

JUSLEI FIGUEIREDO DA SILVA

**FÍSICA DO SOLO E MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO
AGRÍCOLA DE CERRADO**

Botucatu

2020

JUSLEI FIGUEIREDO DA SILVA

**FÍSICA DO SOLO E MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO
AGRÍCOLA DE CERRADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Juliano Carlos
Calonego

Coorientador: Dr. Emerson Borghi

Botucatu

2020

S586f

Silva, Juslei Figueiredo da

Física do solo e matéria orgânica em sistemas de produção agrícola de cerrado / Juslei Figueiredo da Silva. -- Botucatu, 2020
103 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Juliano Carlos Calonego

Coorientador: Emerson Borghi

1. Semeadura direta. 2. Urochloa. 3. Substâncias húmicas. 4.
Qualidade do solo. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: FÍSICA DO SOLO E MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA DE CERRADO

AUTORA: JUSLEI FIGUEIREDO DA SILVA

ORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO

COORDENADOR: EMERSON BORGHI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES
Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. EDEMAR MORO
Agronomia / Universidade do Oeste Paulista

Pesquisador Dr. WANDER LUÍS BARBOSA BORGES
Centro de Seringueira e Sistemas Agroflorestais / Instituto Agronômico de Campinas

Prof. Dr. TIAGO ARANDA CATUCHI
Agronomia / Universidade do Oeste Paulista

Botucatu, 29 de maio de 2020

*Aos meus pais, Lúndinalva e Nildo,
Por todo o carinho e incentivo nesta trajetória,
Pelo esforço para que eu chegasse até aqui.
E ao meu noivo Igor,
Por estar ao meu lado, participando desta conquista.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, por tudo o que sou e tenho, pelas oportunidades e boas pessoas que encontrei no meu caminho, por me fortalecer nos momentos difíceis acalmando o meu coração.

Aos meus pais pelo apoio incondicional, pelo exemplo de fé e determinação. Por lutarem para que os filhos estudassem, pela ajuda financeira e emocional, por chorarem comigo e também por comemorarem cada novo passo meu com muita alegria e fé.

Aos meus irmãos, Geslane Figueiredo da Silva Santana e Elenilson Figueiredo da Silva, e ao meu cunhado Jackson Santana de Araújo, pelo incentivo, conselhos, amizade e apoio.

Ao meu noivo Igor Vilela Cruz, que sempre esteve ao meu lado nessa fase, pela ajuda no laboratório de dia, à noite e aos finais de semana e feriados, e em todos os momentos em Botucatu, pelo carinho, amor e paciência.

Ao Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego, pela orientação durante esses anos de doutorado, por todo o conhecimento compartilhado, ensinamentos, paciência e exemplo de professor e profissional.

Ao Dr. Emerson Borghi, coorientador nesta pesquisa, pelas correções e importantes sugestões no texto da tese e ajuda com as coletas de solo.

Ao Caio Vilela Cruz e Fernanda Gabriela de Oliveira, pelos bons momentos compartilhados, pelos cafezinhos nos fins de tarde, boas conversas e muitas risadas que alegraram meus dias em Botucatu.

Aos colegas de doutorado Hugo Motta, Michely Alves, Gustavo Ferreira, Erilene Romeiro Alves, Lydía Helena Motta e Douglas Crespam pela ajuda e amizade durante esta trajetória, por serem companhia quando nós nos encontrávamos distantes dos familiares.

À Nídia Costa, uma grande amiga que conheci em Botucatu, pela amizade sincera e pela boa vontade em me ajudar sempre que recorri à ela.

À minha amiga desde a adolescência, Tatiane Cristine Pires, pelo apoio em todos os momentos mesmo tão distante, pela amizade sincera, e por todas as palavras reconfortantes nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos do coração, Adriely Figueiredo Ricci e Gleyson Figueiredo Ricci, pela amizade e pelas palavras de ânimo.

Aos meus sogros, Lilia Marcia Vilela Cruz e Paulo Cruz, e a tia Sônia Maria Marques Vilela, por todo o carinho, compreensão e ajuda durante o decorrer do curso de doutorado. Pelas palavras de força e pelo exemplo de determinação e trabalho.

Ao Antonio Luiz Neto Neto e Gessí Ceccon, por me incentivarem a cursar o Doutorado e pelo exemplo de profissionais e amigos, com os quais aprendi muito no decorrer da minha vida acadêmica.

À Unesp de Botucatu e ao Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal pela oportunidade de estudo e pela estrutura para realização das análises.

À Embrapa Milho e Sorgo, na pessoa do pesquisador Dr. Miguel Marques Gontijo e Dr. Emerson Borghi pela recepção em Sete Lagoas-MG, pelo apoio durante as coletas de solo e por todas as informações e dados compartilhados para a realização desta pesquisa.

Aos colegas Eduardo Simão, Zé Paulo Costa Ferreira e Dilherme Lucio Oliveira pela ajuda nas coletas das amostras em março de 2017, contribuindo, dessa forma, para que este trabalho se concretizasse.

Aos membros da banca examinadora pelas sugestões, considerações e contribuições feitos ao trabalho.

À Fundação Agrisus pelo apoio financeiro concedido (Projeto 2038/17).

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

A busca pela realização profissional deve ser constante, não só com objetivo de satisfazer o lado pessoal, mas visando sempre retribuir à sociedade aquilo que aprendemos, na expectativa de contribuir para o aperfeiçoamento e melhoria dos sistemas produtivos brasileiros para a presente e as futuras gerações.

Juslei Figueiredo da Silva.

RESUMO

Em condições de clima tropical de Cerrado ocorre rápida decomposição dos resíduos vegetais e o período seco dificulta o estabelecimento de culturas na entressafra. Por isso, nessas regiões, plantas forrageiras têm viabilizado o sistema de semeadura direta, mantendo o solo coberto no período seco, aportando resíduos vegetais, que auxiliam na cobertura e estruturação do solo. O objetivo desta pesquisa foi avaliar atributos físicos do solo e a matéria orgânica em diferentes sistemas de produção no Cerrado, envolvendo o cultivo de *Urochloa brizantha* cv. Piatã, em monocultivo ou em sucessão com as culturas de soja e milho. A pesquisa foi conduzida durante a safra 2016/17 na Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas-MG, em Latossolo Vermelho-escuro A moderado, textura muito argilosa, fase cerrado subcaducifólio, relevo suave ondulado. O experimento foi implantado na safra 2010/2011. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com três repetições e parcelas de 168 m². Os tratamentos foram constituídos por nove sistemas de produção e uma área de mata nativa (Cerrado), sendo eles: 1- Milho solteiro em sucessão anual (M); 2- Milho consorciado com *U. brizantha* cv. Piatã em sucessão anual (MP); 3- Soja em sucessão anual (S); 4- Pastagem de Piatã implantada em cultivo solteiro (P); 5- Consórcio Milho+Piatã e Soja em rotação anual (MP/S); 6- Sequência de consórcio Milho+Piatã e Pastagem de Piatã em rotação anual (MP/P); 7- Sequência de consórcio Milho+Piatã e pastagem de Piatã por dois anos (MP/P/P); 8- Sequência de consórcio Milho+Piatã, pastagem de Piatã e Soja em rotação anual (MP/P/S); 9- Sequência de Soja, consórcio Milho+Piatã e pastagem de Piatã por dois anos em rotação (S/MP/P/P); 10- Cerrado nativo. Foram realizadas amostragens de solo para análises de C e N, fracionamento físico e químico da MOS e física do solo. Os sistemas de produção influenciaram o carbono orgânico total (COT) e os atributos físicos do solo, principalmente nas camadas superficiais, levando a alterações na qualidade da MOS. O COT foi em média 15% (MP, MP/S e MP/P) a 31% (S) menor que no CE, para a camada 0,0-0,20 m. O IMC nas áreas cultivadas ficou abaixo da área referência em 0,0-0,10 m, e houve aumento neste índice conforme o aumento de profundidade. O índice S demonstrou boa qualidade estrutural do solo, porém houve menor retenção de água no solo nos monocultivos de S e M. Para o Cerrado de Minas Gerais, a utilização

da forrageira *U. brizantha* cv. Piatã na sucessão de culturas em sistemas de produção sob SSD contribui para melhorias na qualidade do solo.

Palavras-chave: Semeadura direta. *Urochloa*. Substâncias húmicas. Qualidade do solo.

ABSTRACT

Under conditions of tropical Cerrado climate, rapid decomposition of plant residues occurs and the dry season makes it difficult to establish crops in the off-season. For this reason, in these regions, forage plants have made the direct seeding system viable, keeping the soil covered in the dry period, providing vegetable residues, which help in covering and structuring the soil. The objective of this research was to evaluate physical attributes of the soil and organic matter in different production systems in the Cerrado, involving the cultivation of *Urochloa brizantha* cv. Piatã, in monoculture or in succession with soybean and corn crops. The research was conducted during the 2016/17 harvest at Embrapa Corn and Sorghum in Sete Lagoas-MG, in a moderate dark red Latosol, very clayey texture, subcaduciferous cerrado phase, smooth wavy relief. The experiment has been conducted in no-till since 2010. The experimental design is in randomized blocks with three replications and plots of 168 m² (12 x 14 m). The treatments constitute nine production systems and an area of native forest (Cerrado), which are: 1- Single corn in annual succession (M); 2- Corn intercropped with *U. brizantha* cv. Piatã in annual succession (MP); 3- Soy in annual succession (S); 4- Pasture of *U. brizantha* cv. Piatã implanted in single cultivation (P); 5- Consortium Corn + Piatã and Soy in annual rotation (MP/S); 6- Consortium sequence Corn + Piatã and Piatã Pasture in annual rotation (MP/P); 7- Consortium sequence Corn + Piatã and pasture of Piatã for two years (MP/P/P); 8- Consortium sequence Corn + Piatã, pasture of Piatã and Soy in annual rotation (MP/P/S); 9- Soybean sequence, Corn + Piatã consortium and Piatã pasture for two years in rotation (S/MP/P/P); 10- Native Cerrado. Soil samplings were carried out for total C and N analyzes, soil C/N ratio, and organic matter through physical and chemical fractionation. The production systems influenced the organic carbon (SOC) and the physical attributes of the soil, mainly in the superficial layers, leading to changes in the quality of organic matter (SOM). The SOC was on average 15% (MP, MP/S and MP/P) at 31% (S) lower than in the CE, for the layer 0.0-0.20 m. The carbon management index (CMI) in the cultivated areas was below the reference area at 0.0-0.10 m, and there was an increase in this index as the depth increased. The S index showed good structural quality of the soil, even so there was less water retention in the soil in the monocultures of S and M.

For the Cerrado of Minas Gerais, the use of forage *U. brizantha* cv. Piatã in the succession of crops in production systems under SSD contributes to improvements in soil quality.

Keywords: No-till. *Urochloa*. Humic substances. Soil quality.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	Agricultura conservacionista	19
2.2	Espécies forrageiras na rotação de culturas	21
2.3	Importância da matéria orgânica em solos tropicais	23
2.4	Estrutura do solo como fator determinante da produtividade agrícola.....	28
2.5	Influência das rotações de culturas com forrageiras na matéria orgânica do solo e na estruturação do solo	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Localização, histórico e caracterização da área experimental.....	34
3.2	Tratamentos e delineamento experimental	35
3.3	Condução da área experimental	38
3.4	Coleta de amostras de solo	39
3.4.1	Coleta de amostras deformadas de solo.....	39
3.4.2	Coleta de amostras indeformadas de monólitos de solo	40
3.4.3	Anéis volumétricos	40
3.5	Análises de solo	41
3.5.1	Carbono orgânico total e nitrogênio total do solo	41
3.5.2	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo e índice de manejo de carbono (IMC).....	41
3.5.3	Fracionamento químico da matéria orgânica do solo.....	43
3.5.4	Física do solo.....	45
3.5.4.1	Estabilidade de agregados em água	45
3.5.4.2	Porosidade total, macro e microporosidade	47
3.5.4.3	Curva característica de retenção de água no solo e índice S	47
3.6	Análise estatística	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Carbono orgânico e nitrogênio totais do solo e fracionamento físico da matéria orgânica	50
4.1.1	Índices de carbono	55
4.2	Fracionamento químico da matéria orgânica do solo.....	59

4.3	Física do solo.....	64
4.3.1	Estabilidade de agregados	64
4.3.2	Densidade e porosidade do solo.....	67
4.3.3	Curva característica de retenção de água no solo e índice S.....	71
4.4	Análise de componentes principais.....	74
5	CONCLUSÕES	78
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICES.....	101

1 INTRODUÇÃO

A agricultura conservacionista tem se fundamentado na busca por melhoria da qualidade do solo visando a sustentabilidade do sistema produtivo, mantendo e/ou elevando a produtividade de grãos e forragem (RAIJ, 2008; CARDUCCI et al., 2015).

