNAJDR, J.; DOBIÁSOVÁ, P.; URBANOVÁ, M.; PETRÁNKOVÁ, M.; CAJTHAML, T.; FROUZ, J.; BALDRIAN, P. Dominant trees affect microbial community composition and activity in post-mining afforested soils. **Soil Biology & Biochemistry**, England, v. 56, p. 105115, 2013.

SOUZA, E. D. DESILVA, C. R. M. DA; PINTO, F. A.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; PACHECO, L. P.; TERRA, F. D.; LAROCA, J. V. DOS S. Soil quality indicators after

conversion of “murundu” fields into no-tillage cropping in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.54, e0037, 2019.

SOUZA, W. J. O.; MELO, W. J. Teores de nitrogênio no solo e nas frações da matéria orgânica sob diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 885-896, 2000.

SOLEIMANI, A.; HOSSEINI, S. M.; BAVANI, A. R. M.; JAFARI, M. FRANCAVIGLIA, R. Influence of land use and land cover change on soil organic carbon and microbial activity in the forests of northern Iran. **Catena**, Netherlands, v. 177, p. 227-237, 2019.

SPACCINI, R., PICCOLO, A., HABERHAUER, G., GERZABEK, M. Transformation of organic matter from maize residues into labile and humic fractions of three European soils as revealed by ¹³C distribution and CPMAS-NMR spectra. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 51, p. 583–594, 2006.

SPERA, S. T.; SANTOS H. P.; FONTANELI R.S.; TOMM G. O.; Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, p. 37-44. 2010

STEVERSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2 ed New York: John Wiley, 1994. 496p.

STIEVEN, A. C.; OLIVEIRA, D.A.; SANTOS, J.O.; WRUCK, F.J.; CAMPOS, D.T.S. Impacts of integrated crop-livestock-forest on microbiological indicators of soil. **Agrária**, Recife, v. 9, n. 1, 53-58, 2014.

SPACCINI, R.; PICCOLO, A.; HABERHAUER, G.; GERZABEK, H. Transformation of organic matter from maize residues into labile and humic fractions of three European soils as revealed by ¹³C distribution and CPMAS-NMR spectra. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 51, p. 583 – 594, 2000.

ŠPOLJAR, A.; KVATERNJAK, I.; ŽIBRIN, D.; MUŽIĆ, M. Utjecaj uzgoja kukuruza (*Zea mays* L.), soje (*Glycine max*. L.) I uljane repice (*Brassica napus* L.) Na električnu provodljivost i reakciju tla. **Agronomski Glasnik**, Yugoslavia, v. 81, n. 2, p. 65-76, 2019.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; FERNANDES, F. F.; SUZUKI, L. E. A. S.; SILVA, T. S; PINTO, L. F. S; LIMA, C. L. R. Perennial grasses for recovery of the aggregation capacity of a reconstructed soil in a coal mining area in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 38, v. 1, p. 327-335, 2014.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S.; PINTO, M. A. B.; DUTRA JUNIOR, L. A.; SCHEUNEMANN, T. Sistema radicular da *Urochloa brizantha*: desenvolvimento e influência nos atributos de um solo degradado. **Interciencia (Caracas)**, Venezuela, v. 45, p. 334-339, 2016.

ŠTURSOVÁ, M.; BALDRIAN, P. Effects of soil properties and management on the activity of soil organic matter transforming enzymes and the quantification of soilbound and free activity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 338, p. 99-110, 2011.

SULC, R. M.; FRANZLUEBBERS, A. J. Exploring integrated crop–livestock systems in different ecoregions of the United States. **European Journal of Agronomy**, Netherlands, v. 57, p. 21-30. 2014.

SUTTON, R.; SPOSITO, G. Molecular structure in soil humic substance: new view. **Environmental Science and Technology**, v. 39, p. 9009–9016, 2005.

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society American, 1996. p.1011-1020. (SSA book series, 5).

TAVARES, R. L. M.; NAHAS, E. H. fractions of forest, pasture and maize crop soils resulting from microbial activity. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 45, n. 3, p. 963-969, 2014.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology: the physics of irrigated and nonirrigated soils**. San Francisco: W. H. Freeman, 1972. 532 p.

TELLES, E. D. C.; CAMARGO, P. B. DE; MARTINELLI, L. A.; TRUMBORE, S. E.; DA COSTA, E. S.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N.; OLIVEIRA, R. C. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia, **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 17, n. 2, p. 1040, 2003.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 3, p. 437-445, 2011.

TREVISAN, S.; FRANCIOSO, O.; QUAGGIOTT, S.; NARDI, S. Humic substances biological activity at the plant-soil interface. **Plant Signalling and Behaviour**, v. 5, n. 6, p. 635-643, 2010.

VARVEL, G. E. Rotation and nitrogen fertilization effects on changes in soil carbon and nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 319-325, 1994.

VELTHOF, G. L.; BAROT, S.; BLOEM, J.; BUTTERBACH-BAHL, K.; de VRIES, W.; KROS, J.; LAVELLE, P.; OLESEN, J. E.; OENEMA, O. Nitrogen as a threat to European soil quality - Chapter 21. In SUTTON, M. A.; HOWARD, C. M.; ERISMAN, J. W.; BILLEN, G.; BLEEKER, A.; GRENNFELT, P., VAN GRINSVEN, H.; GRIZZETTI, B. (Eds.). **The European Nitrogen Assessment. Sources, effects and policy perspectives**. Cambridge: Cambridge University Press (Nitrogen in Europe); 2011. p. 495-510.

VENDRAMINI, J. M. B.; DUBEUX JR J. C. B.; SILVEIRA, M. L. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 9, n. 2, p. 308-315, 2014.

WANG, S.; MULLIGAN, C. N. Enhanced mobilization of arsenic and heavy metals from mine tailings by humic acid. **Chemosphere**, Nova York, v. 74, p. 274-279, 2010.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; ALVARENGA, R. C. Organic- matter pools of soil under pines and annual cultures. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 41, p. 1707-1722, 2010.

XU, X., THORNTON, P. E. e POST, W. M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. **Global Ecology and Biogeography**, Arizona, v. 22, n. 6, p. 737–749, 2013.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, York, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

YUKICEVICH, E.; LOWERY, T.; BOWEN, P.; ÚRBEZ-TORRES, J. R.; HART, M. Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Netherlands, v. 36, p. 48-62, 2016.

ZINN, Y. L.; MARRENJO, G. J.; SILVA, C. A. Soil C:N ratios are unresponsive to land use change in Brazil: A comparative analysis. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 255, p. 62-72, 2018.

ZOTARELLI, L.; ZATORRE, N. P.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; FRANCHINI, J. C.; ALVES, B. J. R. Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research**, Netherlands, v. 132, p. 185–195. 2012.