Contudo nas áreas de Cerrado do Brasil, as condições climáticas constituem um dos problemas enfrentados pelos produtores rurais, em razão dos frequentes veranicos que ocasionam redução e perda de produtividade das culturas. Ademais, em algumas regiões, como no Cerrado de Minas Gerais, a restrição hídrica pode limitar o cultivo das espécies no período de entressafra, ou seja, no outono/inverno (CARDUCCI et al., 2015).

Nessas condições os desafios para incremento da matéria orgânica do solo (MOS) são maiores, pois as temperaturas médias elevadas aumentam a atividade microbiana, de forma a acelerar o processo de decomposição dos resíduos vegetais causando perda de carbono (C) na forma de CO₂, assim é necessário um elevado e constante aporte de matéria seca e C ao solo (ALVES et al., 2008). Neste cenário, espécies forrageiras, como as braquiárias, podem assumir essa função, com alta produção de fitomassa aérea e radicular, principalmente em solos sem limitações físicas e químicas.

Condições adequadas em relação à física do solo, às condições hídricas e quanto aos teores de matéria orgânica do solo, são importantes fatores para o alcance do pleno desenvolvimento das plantas cultivadas. Por isso, sistemas de produção que proporcionem melhorias da qualidade estrutural do solo e que favoreçam o desenvolvimento radicular em profundidade, proporcionam às plantas melhor aproveitamento da água disponível, além do incremento nos teores de C no solo (CARDUCCI et al., 2015).

A MOS possui importante papel nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e, em razão disso, o estudo das suas frações lábeis e recalcitrantes têm sido utilizado como um indicador de qualidade do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005; SILVA; MENDONÇA, 2007; SOUZA et al., 2018).

O estudo dos atributos do solo ao longo do tempo de adoção de determinada prática de manejo permite quantificar a magnitude e duração das alterações que foram provocadas no agroecossistema (SILVEIRA et al., 2011). Através desses atributos é

possível estabelecer a ocorrência de degradação ou melhoria da qualidade do solo (REICHERT et al., 2009; NICODEMO et al., 2018).

Nesse sentido, o consórcio e sucessões de culturas produtoras de grãos e plantas forrageiras, podem contribuir no aporte de matéria orgânica, conservação da água no solo, melhorias nas condições físicas, químicas e biológicas do perfil do solo, e no crescimento das raízes em profundidade, principalmente em sucessão ao cultivo da braquiária, com alto aporte de resíduo vegetal da parte aérea e radicular, auxiliando na cobertura e estruturação do solo.

Dessa maneira, o objetivo da pesquisa foi avaliar atributos físicos do solo e a matéria orgânica em diferentes sistemas de produção conduzidos há sete anos em Sistema Semeadura Direta (SSD) no Cerrado de Minas Gerais, envolvendo o cultivo de *Urochloa brizantha* cv. Piatã, em monocultivo ou em sucessão com as culturas de soja e milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agricultura conservacionista

O aumento da produtividade agrícola com o menor impacto ao meio ambiente é o principal fator para atender a necessidade de alimentação da população mundial. Estima-se que a população mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, com crescimento de dois bilhões de pessoas nos próximos 30 anos (ONU, 2019). Por isso, as pesquisas têm se intensificado em sistemas de produção que busquem esse aumento de produção, mas que estejam também atrelados à conservação dos recursos ambientais.

O Sistema de Semeadura Direta (SSD) é a principal técnica de manejo agrícola relacionada com a conservação do solo, sendo que sua introdução na agricultura foi um dos maiores avanços no processo produtivo brasileiro (ROSA et al., 2011). Com o SSD foi possível expandir o cultivo para a região tropical no Brasil e se conseguiu aumento da eficiência da produção de segunda safra (safra de outono-inverno). Atualmente a área estimada com SSD no Brasil é superior a 38 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2018).

Portanto, o SSD representa um marco na conservação da água e do solo nos sistemas agrícolas, em função dos seus preceitos como o não revolvimento do solo, a rotação de culturas e a manutenção do solo coberto com palhada. Nem sempre esses preceitos são adotados em conjunto, o que coloca em risco a sustentabilidade do sistema.

No Cerrado, o principal desafio para o estabelecimento do SSD é a dificuldade para a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo, em função das altas temperaturas e do período seco, o que dificulta a implantação de uma cultura de entressafra ou de inverno (ALVARENGA et al., 2001). Algumas opções foram desenvolvidas com sucesso: milho em rotação; safrinha de milho; rotação com pastagem e cobertura verde permanente, podendo-se então, recomendar o manejo que melhor se adapte às condições da região (SILVA et al., 2009a).

A indicação sistemática de plantas de cobertura associadas a um sistema de rotação e de sucessão de culturas diversificadas para uso em SSD no Bioma Cerrado, é uma estratégia para acúmulo de palhada na superfície do solo (WUTKE et al., 2014). Porém, para que este sistema seja eficiente, é fundamental um adequado manejo do

solo, com uso de práticas conservacionistas mecânicas, edáficas e vegetativas, entre as quais se destaca o uso de plantas de cobertura (CARVALHO et al., 2015).

A evolução gradativa do SSD está ocorrendo, tendo em vista os benefícios quando comparados aos sistemas convencionais, em termos agronômicos, econômicos e ambientais. Entretanto, nas diversas condições climáticas e edáficas, a consolidação desse sistema é fortemente dependente de culturas adequadas para a produção e manutenção de palhada sobre o solo, dentre algumas culturas promissoras podem ser destacadas as seguintes: milho, milheto, sorgo granífero, sorgo forrageiro e gramíneas forrageiras tropicais (LEITE et al., 2014). Nas regiões mais quentes e de solos menos férteis predomina o cultivo de braquiária, principalmente nos sistemas de integração lavoura-pecuária (MACHADO; VALLE, 2011; FRANCHINI et al., 2014).

Os sistemas de integração lavoura-pecuária podem ser promissores para atender as dificuldades da pecuária tanto como alternativa de recuperação de pastagens degradadas quanto para as lavouras anuais e a consolidação do SSD, pois proporcionam maior produção de palhada, melhoria da qualidade do solo pelo aumento de matéria orgânica, além de aumentar a renda dos produtores, tanto com a atividade de lavoura como da pecuária (LEITE et al., 2014).

As mudanças no uso do solo podem alterar drasticamente a dinâmica do carbono orgânico total e do nitrogênio total, que são fatores chave na regulação das atividades de micro-organismos do solo que controlam o ciclo de nutrientes e a decomposição de resíduos vegetais (MARCHÃO et al., 2009). A implantação do sistema lavoura pecuária (ILP) surge como alternativa conservacionista que visa, tanto a produtividade de grãos como de carne e leite, preconizando a sustentabilidade e preservação das qualidades físicas, químicas e biológicas do solo.

Nas áreas com agricultura convencional, conduzidas com preparo periódico do solo, verifica-se, em sua grande maioria, a ocorrência de degradação do solo com problemas de erosão hídrica, ocasionando perdas de solo e água na propriedade. Neste cenário, a compactação é um problema comum, por causa do intenso tráfego de máquinas, considerado o principal motivo de compactação em áreas agrícolas (FLOWERS; LAL, 1998; SILVA et al., 2011a). A compactação reduz o volume de poros e leva a outros inconvenientes como o menor desenvolvimento radicular (TAVARES FILHO et al., 2001; STONE et al., 2002), o que se reflete em menor exploração do perfil do solo pelas plantas (REICHERT et al., 2007; BERGAMIN et al., 2010) interferindo na absorção de água e nutrientes (TAIZ; ZEIGER, 2013). A infiltração e a

disponibilidade de ar e água para as plantas também são afetadas (BRONICK; LAL, 2005).

2.2 Espécies forrageiras na rotação de culturas

Os restos vegetais constituem fator fundamental para o sucesso do SSD por proporcionar um ambiente mais favorável ao crescimento vegetal e por contribuir para a estabilização da produção ao longo dos anos, assim como para a recuperação ou manutenção da qualidade do solo (ALVARENGA et al., 2001; CRUZ et al., 2004).

Entretanto, os resíduos deixados pela sucessão soja-milho, soja-algodão ou por monocultivos são insuficientes para manter plena cobertura do solo, o que pode levar a compactação e perdas de solo e água, prejudicando o sistema tanto em termos de qualidade quanto em estabilidade química e física (BRÜGGEMANN, 2011; SILVA, 2014).

Nesse sentido, espécies de cobertura, sobretudo gramíneas, têm importante papel na busca pela viabilidade técnica e econômica do SSD nas diferentes regiões do Brasil (SEREIA, 2017), especialmente nas regiões tropicais, em razão da dificuldade de produção na entressafra e da rápida decomposição da biomassa acumulada (JANTALIA et al., 2007; RIGON, 2017), diminuindo a persistência da palha e deixando o solo desprotegido (CHIODEROLI et al., 2012).

Visando o cultivo de espécies vegetais que proporcionem elevada quantidade de palha com relação C/N que favoreça a maior persistência desses resíduos sobre o solo, destaca-se as forrageiras perenes, em cultivo exclusivo e em consórcio com culturas anuais ou com leguminosas (SILVA et al., 2009b).

A introdução de plantas forrageiras capazes de produzir grande quantidade de biomassa, principalmente durante o período seco, tem como objetivo manter o solo coberto o maior tempo possível, proporcionando aumento na diversidade de raízes e de camadas de solo exploradas por estas (CAMPOS et al., 2013; MORO et al., 2013; TIECHER, 2016). Além disso, em função da ciclagem de nutrientes e da conservação do solo, o uso de espécies forrageiras perenes, pode proporcionar maior estabilidade produtiva das culturas em sucessão (COSTA et al., 2012). Dessa maneira, espera-se benefícios à cultura implantada na sequência, em termos de física, biologia e química do solo (KAHLON; CHAWLA, 2017; COLMAN, 2017).

Uma das contribuições do consórcio de culturas com uma espécie forrageira dos gêneros *Urochloa* (Syn. *Brachiaria* spp.) e *Megathyrsus* (Syn. *Panicum* spp.) é o incremento de resíduos sobre o solo, tornando-se uma opção viável para aumentar a sustentabilidade do SSD ao longo dos anos, principalmente em sistemas de cultivo no Cerrado (CECCON et al., 2013).

A produtividade de milho e soja tem sido influenciada de forma positiva quando o cultivo é realizado sobre coberturas do solo (DEBIASI et al., 2010). Ribeiro et al. (2018) estudando cultivos de outono-inverno (*U. ruziziensis*, consórcio de milho com *U. ruziziensis*, milho solteiro e feijão-caupi) verificaram que em condições de veranico pronuncia-se o efeito dos cultivos antecessores de milho safrinha e *B. ruziziensis* no desenvolvimento e nos componentes de produtividade da soja.

Chioderoli et al. (2012) avaliaram três espécies de braquiárias (*Urochloa brizantha*, *U. decumbens* e *U. ruziziensis*) e três modalidades de consórcio das braquiárias com o milho (braquiária na linha de semeadura e misturada com o adubo; braquiária semeada na entrelinha do milho e braquiária na entrelinha do milho semeada junto com o adubo de cobertura). As maiores produtividades de soja foram verificadas após os consórcios com *U. brizantha* semeada na época de adubação de cobertura do milho e sobre *U. decumbens* semeada na linha, resultados relacionados com maiores valores de macroporosidade e porosidade do solo.

O consórcio de forrageiras perenes com milho é uma alternativa de estabelecimento de culturas de cobertura do solo, com o objetivo de produzir grãos de milho e soja em SSD, mantendo o solo permanentemente coberto (CECCON et al., 2009; BATISTA et al., 2011; CONCENÇO et al., 2012; SEREIA et al., 2012; CECCON; BORGHI; CRUSCIOL, 2013). Este sistema proporciona efeitos positivos tanto para a soja quanto para o milho safrinha cultivados em sucessão. Além disso, o uso do consórcio milho-braquiária expressa níveis reduzidos de infestação por plantas daninhas nas safras subsequentes (CECCON et al., 2013; CONCENÇO; SILVA, 2013).

O cultivo de braquiárias, como plantas de cobertura do solo, tem sido uma das tecnologias mais amplamente utilizadas no Cerrado. As braquiárias são consideradas excelentes forrageiras tropicais e tem sido utilizadas para a formação de palha para o SSD ou no sistema de ILP, visando à diversificação da produção agropecuária, com a formação de pastagem e/ou a formação de palhada (KLUTHCOUSKI; STONE, 2003a; MACHADO; ASSIS, 2010; CECCON et al., 2013).

Essas gramíneas, principalmente do gênero *Urochloa brizantha*, apresentam como principais vantagens a disponibilidade de sementes, rusticidade e ampla adaptação em solos de baixa fertilidade e, em ambientes com restrição hídrica. Possuem hábito de crescimento em touceira e elevada produção de palha, com boa eficiência na cobertura da superfície do solo (BOTREL; NOVAIS; ALVIM, 1998; PEREIRA et al., 2016), lenta decomposição de resíduos (TORRES; PEREIRA; FABIAN, 2008; CALONEGO et al., 2012) e capacidade de supressão física das plantas daninhas (BORGES et al., 2014; CONCENÇO et al., 2015), reduzindo o uso de herbicidas pós-emergentes. Diante disso, as braquiárias são alternativas viáveis para o SSD, uma vez que formam grande quantidade de palhada mesmo em condições desfavoráveis ao seu desenvolvimento e são de fácil estabelecimento (BOTREL; NOVAIS; ALVIM, 1998; PEREIRA et al., 2016; MIGUEL et al., 2018).

Além da elevada produção e persistência da palha, as forrageiras perenes tem sido consideradas plantas melhoradoras do ambiente solo, seja pelos seus sistemas radiculares agressivos ou associação com micro-organismos de modo a favorecer a mineralização de nutrientes ampliando a capacidade produtiva do solo e, até mesmo redução populacional de alguns fitopatógenos, a exemplo de alguns nematoides e doenças como o mofo branco (FERREIRA et al., 2012; BOGIANI; FERREIRA, 2017).

A falta de diversidade de espécies no sistema reflete em palhadas com relações C/N de rápida ou lenta decomposição, e resulta em uma homogeneidade de raízes e exsudatos no solo, o que também pode comprometer a sustentabilidade do sistema (ROSA et al., 2017). Essa situação, combinada ao manejo inadequado geram problemas relacionados à qualidade físico-hídrica do solo (COLMAN, 2017).

2.3 Importância da matéria orgânica em solos tropicais

Aproximadamente 1/4 da extensão territorial do Brasil é ocupada por solos tropicais de cerrado, os quais são constituídos principalmente de Latossolos (46%), Argissolos (15,1%) e Neossolos Quartzarênicos (15,2%). Assim sendo, a região dos Cerrados contribui significativamente para a produção agropecuária nacional (RESCK et al., 2008).

Contudo, esses solos caracterizam-se, em sua maioria, por serem altamente intemperizados, com baixa fertilidade natural, com a fração argila constituída essencialmente por minerais de argila 1:1 e óxidos de Fe e Al, o que determina uma

baixa densidade de carga superficial líquida negativa e, em consequência, baixa capacidade de troca de cátions (CTC), quando comparado aos minerais 2:1 e à própria matéria orgânica do solo (MOS) (SILVA; RESCK, 1997; RESCK et al., 2008; LOSS et al., 2012).

A baixa CTC dos solos tropicais pode ser melhorada com adoção de práticas de manejo que promovem a elevação dos teores de MOS, uma vez que contribui com cerca de 75 a 85% da CTC desses solos (SILVA; MENDONÇA, 2007).

A MOS é um dos atributos utilizados na mensuração da qualidade dos solos por influenciar processos biológicos, químicos e físicos e, através do efeito sobre estes processos, apresenta um amplo conjunto de funções. À MOS têm sido atribuídos benefícios como a reserva de nutrientes requeridos por plantas e micro-organismos, a contribuição efetiva na CTC e, conseqüentemente, na fertilidade do solo, complexação de íons metálicos tóxicos, agregação, infiltração e retenção de água (CONCEIÇÃO et al., 2005; SOUZA et al., 2018).

Outro papel importante da MOS está no balanço global de carbono (C), inserindo-se na discussão sobre mudanças climáticas. Os solos agrícolas podem atuar como fonte ou dreno de C atmosférico, dependendo das práticas de manejo utilizadas, da quantidade de C adicionado via resíduos vegetais e da qualidade desses resíduos (SILVA; MENDONÇA, 2007).

No entanto, a maioria dos solos tropicais apresentam baixos teores de matéria orgânica (MO) devido às condições de clima, que promovem a rápida decomposição dos resíduos vegetais incorporados ao solo ou mantidos em superfície (BOLLIGER et al., 2006). Além disso, a distribuição irregular das chuvas e o inverno seco dificultam o aporte de C via resíduos vegetais na entressafra (CASTRO, 2012). Por essa razão, técnicas adequadas de manejo e conservação do solo e da água tornam-se ferramentas de importância fundamental para essa região, afinal, tanto as entradas quanto os reservatórios de carbono no solo podem ser substancialmente alterados devido aos diferentes sistemas de uso e manejo adotados.

A fração orgânica do solo pode ser agrupada em três componentes fundamentais. O primeiro, constituído por material em estádios iniciais de decomposição, que ainda preserva muitas características estruturais do material vegetal de origem, seria a “matéria orgânica particulada”. O segundo, composto por material em fase avançada de decomposição, que não apresenta vestígios morfológicos do qual se originou, de coloração escura, conhecido como “substâncias húmicas”. O terceiro, se refere à

fração viva da MOS, representada pela biomassa microbiana, constituída predominantemente por fungos e bactérias presentes no solo. Na fração viva também são incluídas as raízes das plantas (DICK et al., 2009; RAPHAEL, 2014).

O teor de MOS será resultante de um balanço entre taxas de adição e de perda. As adições de material orgânico correspondem, principalmente, a quantidade de resíduos de plantas e animais que retornam ao solo e, suas perdas ocorrem, principalmente, pela oxidação do carbono (formação de CO₂), pela erosão ou por percolação. O principal processo de adição de material orgânico ao solo, a fotossíntese, tem a planta como componente ativo. O material orgânico sintetizado pelo metabolismo vegetal pode ser adicionado ao solo pelos exsudatos, principalmente radiculares, e por resíduos senescentes dos órgãos constituintes da planta, tanto parte aérea como raízes (DICK et al., 2009; SILVA; MENDONÇA, 2007).

Cerca de 58% da MOS é constituída por C orgânico (SOUZA et al., 2018), por isso, frequentemente refere-se à determinação deste nos estudos de MOS. O aumento do teor de carbono orgânico no solo é dependente do aporte de biomassa e do resíduo adicionado.

A quantidade de fitomassa que vai ser realmente incorporada à MOS depende das características intrínsecas do resíduo (BALESDENT; BALABANE, 1996; DICK et al., 2009). A recalcitrância intrínseca das moléculas determina a complexidade dos compostos orgânicos, exigindo aparatos enzimáticos específicos para a sua decomposição (STEVENSON; COLE, 1999). Moléculas mais complexas, como lignina, cutina e suberina, tendem a sofrer um processo mais lento de decomposição comparativamente a moléculas mais simples, como carboidratos e proteínas, sendo mais recalcitrantes no ambiente (SCHULTEN; LEINWEBER, 2000).

De acordo com Segnini (2007), as substâncias húmicas podem compor mais de 80% da MOS, representando suas frações mais estáveis ou recalcitrantes, e são afetadas pelas práticas de manejo do solo. Como há maior aporte de matéria orgânica lábil no SSD, é esperado um menor grau de humificação neste sistema. Frações humificadas são mais difíceis de ser decompostas devido à presença de estruturas moleculares mais recalcitrantes (SOLLINS, et al., 1996). No entanto, contrariamente a esta tendência, Lovato et al. (2004) obtiveram maiores coeficientes de humificação e menor taxa anual de perda de MO em SSD.

Segnini (2007) verificou na região de São Carlos-SP, em experimento conduzido por 27 anos, que a palhada produzida no SSD reduziu o grau de humificação da MOS

nas camadas superficiais, em comparação à área de mata nativa, o que segundo a autora, se justifica pela presença de matéria orgânica mais lábil ou menos estável presente nos tratamentos com maior aporte de resíduos, já que a quantidade dos resíduos orgânicos presentes eram maiores do que a capacidade dos organismos de metabolizá-los.

As análises de MOS nem sempre detectam os efeitos promovidos pelas mudanças nos sistemas de manejo. Um dos meios para melhorar o entendimento desta questão é através do estudo dos compartimentos do carbono orgânico total, que são mais sensíveis ao manejo do solo e, como melhores indicadores dessa dinâmica (XAVIER et al., 2006; DOU et al., 2008). O estudo da MOS compreende uma série de componentes por ser um reservatório heterogêneo de C, sendo uma complexa combinação de materiais, diferindo em origem, composição e dinâmica (CARTER, 2001). A recalcitrância dos materiais constituintes, a formação de complexos organo-minerais com partículas de argila e oclusão em agregados se constituem os principais fatores de estabilização da MOS (BAYER et al., 2006).

Os compostos lábeis se decompõem em curto período de permanência no solo, dentro de poucas semanas ou meses. Sua principal função é o fornecimento de nutrientes às plantas pela mineralização, além de energia e C aos micro-organismos do solo (SILVA; MENDONÇA, 2007). Já os compostos recalcitrantes são mais estáveis e demoram mais tempo para se decompor, representam cerca de 2/3 do C orgânico. Sua principal função é atuar sobre condições físicas e químicas do solo, e tem importante papel no sequestro de C atmosférico. Quanto mais recalcitrante, ou de difícil decomposição for o material, maior será o tempo de sequestro do C no solo (LORENZ; LAL, 2005; MILORI et al., 2006; SILVA; MENDONÇA, 2007; SILVA et al., 2011b). A humificação pode então ser entendida como a degradação de compostos lábeis e acúmulo de materiais quimicamente recalcitrantes (ZECH et al., 1997).

A labilidade da MO reflete a ação de mecanismos de proteção física das estruturas orgânicas mais lábeis por mecanismos como a agregação do solo, o qual é normalmente intensificado por sistemas de preparo reduzido ou em SSD. Por outro lado, a maior concentração de estruturas recalcitrantes é um indicativo de que o material lábil sofreu um maior grau de mineralização, um processo típico em solos manejados convencionalmente através do preparo com arações e gradagens (DIECKOW et al., 2005). Com o aumento do grau de humificação, a MOS torna-se

mais estável, ou seja, mais resistente perante a decomposição microbiana (SOLLINS et al., 1996), devido à presença de estruturas moleculares mais recalcitrantes.

Portanto, a MOS pode ser dividida em substâncias não húmicas (SnH) e substâncias húmicas (SH). As SnH pertencem a grupos bem conhecidos e possuem características físicas e químicas bem definidas, como por exemplo: aminoácidos, carboidratos, proteínas, ácidos orgânicos, entre outros. As SnH correspondem aos compostos mais facilmente degradados por micro-organismos, tendo normalmente tempo de vida curto no ambiente. As SH são compostos orgânicos mais transformados e num estágio de estabilização química mais avançado, sendo então o produto final da ação dos micro-organismos (GUERRA; SANTOS, 2008). Quimicamente, possuem grupos ácidos (carboxílicos e fenólicos), aromáticos e alifáticos com parte da cadeia hidrofílica e parte hidrofóbica (STEVENSON, 1994).

As SH são formadas via processo de humificação, ocorrendo aumento de C-carboxílico, C-alquil e C-aromático (principalmente grupos fenólicos) e decréscimo na concentração de C O-alquil (proveniente de açúcares e polissacarídeos) (ZECH et al., 1997), aumentando, portanto, a resistência da MO contra a biodegradação (CHRISTENSEN, 1996; SOLLINS et al., 1996). As SH são constituídas por ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) e humina, que se diferenciam de acordo com suas características de solubilidade. Os AH constituem a fração solúvel das SH em meio alcalino, que precipita após acidificação. Os AF permanecem em solução quando o meio é acidificado, e a humina é a fração insolúvel, tanto em ácidos quanto em álcali diluídos (STEVENSON, 1994; BENITES et al., 2003; 2017).

Fuentes et al. (2006) observaram que o grau de humificação relaciona-se com o caráter aromático das moléculas, pela presença de anéis aromáticos e/ou estruturas poliaromáticas condensadas, além do maior grau de conjugação em cadeias alifáticas insaturadas.

As investigações sobre quais compartimentos o C está sendo acumulado têm sido feitas através do fracionamento físico da MOS, que pode ser granulométrico, densimétrico ou uma mistura de ambos. O acúmulo de C em frações lábeis da MO tem sido relacionado à sua proteção física no interior de agregados, em consequência da inacessibilidade aos micro-organismos e suas enzimas (FELLER; BEARE, 1997). A MO protegida no interior de agregados apresenta um tempo de permanência no solo maior do que a MO livre, sendo esta proteção maior nos microagregados do que nos macroagregados (BUYANOVSKY et al., 1994).

O fracionamento físico da MOS é menos destrutivo e mais seletivo, resultando em frações mais associadas à estrutura e função da MOS do que aquelas obtidas pelos métodos químicos (BAYER et al., 2003). Na separação das partículas do solo por tamanho, a MOS associada a frações mais grosseiras (como a fração areia) refere-se a MO de maior labilidade (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; BAYER et al., 2002). Já a MOS associada a frações mais finas (como a fração argila), é considerada como sendo de maior estabilidade (BUYANOVSKY et al., 1994; BALESSENT et al., 1988; BAYER et al., 2001).

A pesquisa com MO na agricultura é recente, cujas ações devem ser intensificadas visando melhor quantificar a contribuição dos diferentes ecossistemas, bem como identificar atividades ou práticas com potencial de manutenção e/ou acúmulo de MOS. Como a fração húmica do solo pode representar um reservatório de C de maior estabilidade, o estudo da humificação em pesquisas que tenham como objetivo avaliar o efeito de diferentes sistemas de preparo do solo ou rotação de culturas sobre a MOS pode ser fundamental para caracterizar o comportamento da MOS frente às práticas de uso e manejo do solo.

2.4 Estrutura do solo como fator determinante da produtividade agrícola

O solo, quando cultivado, sofre alterações em seus atributos físicos ao longo do tempo, em função do processo de desagregação da estrutura, o que interfere na produção agrícola (SPERA et al., 2004; STEFANOSKI et al., 2013).

O rompimento do equilíbrio natural contribui para a degradação dos solos agrícolas pela exposição ao processo erosivo e oxidativo quando da utilização de preparo convencional, o que gera uma preocupação em relação à qualidade física do solo e a sustentabilidade da exploração agrícola. Desta forma, buscou-se por sistemas de produção que garantissem a produtividade e simultaneamente fossem sustentáveis, caracterizados pela máxima manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície do solo, protegendo-a contra a erosão (COLMAN, 2014; ROCHA et al., 2014; BORTOLETI JUNIOR et al., 2015). A falta de rotação ou a escolha inadequada das culturas dificulta a manutenção da cobertura do solo limitando a produtividade (MACHADO; ASSIS, 2010; MAKINO, 2018).

Assim, enfatiza-se que as possíveis combinações dentro dos sistemas de produção, tanto com relação às espécies empregadas quanto aos manejos utilizados,

podem interferir diretamente no estabelecimento e no desenvolvimento das culturas, além de influenciar na qualidade físico-hídrica do solo e, conseqüentemente, na produtividade. Por isso, é importante o monitoramento da qualidade do solo, já que é um fator determinante no sucesso de um sistema de produção agrícola (ARATANI et al., 2009; TREVISAN et al., 2017).

As mudanças na estrutura do solo e a quebra dos agregados, decorrentes do uso agrícola intensivo, normalmente restringem o crescimento radicular e reduz a exploração de água e nutrientes pelas culturas (PEDROTTI et al., 2001). Essas alterações manifestam-se por meio de altos níveis de compactação, menor porosidade e velocidade de infiltração de água no solo reduzida, causando acúmulo de água sobre a superfície do solo e erosão hídrica (STONE; SCHLEGEL, 2010; TAVARES FILHO et al., 2010). Com o depauperamento físico do solo ocorre comprometimento do desenvolvimento das plantas e restrição da produtividade das culturas (ALBUQUERQUE et al., 2003).

Todavia, o surgimento de camadas compactadas em áreas agrícolas é comum, seja pelas pressões externas exercidas sobre o solo, como tráfego de máquinas ou animais (LIMA et al., 2004), ou mesmo por um processo natural de acomodação das partículas constituintes do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997), fazendo com que ocorra uma reorganização dessas partículas, que passam a ocupar menor volume (DIAS JÚNIOR, 2000). Em áreas preparadas mecanicamente a compactação em subsuperfície pode ocorrer em virtude da pressão exercida pelos equipamentos de preparo do solo (grades e arados), no ponto de apoio das ferramentas no limite inferior da profundidade de trabalho (CENTURION; DEMATTÊ, 1985; PEDROTTI et al., 2001).

Hakoyama et al. (1995) observaram que, em sistema convencional, a compactação do solo localiza-se entre 8 e 27 cm de profundidade. Já em SSD essa camada de maior densidade localiza-se mais superficialmente, entre 5 e 12 cm de profundidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Castro et al. (1987) e Pedrotti et al. (2001). A maioria dos trabalhos apontam para uma compactação na camada superficial em SSD, em experimentos de curta duração (CASTRO, 1989; GILL et al., 1996; BEUTLER et al., 2001; FERRERAS et al., 2001; TORMENA et al., 2002; CALONEGO; ROSOLEM, 2008).

Com o aumento da compactação do solo ocorre a redução da porosidade total e o aumento da densidade e da resistência à penetração das raízes (BORGES et al.,

1999; MORAES et al., 1995), causando impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular, restringindo o movimento da água e do ar ao longo do perfil de forma a acelerar o processo erosivo (RICHART et al., 2005; STONE; SCHLEGEL, 2010; TAVARES FILHO et al., 2010). Segundo Marschner (1995), em solo compactado o número de macroporos é reduzido e a densidade é maior, o que, em solo seco, resulta em maior resistência física ao crescimento das raízes e em solo úmido, ocasiona falta de oxigênio para a respiração das raízes, principalmente em solo argiloso.

A agregação do solo é condicionada por substâncias que possuem ação cimentante e aglutinadora, como a matéria orgânica (MIELNICZUK, 1999), que em SSD é incrementada em superfície pelo constante aporte de resíduos culturais, e em profundidade pela morte das raízes. Os exsudados orgânicos liberados pelas raízes também possuem função cimentante das partículas do solo.

O incremento dos compostos orgânicos, além do efeito direto na agregação do solo, serve de energia para a atividade microbiana, liberando moléculas orgânicas como subprodutos do metabolismo (ácidos húmicos e polissacarídeos), os quais irão atuar como agentes aglutinadores dos grânulos minerais (MIELNICZUK, 1999). Essas moléculas atuam na estabilidade dos agregados pelas ligações de polímeros orgânicos com superfície inorgânica por meio de cátions polivalentes (CASTRO FILHO et al., 1998).

Segundo Dexter (1991), os "bioporos" derivados de raízes e de minhocas são biocanais que poderão ser ocupados pelas novas raízes das plantas cultivadas na sequência (CUBILLA et al., 2002). Além do efeito físico, de facilitar o crescimento radicular em profundidade, esses bioporos apresentam microclima favorável ao crescimento das raízes, à medida em que há maior teor de MO, seja oriunda de exsudados radiculares ou mesmo do processo de decomposição das raízes mortas. A MO do solo exerce um importante papel no desenvolvimento das raízes, pois funciona como fonte e reserva de nutrientes e atua na complexação de metais como o Al e Mn, reduzindo o efeito tóxico para a planta (SANTOS; CAMARGO, 1999).

Rosolem e Pivetta (2016) avaliaram o crescimento e a atividade das raízes em experimento conduzido em Botucatu-SP, sob solo argiloso. Os autores mostraram que houve maior crescimento e atividade das raízes de soja no perfil, com aumento na produtividade da cultura, o que foi associado com a presença de bioporos deixados pelas raízes de *U. ruziziensis*.

A agregação do solo também pode ter seu efeito acelerado pela exploração radicular no perfil do solo. No processo de crescimento ocorre a aproximação das partículas, à medida que as raízes exercem pressão sobre as partículas minerais no seu avanço pelo espaço poroso. Além disso, a absorção de água pelas raízes também causa secamento na região adjacente promovendo aumento na força de coesão entre as partículas (ZONTA et al., 2006).

Inda Junior et al. (2007), ao avaliar a estabilidade de agregados de solos do sul do Brasil e do Cerrado, observaram, em testes de ultrassom, que a energia necessária para dispersar os agregados aumenta proporcionalmente conforme o teor de matéria orgânica. De forma similar, Vasconcelos et al. (2010) constataram que o processo de estabilização de agregados está associado ao teor de matéria orgânica.

Além de servir de suporte mecânico, o solo deve permitir o fornecimento de água, ar e nutrientes às plantas, proporcionando boas condições para o seu desenvolvimento e produção. A pouca importância dada a estes conceitos tem gerado situações em que há baixa resposta às tecnologias agrícolas, mesmo em solos com alta fertilidade (ZANCANARO et al., 2017). Verifica-se que a adoção de um sistema de manejo com maior diversificação de culturas é uma das mais importantes práticas de manejo físico do solo, com potencial de reduzir e mitigar os efeitos da compactação do solo (ROSOLEM; PIVETTA, 2016; RIGON, 2017).

A qualidade estrutural do solo também pode ser avaliada através do índice *S* (DEXTER, 2004), calculado a partir dos dados da curva de retenção de água no solo (CRA). A CRA representa a relação entre o teor de água e a energia com a qual ela está retida e com base nos pontos medidos em laboratório é traçada uma curva para representar as características de retenção da água do solo (SILVA et al., 2006).

Para traçar a CRA é preciso ajustar os dados a um modelo matemático que represente o fenômeno de retenção da umidade no solo, sendo o modelo de Genutchen (1980) indicado como um dos mais adequados (GENUTCHEN; NIELSEN, 1985; KOOL et al., 1987). Suzuki et al. (2014) observaram maior disponibilidade de água e maior índice *S* para áreas com floresta e de pastagem (*Urochloa brizantha*) consorciada com pensacola (*Paspalum lourai*) e trevo (*Trifolium* sp.), em relação às áreas com eucalipto, sob Argissolo Vermelho distrófico no Rio Grande do Sul.

2.5 Influência das rotações de culturas com forrageiras na matéria orgânica do solo e na estruturação do solo

A adoção de forrageiras no sistema de produção melhora as condições físicas do solo em razão do maior incremento de palha e do sistema radicular fasciculado destas espécies, com capacidade de melhorar a estrutura do solo, elevando os teores de carbono, a taxa de infiltração e de retenção de água no solo (MACEDO, 2009). Além disso, favorece a exploração do perfil do solo pelas raízes, diminuindo o processo erosivo e mantendo a estabilidade do sistema (CHIODEROLI et al., 2012).

Em pesquisa desenvolvida por Salton e Tomazi (2014), os autores ressaltam que quando a soja é cultivada após pastagem que foi utilizada para pastejo, mesmo que por alguns meses, o sistema radicular das forrageiras pode contribuir de forma marcante para o crescimento das raízes das plantas subsequentes quando introduzidas no SSD, ou seja, sem revolvimento do solo. Quando a soja é cultivada nessas condições, os efeitos benéficos tendem a ser mais pronunciados, pois geralmente a pastagem se desenvolve por maior período de tempo, e apresenta maior volume de raiz.

O sistema radicular agressivo das braquiárias pode chegar a grandes profundidades, normalmente não exploradas pelas raízes do milho e da soja, contribuindo de maneira significativa para a ciclagem de nutrientes que estão nesta faixa, podendo assim, gerar maior retorno econômico (CECCON, 2007). Pereira et al. (2004) destacaram que as braquiárias apresentam crescimento radicular considerável até a profundidade de 100 cm.

Em diversas áreas sob ecossistema cerrado, a soja tem apresentado maiores produções sobre palhada de plantas do gênero *Urochloa*, principalmente em sucessão à *U. brizantha* (KLUTHCOUSKI; STONE, 2003).

Lanzanova et al. (2010), após 16 anos da adoção do SSD com diferentes rotações de culturas e adubos verdes, observaram menor densidade do solo e maior volume total de poros e macroporosidade em comparação com o tratamento mantido sem cobertura do solo. Calonego et al. (2011a) concluíram que o cultivo de braquiária em consórcio com o milho por dois anos consecutivos melhora as condições físicas e estruturais do solo na camada de 0,20 a 0,40 m em relação ao milho solteiro, com redução da resistência mecânica à penetração e aumento da densidade crítica do solo.

Além disso, práticas conservacionistas, como o SSD e o uso de pastagens na entressafra, promovem maior aporte de resíduos orgânicos, e têm sido eficientes em aumentar a estabilidade de agregados (CORRÊA, 2002; SALTON, 2005; CALONEGO; ROSOLEM, 2008; BLANCO-CANQUI et al., 2010). O maior aporte de resíduos vegetais no perfil do solo, em SSD, resulta em aumento no teor de matéria orgânica (MO), o que concorre para a formação de agregados estáveis, em razão da ação cimentante e aglutinadora que a MO exerce sobre as partículas minerais do solo (CASTRO FILHO et al., 1998; MIELNICZUK, 1999; WOHLBERG et al., 2004; WENDLING et al., 2005; BRAIDA, et al., 2011).

De acordo com Franzluebbers (2002) e Braida et al. (2011), solos com maior teor de MO como os conduzidos em SSD, permitem maior estabilidade do sistema poroso, aumentando a capacidade do solo em suportar cargas sem sofrer compactação adicional, pois aumenta a força de união entre as partículas e a estabilidade dos agregados. Crusciol et al. (2007) verificaram maior proporção de agregados maiores que 2 mm na camada 0,20-0,40 m e maior macroporosidade em profundidade, depois de dois anos de cultivo de milho em consórcio com *U. brizantha*.

Salton et al. (2011) observaram que sistemas com o uso de forrageiras para produção de palha, em comparação aos exclusivamente com lavouras, apresentaram maiores teores de C, o que deve estar associado ao elevado aporte de material vegetal comumente proporcionado pelas pastagens, corroborando com os resultados obtidos por Lovato et al. (2004), Dieckow et al. (2005), Boddey et al. (2010), Nunes et al. (2011) e Lal (2001), que atribuíram às forrageiras grande capacidade de acumular C no solo.

Segundo Garcia (2010), sistemas que privilegiam o aporte de resíduos vegetais aumentam o conteúdo de C no solo na fração de maior labilidade. Portanto, em SSD é comum o aumento dos teores de C nessa fração da MOS, principalmente nas camadas mais superficiais, devido ao aporte e manutenção dos resíduos vegetais sobre o solo, conforme constatado por Nascente et al. (2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização, histórico e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em área experimental pertencente à Embrapa Milho e Sorgo, no município de Sete Lagoas, MG (19° 28'S; 44° 15'W e 732m). O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho-escuro A moderado, textura muito argilosa (Tabela 1), fase cerrado subcaducifólio e relevo suave ondulado (SANTOS et al., 2018). Antes da implantação deste experimento a área já era conduzida em SSD desde 1995, com semeadura intercalada de milho e soja.

Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentadas as características granulométricas e químicas da área experimental, respectivamente, realizadas em março de 2017. Vale ressaltar que para análise de granulometria foram utilizadas duas repetições por profundidade escolhendo-se aleatoriamente entre os tratamentos, já que a textura é um parâmetro estável e os sistemas de manejo empregados não alteram as proporções de argila, silte e areia do solo. Já para análise química seguiu-se procedimentos descritos por Rajj et al. (2001), utilizando-se três repetições conforme o tratamento.

Tabela 1 – Teores de argila, silte e areia (g kg^{-1}) e classe textural de um Latossolo Vermelho-escuro na Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas-MG, março de 2017

Profundidade (m)	Argila -----	Silte (g kg^{-1})	Areia -----	Classe textural
0,0 – 0,10	768	114	118	Muito argilosa
0,10 – 0,20	773	112	115	Muito argilosa
0,20 – 0,40	774	116	110	Muito argilosa

Tabela 2 – Propriedade químicas da área experimental na Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas-MG, março de 2017

Sistema de produção	pH CaCl_2	P resina	(H+Al)	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
		(mg dm^{-3})			(mmolc dm^{-3})				(%)
0,0 – 0,20 m									
M	4.3	34	103	2.4	46	11	59	161	37
SF	4.6	42	81	2.4	39	12	53	134	40
S	4.3	30	92	1.9	41	13	55	147	38
P	4.2	11	90	1.0	48	11	59	149	40
SF/S	4.4	28	95	1.8	49	13	63	158	40
SF/P	4.3	36	76	1.5	49	12	62	137	44
SF/P/P	4.4	21	94	1.2	37	10	47	141	34
SF/P/S	4.4	13	93	1.1	39	12	52	145	35
S/SF/P/P	4.6	30	69	1.1	59	13	73	142	51
CE	4.0	5	114	1.2	40	8	48	162	30
0,20 – 0,40 m									
M	4.3	9	93	1.3	38	9	48	141	34
SF	4.1	4	106	1.4	28	7	36	142	25
S	3.7	4	122	1.3	17	6	24	146	16
P	3.7	2	123	0.8	28	6	35	158	22
SF/S	4.0	7	116	1.3	23	7	31	147	22
SF/P	4.1	5	106	1.0	29	7	37	143	26
SF/P/P	4.1	8	96	1.0	28	7	36	132	27
SF/P/S	4.1	3	94	1.0	28	6	35	129	27
S/SF/P/P	4.5	4	84	1.0	34	8	43	127	34
CE	3.6	2	123	0.9	15	5	21	144	14

3.2 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental é constituído por blocos inteiramente casualizados, com três repetições. Os tratamentos foram constituídos por nove sistemas de produção, acrescidos de um controle com mata nativa (Tabela 3 e Figura 1). Cada parcela foi constituída por 12 m de largura e 14 m de comprimento (168 m²) com carregadores entre parcelas e entre blocos de 2,5 m. Os sistemas de produção foram implantados no agrícola 2010/11 e conduzidos por setes anos (Quadro 1).

Tabela 3 – Descrição dos tratamentos

Trat.	Sistema de produção	Sigla
T1	Milho solteiro em sucessão anual (monocultivo)	M
T2	Milho consorciado com <i>U. brizantha</i> cv. Piatã em sucessão anual	MP
T3	Soja em sucessão anual (monocultivo)	S
T4	Pastagem de <i>U. brizantha</i> cv. Piatã implantada em cultivo solteiro	P
T5	Consórcio Milho+Piatã e Soja em rotação anual	MP/S
T6	Sequência de consórcio Milho+Piatã e Pastagem de Piatã em rotação anual	MP/P
T7	Sequência de consórcio Milho+Piatã e pastagem de Piatã por dois anos	MP/P/P
T8	Sequência de consórcio Milho+Piatã, pastagem de Piatã e Soja em rotação anual	MP/P/S
T9	Sequência de Soja, consórcio Milho+Piatã e pastagem de Piatã por dois anos em rotação	S/MP/P/P
T10	Cerrado nativo (testemunha para parâmetros do solo).	CE

O histórico de cultivo, desde o ano da implantação de cada tratamento, é apresentado no quadro 1.

Na figura 1 estão esquematizados os nove sistemas de produção avaliados nesta pesquisa. Antes da implantação deste experimento a área já era conduzida em SSD desde 1995, com semeadura intercalada de milho e soja.

Quadro 1 – Sequência de culturas em cada tratamento desde a safra 2010/2011 até a safra 2017/2018. Em destaque o ano agrícola avaliado (2016/17)

Tratamentos	Anos agrícolas						
	10/11	11/12	12/13	13/14	14/15	15/16	16/17
1	M*	M	M	M	M	M	M
2	MP	MP	MP	MP	MP	MP	MP
3	S	S	S	S	S	S	S
4	P	P	P	P	P	P	P
5	MP	S	MP	S	MP	S	MP
6	MP	P	MP	P	MP	P	MP
7	MP	P	P	MP	P	P	MP
8	MP	P	S	MP	P	S	MP
9	P	S	MP	P	P	S	MP
10	CE	CE	CE	CE	CE	CE	CE

*M- Milho solteiro; S – Soja; MP – Milho+Piatã; P- Pastagem de Piatã; CE – Cerrado.

Figura 1 – Representação esquemática dos sistemas de produção. Adaptado de Pereira, 2018

Safra	Entressafra	Safra	Entressafra
Tratamento 1		Tratamento 3	
			
M (anual)		S (anual)	
Tratamento 2		Tratamento 4	
			
MP (anual)		P (perene)	

1º ano		2º ano	
Safra	Entressafra	Safra	Entressafra
Tratamento 5		Tratamento 6	
			
MP		S	
			
MP		P	

1º ano		2º ano		3º ano	
Safra	Entressafra	Safra	Entressafra	Safra	Entressafra
Tratamento 7		Tratamento 8		Tratamento 9	
					
MP		P		P	
					
MP		P		S	

1º ano		2º ano		3º ano		4º ano	
Safra	Entressafra	Safra	Entressafra	Safra	Entressafra	Safra	Entressafra
Tratamento 9		Tratamento 10		Tratamento 11		Tratamento 12	
							
S		MP		P		P	

Na tabela 4 são apresentados os dados de quantidade de palha existente em dezembro de 2016 e a produtividade de grãos na safra 2016/17.

Tabela 4 – Quantidade de palha em dezembro de 2016 e produtividade de grãos na safra 2016/17, Sete Lagoas, MG

Sistema de produção	Cultivo anterior (2015/16)	Palha sobre o solo (Dezembro de 2016) ¹ (kg ha ⁻¹)	Produtividade de grãos (2016/17) (kg ha ⁻¹)	
			-----	-----
			-- Milho --	-- Soja --
M ²	Milho	2704	6766	-
MP	Milho+Piatã	6270	6454	-
S	Soja	2066	-	2893
P	Piatã	3096	-	-
MP/S	Soja	2939	7446	-
MP/P	Piatã	6476	6316	-
MP/P/P	Piatã	3422	5512	-
MP/P/S	Soja	5318	6031	-
S/MP/P/P	Soja	2574	6569	-

¹ Coleta realizada 11 dias após a semeadura das culturas de grãos.

²M - Milho solteiro em sucessão anual; MP - consórcio Milho+Piatã em sucessão anual; S - Soja em sucessão anual; P - Pastagem de Piatã em cultivo solteiro; MP/S - Milho+Piatã e Soja em rotação anual; MP/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem de Piatã em rotação anual; MP/P/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem por 2 anos; MP/P/S - Sequência Milho+Piatã, pastagem de Piatã e Soja em rotação; S/MP/P/P - Sequência Soja, Milho+Piatã, e pastagem de Piatã por 2 anos em rotação.

3.3 Condução da área experimental

Desde o ano de implantação, o experimento foi conduzido em SSD. A semeadura dos tratamentos, com exceção do sistema 4 (Pastagem de Piatã), foi realizada mecanicamente, com a soja sendo semeada a 0,5 m de espaçamento entrelinhas e o milho a 0,5 m.

Antecedendo a semeadura da safra (2016/17), as parcelas implantadas com culturas anuais foram dessecadas em 26/10/2016 com 1,58 kg ha⁻¹ de glifosato mais 0,7 L ha⁻¹ de 2,4-D. No dia 09/11/2016 foi realizada nova aplicação de 0,72 kg ha⁻¹ de glifosato, a fim de propiciar cobertura morta adequada para a implantação dos tratamentos em SSD.

A semeadura da cultura da soja foi realizada em 22/11/2016, sendo a semeadora-adubadora regulada para garantir estande final de 15 sementes por metro da cultivar AS 3797 IPRO. A cultivar foi escolhida em razão de sua precocidade e hábito de crescimento indeterminado. A adubação de semeadura foi de 315 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 06-30-16. As sementes foram inoculadas com inoculante líquido, na quantidade recomendada pelo fabricante, e tratadas com Imidacloprido+Tiodicarbe (Cropstar) na dose de 0,3 L do p.c. por 100 kg de sementes.

Os tratos culturais foram realizados sempre conforme a necessidade e as recomendações vigentes. Foram realizadas, em pós-emergência, duas aplicações de glifosato ($0,72 \text{ kg ha}^{-1}$ em 07/12/2016 e $1,18 \text{ kg ha}^{-1}$ em 09/01/2017) e duas aplicações de fungicida (600 ml do p.c. de Piraclostrobina+Epixiconazol (Ópera) em 09/01/2017 e 300 ml ha^{-1} do p.c. de Azoxistrobina+Ciproconazol (PrioriXtra) em 27/01/2017). Foi realizada a aplicação foliar de 1 L ha^{-1} do p.c. de Quimifol Cerrado. A colheita da soja foi realizada em 20/04/2017, correspondendo a 145 dias após a emergência.

Nos tratamentos com a cultura do milho, semeados em 21/11/2016, foi utilizado a cultivar AS 1581 PRO, tratadas com Imidacloprido+Tiodicarbe (Cropstar) na dose de 0,3 L do p.c. por 100 kg de sementes, com estande inicial de $3,5 \text{ sementes m}^{-1}$ e adubação de semeadura de 368 kg ha^{-1} da fórmula NPK 08-28-16. Nas parcelas de milho consorciadas com capim, foram utilizadas $4,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de sementes puras viáveis (SPV) de *Urochloa brizantha* cv. Piatã, tratadas com fipronil e misturadas ao fertilizante no momento da semeadura do milho.

O controle de plantas espontâneas nos tratamentos com o milho foi realizado em 07/12/2016 com a pulverização em pós-emergência de atrazina ($3,5 \text{ L do p. c. ha}^{-1}$), sendo que nas parcelas com milho solteiro utilizou-se também $33,3 \text{ g ha}^{-1}$ de Tembotriona.

A adubação de cobertura na cultura do milho foi efetuada em 12/12/2016 correspondendo ao estágio fenológico V2 com $112,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (ureia), de acordo com as recomendações de CFSEMG (1999). A colheita do milho foi realizada em 19/04/2017, correspondendo a 143 dias após a emergência do milho.

Nas parcelas com Piatã foi realizado o manejo simulando a produção de feno, assim quando a maioria das parcelas atingia 0,5 m de altura realizava-se um corte à 0,2 m de altura e o material era então retirado da área.

3.4 Coleta de amostras de solo

As coletas de amostras foram realizadas no mês de março de 2017.

3.4.1 Coleta de amostras deformadas de solo

As amostras deformadas de solo foram coletadas nas paredes das trincheiras com auxílio de uma pá de corte. Coletou-se uma amostra em duas paredes da trincheira,

que foram misturadas para formar uma amostras composta de aproximadamente 350 g de solo, nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. As amostras de cada tratamento foram acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas ao departamento de Produção e Melhoramento Vegetal e Agricultura da FCA/UNESP, sendo processadas no laboratório de Relação Solo-Planta. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

3.4.2 Coleta de amostras indeformadas de monólitos de solo

Foram retirados monólitos de solo com dimensões aproximadas de 0,10 m de altura por 0,20 m de comprimento e 0,10 m de largura, com auxílio de espátula de aço e marreta de 1 kg na profundidade de 0,0-0,10 m, na parede das trincheiras. Essas amostras foram utilizadas na avaliação de estabilidade de agregados.

3.4.3 Anéis volumétricos

Em cada unidade experimental foi aberta uma trincheira utilizando-se enxada e pá de corte, com dimensões aproximadas de 0,30 m de largura por 0,60 m de comprimento e 0,60 m de profundidade. As amostras foram retiradas nas paredes das trincheiras em duplicata. Para avaliar a densidade do solo, a porosidade total, macro e a microporosidade, utilizou-se procedimento descrito em Embrapa (1997).

As amostragens foram realizadas no centro das camadas de 0,0-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m. Utilizou-se um suporte de aço para anel volumétrico, denominado “castelinho”, que, com o auxílio de marreta de 1 kg, introduziu anéis volumétricos de aço inox de 0,05 m de altura por 0,05 m de diâmetro no solo. Após a coleta das amostras, ainda no campo, retirou-se o excesso de solo dos bordos dos anéis com o auxílio de um estilete. Posteriormente, os anéis volumétricos foram vedados com tampas plásticas para evitar possíveis danos e deformações, utilizando fita para evitar que a tampa soltasse durante o transporte.

3.5 Análises de solo

3.5.1 Carbono orgânico total e nitrogênio total do solo

Foram analisados os teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, no Laboratório de Relação Solo-Planta da FCA/UNESP. Após a secagem ao ar, as amostras foram homogeneizadas com auxílio de um rolo de madeira, tamisadas em peneira de malha de 2 mm e, em seguida, submetidas às determinações de carbono e nitrogênio totais em analisador elementar automático modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®.

O princípio das análises de C e N em analisador elementar baseia-se na combustão da amostra em elevadas temperaturas (900-950°C), associada a um influxo de gás oxigênio. Todo o carbono é convertido em CO₂ e o nitrogênio em óxidos (NO_x). O CO₂ é mensurado em um detector infravermelho, ao passo que os óxidos de nitrogênio sofrem um processo de remoção de oxigênio, formando gás N₂. O nitrogênio é então quantificado através de condutividade térmica (LECO CORPORATION, 2011).

3.5.2 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo e índice de manejo de carbono (IMC)

Para realização do fracionamento físico da matéria orgânica do solo, seguiu-se metodologia adaptada de Cambardella e Elliott (1992). Por essa metodologia obtém-se duas frações de carbono, o carbono orgânico particulado (COp), que consiste no material mais recentemente adicionado ao solo e pouco decomposto e, o carbono associado a minerais (COam), mais recalcitrante e humificado.

Foram pesados 20 gramas de solo seco ao ar, previamente peneirado em malha de 2 mm, em copos de polietileno de 250 mL e adicionados 80 mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio 5 g L⁻¹. Em seguida, as amostras foram agitadas por 15 horas em agitador horizontal, passadas por peneira de malha de 0,053 mm (270 Mesh) e lavadas com água destilada até remoção total da argila. O material particulado retido na peneira, ou fração particulada (FP), foi transferido para potes de alumínio, com auxílio de jatos de água, e seco em estufa de circulação de ar forçada a 45 °C até atingir massa constante.

Após a secagem, o material foi pesado, determinando-se assim a massa da fração particulada (MFP), moído e homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro, e submetido à determinação de C em analisador elementar, obtendo-se o teor de carbono da fração particulada do solo (CFP), sendo possível calcular o teor de carbono orgânico particulado (COp) do solo, de acordo com a equação 1:

$$\text{COp} = \frac{\text{CFP} \cdot \text{MFP}}{\text{Ps}} \quad (1)$$

Onde: COp = teor de carbono orgânico particulado do solo, em g de C kg⁻¹ de solo; CFP = teor de carbono da fração particulada, em g kg⁻¹; MFP = massa da fração particulada, em gramas; Ps = massa da amostra inicial do solo (20 gramas).

O teor de carbono associado a minerais (COam) foi calculado pela diferença entre o carbono orgânico total e o carbono orgânico particulado:

$$\text{COam} = \text{COT} - \text{COp} \quad (2)$$

Onde: COam = teor de carbono orgânico associado a minerais no solo, em g kg⁻¹; COT = teor de carbono orgânico total do solo, em g kg⁻¹; COp = teor de carbono orgânico particulado do solo, em g kg⁻¹.

A partir dos resultados do fracionamento físico calculou-se o índice de manejo de carbono (IMC), segundo Blair et al. (1995). Este índice é uma medida relativa das alterações provocadas pelo manejo ao solo, comparando-o com uma situação considerada original ou ideal. Neste estudo, a área de cerrado nativo foi tomada como situação original (IMC = 100).

Para obtenção do índice de manejo de carbono (IMC), necessita-se do índice de compartimento de carbono (ICC), sendo este calculado a partir da relação entre o COT de cada tratamento em relação ao COT da área tomada como referência (Cerrado nativo). A labilidade (L) da MOS foi determinada pela relação entre a matéria orgânica particulada e a matéria orgânica associada a minerais (silte + argila), e o índice de labilidade (IL), calculado pela relação entre a L da área cultivada e a L da área de referência. O IMC de cada área foi obtido pela multiplicação entre o ICC e o IL por 100 (Blair et al., 1995).

$$\text{IMC} = \text{ICC} \times \text{IL} \times 100 \quad (3)$$

Onde: ICC = índice de compartimento de carbono e IL = índice de labilidade.

A estimativa do IMC foi realizada com base na soma dos valores médios das profundidades analisadas e, como condição natural, o solo sob cerrado foi utilizado como referência (IMC = 100). O ICC, por sua vez, foi calculado pela expressão apresentada a seguir:

$$\text{ICC} = \text{COT tratamento} / \text{COT referência} \quad (4)$$

Onde: COT tratamento = COT no tratamento avaliado (área cultivada); COT referência = COT no tratamento de referência (Cerrado nativo).

O IL é calculado da seguinte forma:

$$\text{IL} = \text{L tratamento} / \text{L referência} \quad (5)$$

Onde: L tratamento = Labilidade da MOS no tratamento avaliado (área cultivada); L referência = Labilidade da MOS no tratamento da área de referência (Cerrado nativo).

O L é calculado pela expressão apresentada a seguir:

$$\text{L} = \text{C lábil} / \text{C não-lábil} \quad (6)$$

Onde: C lábil = C na fração particulada da MOS - COp; C não-lábil = C na fração associada a minerais da MOS - COam.

3.5.3 Fracionamento químico da matéria orgânica do solo

O fracionamento químico da MOS permite determinar os teores de C das frações de ácidos fúlvicos, húmicos e humina. Seguiu-se procedimentos descritos por Benites et al. (2017) por ser um método que reduz a utilização de reagentes e custos.

Utilizou-se nesta análise uma fração do solo coletado para fins de fertilidade. Pesou-se 0,5 gramas de solo em balança de precisão de 0,001 g, que foram transferidas para tubo de centrifuga de 50 mL e adicionados 20 ml de NaOH (0,1 mol L⁻¹). Procedeu-se a agitação manual por 15 segundos a fim de misturar completamente o solo com o reagente, logo após as amostras ficaram em repouso por 24 horas.

No dia seguinte, realizou-se centrifugação a 5000 rpm por 30 minutos e reservou-se cuidadosamente o sobrenadante em copo plástico descartável de 80 ml. Foi adicionado novamente 20 mL da solução de NaOH ao tubo de centrifuga e procedeu-se a agitação manualmente até o desprendimento total do solo precipitado no fundo, em seguida deixou-se em repouso por 1 hora. Transcorrido este tempo, as amostras foram centrifugadas novamente à 5000 rpm por 30 min e o sobrenadante foi recolhido juntamente com o primeiro. Estas amostras continham pH alcalino em torno de 13, e cada amostra foi ajustada a pH 1,5 ($\pm 0,5\%$) com auxílio de pHmetro e H₂SO₄.

As amostras foram deixadas em repouso por uma noite em geladeira e depois procedeu-se a filtração do precipitado em filtro de membrana de éster 0,45 μ m (HAWP04700, Millipore®) acoplado ao porta filtro tipo sterifil em polisulfona de 250 ml (XX1104700, Millipore®) e bomba a vácuo.

O filtrado recolhido foi aferido ao volume de 50 mL em balão volumétrico com adição de água destilada, correspondendo assim à fração ácidos fúlvicos. Na porção sólida retida no filtro foi adicionado NaOH até a dissolução completa sendo a solução posteriormente filtrada e aferida no balão volumétrico de 50 mL, compreendendo a fração de ácidos húmicos (Figura A do Apêndice B).

A titulação e determinação de C foi realizada em triplicata. Foi utilizada alíquota de 5 mL da solução de ácidos fúlvicos, assim como se procede para os ácidos húmicos, adicionou-se 1 mL de K₂Cr₂O₇ (0,042 mol L⁻¹) e 5mL de H₂SO₄ concentrado a cada amostra e em quatro tubos contendo 5mL de H₂O destilada (brancos). Os tubos foram levados ao bloco digestor pré-aquecido à 150°C por 30 minutos, depois foram transferidos para frascos Erlenmeyer de 125 mL. Para correção da normalidade do sulfato ferroso amoniacal foram utilizadas provas em branco sem o processo de aquecimento. Adicionou-se três gotas de indicador ferroin e as amostras foram tituladas com sulfato ferroso amoniacal (SFA) (0,0125 mol L⁻¹), e o C de cada fração obtidos por meio da equação 7:

$$C_{AF \text{ ou } AH} = \frac{\left[\frac{(V_{baq} - V_{am}) \cdot (V_{bs} - V_{baq})}{V_{bs}} + (V_{baq} - V_{am}) \right] \cdot 3 \cdot MSFA \cdot \frac{50}{\text{aliquota (ml)}}}{\text{massa da amostra de solo inicial (g)}} \quad (7)$$

Onde: $C_{AF \text{ ou } AH}$ = concentração de carbono orgânico nas frações, ácidos fúlvicos ou húmicos (g kg^{-1}); V_{baq} = volume (mL) de SFA gasto na titulação do branco aquecido; V_{am} = volume (mL) de SFA gasto na titulação da amostra; V_{bs} = volume (mL) de SFA gasto na titulação do branco sem aquecimento; $MSFA$ = concentração da solução do SFA (mol L^{-1}).

A fração humina foi obtida pela digestão das amostras precipitadas. Adicionou-se 5 mL de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ($0,1667 \text{ mol L}^{-1}$) e 10 mL de H_2SO_4 concentrado e foram lavados ao bloco digestor pré-aquecido a 150°C por 30 minutos. Após, as amostras foram transferidas para frascos Erlenmeyer de 125 mL e adicionou-se ferroin como indicador (Figura B do Apêndice B). Titulou-se com sulfato ferroso amoniacal ($0,25 \text{ mol L}^{-1}$), obtendo-se o teor de C da fração por meio da equação 8:

$$C_{Hum} = \frac{\left[\frac{(V_{baq} - V_{am}) \cdot (V_{bs} - V_{am})}{V_{bs}} + (V_{baq} - V_{am}) \right] \cdot 3 \cdot MSFA}{\text{massa da amostra de precipitado (Hum)(g)}} \quad (8)$$

Onde: C_{Hum} = concentração de C orgânico na fração humina; V_{baq} - Volume (mL) de SFA gasto na titulação do branco aquecido; V_{am} - Volume (mL) de SFA gasto na titulação da amostra; V_{bs} = volume (mL) de SFA gasto na titulação do branco sem aquecimento; $MSFA$ = concentração da solução do SFA (mol L^{-1}).

3.5.4 Física do solo

3.5.4.1 Estabilidade de agregados em água

As amostras indeformadas de monólitos de solo foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionadas em um jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior malhas de 8 e 4 mm, respectivamente. Utilizou-se somente a porção retida na de 4 mm. Os agregados do solo pré-selecionados foram avaliados quanto à estabilidade de agregados via úmida, conforme Kemper e Chepil (1965), utilizando-se um aparelho de oscilação vertical (YODER, 1936) (Figura C do Apêndice B).

Foram pesadas duas subamostras de 25 g de solo de cada amostra, sendo uma delas submetida à determinação de umidade em estufa a 105°C e a outra encaminhada para o tamisamento. As subamostras destinadas ao tamisamento foram pré-umedecidas levemente com um borrifador e mantidas em repouso em temperatura ambiente por 10 minutos. Em seguida, foram transferidas para um conjunto de peneiras acopladas de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,105 mm de diâmetro dentro do aparelho de oscilação vertical. O aparelho movimentava verticalmente o conjunto de peneiras imersas em água, de modo que amostra de solo depositada inicialmente na peneira superior (2,00 mm) mergulhasse totalmente e depois suba até aflorar acima do nível da água. O tamisamento mecânico na água foi realizado por 15 minutos. As porções retidas em cada peneira foram transferidas para potes de alumínio com o auxílio de jatos de água e secas em estufa a 105°C por um período de 24 horas para posterior pesagem.

A partir dos valores de massa, e conhecendo-se os teores de umidade das amostras originais de solo submetidas ao tamisamento, foram calculados a porcentagem de agregados retidos na peneira de 2 mm (agregados menores que 2 mm), o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG). Também foi calculado o índice de estabilidade de agregados (IEA), conforme Castro Filho et al. (1998). Para as determinações de DMP, DMG e IEA foram utilizadas as equações 9, 10 e 11, respectivamente.

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (9)$$

Onde: x_i = diâmetro médio das classes de agregados (mm); w_i = proporção de cada classe em relação ao total.

$$DMG = \frac{\exp \sum_{i=1}^n w_p \cdot \log x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (10)$$

Onde: w_p = massa dos agregados de cada classe (g).

$$IEA = \frac{(w_s - w_{p<0,25})}{w_s} \cdot 100 \quad (11)$$

Onde: w_s = massa da amostra de solo seca (g); $w_{p<0,25}$ = massa de agregados menores que 0,25 mm (g).

3.5.4.2 Porosidade total, macro e microporosidade

As amostras indeformadas foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com cerca de 2/3 da altura dos anéis no Laboratório de Fitometria da FCA/UNESP. Para evitar a perda de solo, a borda inferior do anel foi envolvida com tecido de poliéster preso por um atilho de borracha, permitindo somente a passagem da água. Após 48 horas de imersão das amostras, e com todos os poros do solo ocupados pela água, obteve-se a massa saturada das amostras e, em seguida, as amostras foram colocadas sobre placas porosas em câmara de Richards (KLUTE, 1986) (Figura D do Apêndice B).

Nas amostras de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m iniciou-se a drenagem na tensão de 6 kPa, obtendo a massa úmida das amostras em equilíbrio nessa tensão para em seguida serem secas a 105° C por 48 horas em estufa de aeração forçada para obtenção da massa de solo seco.

Obteve-se a densidade aparente como quociente da massa das amostras secas a 105° C e o volume do anel volumétrico. Considerando que a tensão de drenagem de 6 kPa é suficiente para retirar toda a água retida nos macroporos (Macro), a água restante representa o volume de microporos (Micro) (EMBRAPA, 1997). Com a diferença entre a massa das amostras saturadas com água e secas a 105°C, e com volume conhecido das amostras, calculou-se a porosidade total (PT). A macroporosidade (Macro) foi obtida pela diferença entre a PT e a Micro ($PT = Macro + Micro$). Para calcular a densidade, dividiu-se a massa das amostras secas pelo volume do anel volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986).

3.5.4.3 Curva característica de retenção de água no solo e índice S

As amostras indeformadas da profundidade de 0,0-0,10 m foram saturadas em água e pesadas da forma descrita no item anterior (item 3.6.4.2), no entanto, estas foram submetidas às tensões de 4; 6; 10; 30; 60; 100; 500 e 1500 kPa para confecção da curva característica da água no solo (CRA). A extração de água das amostras nas câmaras de Richards foi realizada por meio de compressor com capacidade para 20 bar.

A água retida no solo em cada potencial matricial foi determinada pesando as amostras no ponto de saturação, ou seja, no ponto de maior potencial mátrico ($\Psi_m =$

0) e após aplicação de cada tensão. Após extração de água com tensão de 1500 kPa e pesagem, as amostras foram colocadas em estufa de aeração forçada a 105° C, por 48 horas, para em seguida determinar a massa seca das amostras com volume de solo conhecido. De posse da umidade gravimétrica obtida em cada potencial matricial, a CRA foi determinada por meio de ajuste dos dados originais utilizando a função (Equação 12) proposta por van Genuchten (1980) no software Soil Water Retention Curve - SWRC, desenvolvido por Dourado Neto et al. (1990). A equação considera o potencial mátrico (Ψ) como variável independente e a umidade gravimétrica (θ) como variável dependente. Utilizou-se a restrição $m = 1 - 1/n$ (ANDRADE; STONE, 2009). Por definição, a umidade volumétrica (θ) é a relação entre o volume de água e o volume total de solo, considerando-se a densidade da água igual a 1 g cm⁻³.

$$\theta_v = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha\Psi)^n)^m) \quad (12)$$

Onde: θ_v = umidade gravimétrica do solo em cada potencial matricial (kg kg⁻¹); θ_r = umidade gravimétrica do solo no potencial matricial de 1500 kPa (kg kg⁻¹); θ_s = umidade gravimétrica do solo saturado (kg kg⁻¹); Ψ = potencial matricial (kPa); α , n , m = coeficientes da equação.

Com a diferença entre a massa das amostras saturadas com água e secas a 105°C, e com volume conhecido, calculou-se a porosidade e a densidade conforme o item 3.6.4.2.

Após o ajuste das curvas de retenção utilizando a equação 12, foi possível determinar o índice S para cada curva de retenção de água no solo, de acordo com Dexter (2004), utilizando a equação 13.

$$S = (-n(\theta_s - \theta_r))((1 + 1/m)^{-(1+m)}) \quad (13)$$

Onde: S = coeficiente angular da curva de retenção de água no ponto de inflexão; θ_r = umidade gravimétrica do solo no potencial matricial de 1500 kPa (kg kg⁻¹); θ_s = umidade gravimétrica do solo saturado (kg kg⁻¹); n , m = coeficientes da curva de retenção de água no solo (Equação 12).

3.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e as médias comparadas pelo teste t (LSD-Student) a 5% de probabilidade de erro, com auxílio do programa estatístico SISVAR® (FERREIRA, 2011). Utilizou-se o software *R* versão 3.5.2 (*R* CORE TEAM, 2018) para análise de componentes principais (PCA).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Carbono orgânico e nitrogênio totais do solo e fracionamento físico da matéria orgânica

Pelas análises de variância verifica-se que os efeitos dos sistemas de produção foram significativos até 0,20 m de profundidade para nitrogênio total (NT) e carbono orgânico total (COT). Para o carbono orgânico particulado (COp) as probabilidades de F foram significativas em todas as profundidades de solo estudadas (Tabela 5). Observa-se que esta fração de carbono mostrou-se mais sensível as alterações provocadas pelo manejo do solo, com menores valores de probabilidade de F (Tabela 5).

Tabela 5 – Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (C.V.) dos teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COp) e carbono orgânico associado a minerais (COam), nas camadas 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m

ANOVA	NT	COT	COp	COam
0,0 - 0,10 m				
Probab. de F	0,0506	<0,0001	<0,0001	0,1011
C.V. (%)	12,26	7,66	11,07	11,32
0,10 - 0,20 m				
Probab. de F	0,0041	0,0046	<0,0001	0,0255
C.V. (%)	11,97	10,02	9,90	11,35
0,20 - 0,40 m				
Probab. de F	0,2725	0,1317	<0,0001	0,4648
C.V. (%)	8,56	8,14	11,88	9,01

Os teores de NT apresentaram redução até a profundidade de 0,40 m, exceto para o consórcio MP com maior teor na camada 0,10-0,20 m (Figura 2A). Na camada superficial maiores teores de NT ocorreram na área de referência (CE), M e MP/P/P, contudo não houve diferença significativa entre os sistemas de produção. Em 0,10-0,20 m MP não difere do CE, sendo que os demais sistemas possuem menor teor de NT em relação à área de referência. E para a camada 0,20-0,40 m não houve diferença significativa ($p>0,05$) entre os tratamentos (Tabela 5 e Figura 2A).

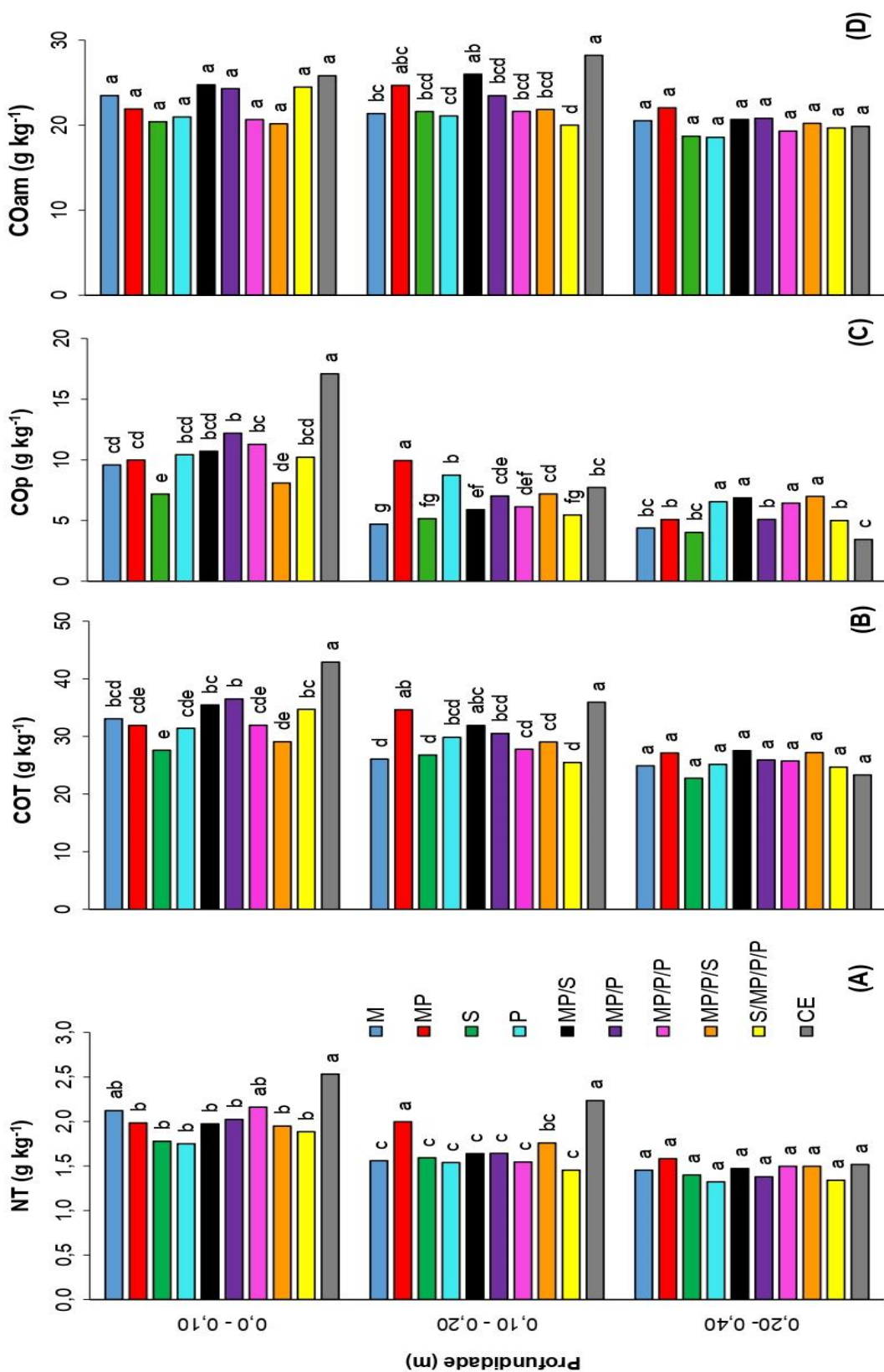
O consórcio MP propiciou maior acúmulo de NT e carbono na camada 0,10-0,20 m (Figura 2A, B), esse efeito pode ser devido ao sistema radicular do capim Piatã.

Este sistema é implantado anualmente no verão, e após a colheita do milho a forrageira permanece na área, assim o solo permanece coberto durante todo o ano, favorecendo o desenvolvimento das raízes da forrageira e o acúmulo de material orgânico em subsuperfície. Diferente do que ocorre nos sistemas com um ou dois anos de pastagem de Piatã, em que esta não recebe adubação de manutenção. Além disso, quando a forrageira é dessecada para semeadura da safra seguinte os resíduos, após decomposição, podem incrementar os teores de N e C no solo (CAMPBELL et al., 2000; LOSS et al., 2011; CASTOLDI, 2011; PEGORARO et al., 2011; COSTA et al., 2015).

Maior teor de carbono orgânico total (COT) ocorreu no CE na camada 0,0-0,10 m (Figura 2B). Entre os sistemas estudados MP/P, MP/S, S/MP/P/P e M diferem o monocultivo de soja (S), que possui menor teor de COT. Para a camada 0,10-0,20 m, os sistemas MP e MP/S não diferem do CE, e dessa forma apresentam maiores teores de COT, todavia sem diferir de P e MP/P. Os demais tratamentos são estatisticamente similares. Não houve diferença significativa em relação aos teores de COT para 0,20-0,40 m ($p=0,1317$) (Tabela 5 e Figura 2B).

Destaca-se que os teores de COT encontrados na área experimental estão atrelados ao alto teor de argila (média de 772 g kg^{-1} , Tabela 1) e ao histórico da área, com condução em SSD há 22 anos. Isso ocorre porque parte do conteúdo de C não lábil está associado à partículas de silte e argila como complexos organo-minerais, ficando dessa forma protegidos da ação microbiana (LLORENTE et al., 2010). Isto também pode ser observado na Figura 2D, onde a maior parte do COT, que corresponde a cerca de 68%, 77% e 79% em média, nas camadas 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, é composto por C não lábil, isto é, carbono ligado a minerais (COam). Geraei et al. (2016) ratificam este resultado por meio de correlação positiva entre C não lábil e partículas de silte e argila em trabalho com diferentes usos do solo, por isso sugerem que maior COT ocorre em solos com textura mais fina.

Figura 2. Teores de nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COp) e carbono orgânico ligado a minerais (COam), nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m



Santana et al. (2011) observaram teores de COT maiores para a área de mata nativa do que o verificado na presente pesquisa, e similares nas outras áreas avaliadas pelos autores, em Latossolo Vermelho distroférico textura muito argilosa.

Outros autores também verificaram teores similares de COT em seus estudos mesmo em solos com diferentes texturas (GAZOLLA et al., 2015; CONCEIÇÃO et al., 2014; SANTANA et al., 2011; WENDLING et al., 2005).

Wendling et al. (2005) estudaram áreas sob diferentes manejos no estado de Minas Gerais, em Latossolo Vermelho com relevo suave ondulado, tendo como testemunha uma área de vegetação fase floresta subcaducifolia. As áreas experimentais apresentavam teor de argila menor ou igual a 35%. Os autores encontraram teores de COT na vegetação nativa semelhantes aos observados no presente estudo, e para os demais manejos estudados por eles o teor de COT foi em média 20 g kg⁻¹.

Considerando a média das camadas superficiais (0,0-0,20 m), onde as diferenças para COT foram significativas, observa-se que na área com P houve redução de 22% no conteúdo de COT em relação ao CE. No entanto, nos sistemas MP, MP/S e MP/P esta proporção média é de 15%, sugerindo que estes tratamentos estão sendo mais eficientes na manutenção e/ou acúmulo de COT no solo, resultado que pode ser devido ao aporte de resíduos vegetais e ao manejo, com adubação anual (MP e MP/S) ou a cada dois anos, no caso de MP/P. Para os demais tratamentos a média ficou entre 24 e 26%.

O maior teor de COT na área de Cerrado nativo (CE) pode ser atribuído à quantidade e qualidade da serapilheira depositada na superfície do solo, que ali permanece devido à ausência de perturbação. Solos sob vegetação natural geralmente possuem um grande número de micro-organismos e plantas em equilíbrio no sistema, o que favorece o acúmulo e manutenção de C e N no solo. Portanto, em áreas com vegetação natural, tem-se constantemente resíduos em decomposição, contribuindo com os teores de COT, enquanto em áreas agrícolas há remoção de parte da biomassa produzida (FERREIRA et al., 2020).

O teor de carbono particulado (COp) na área de referência é superior aos sistemas estudados em 0,0-0,10 m (Figura 2C). Ainda nessa camada, observa-se que entre as áreas cultivadas MP/P apresenta maior teor de COp e não difere de P, MP/S, MP/P/P e S/MP/P/P. Os tratamentos S e MP/P/S possuem menor incremento dessa fração de carbono. O COp, de forma geral, tende a ser superior na camada superficial do solo,

já que nesta se concentram os resíduos recentemente adicionados (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Áreas de mata preservada têm um suprimento constante de material orgânico, o que aumenta as frações orgânicas lábeis de C e, com a constante renovação do material vegetal, essas frações se acumulam e são incorporadas ao solo também em formas recalcitrantes (FERREIRA et al., 2020).

Assim, constata-se, de forma geral, que houve redução nos teores de COp com a profundidade do solo, e o contrário ocorreu para COam. No entanto, no consórcio MP isso não aconteceu, pois os teores de COp se mantiveram similares nas primeiras camadas do solo e foram menores em 0,20-0,40 m. Dessa forma, na camada 0,10-0,20 m, o consórcio MP apresentou maior incremento de COp do que a área de referência, a qual foi semelhante à P, MP/P e MP/P/S. Na área com M, S e S/MP/P/P observa-se menor incremento de COp.

Houve diferença significativa para o teor de COp também na camada 0,20-0,40 m, pois esta fração de C no solo é mais sensível a alterações em função do uso e manejo adotado (SCHIAVO et al. 2011; ROSSI et al., 2012). Nessa camada os sistemas de produção apresentam teores de COp igual ou superior ao CE, sendo similares ao CE nos tratamentos com M e S, e superiores nos demais. Entre as áreas cultivadas há maior teor de COp nos sistemas com P, MP/S, MP/P/P e MP/P/S.

Na área de Cerrado acredita-se que o processo de decomposição seja mais acelerado em função da presença, geralmente maior e diversificada, de micro-organismos e à alta estabilidade do sistema, sendo o carbono recentemente aportado rapidamente utilizado dentro do sistema solo.

Já em M e S, há menor proporção de C lábil sendo aportado, de forma geral, em comparação aos demais sistemas com presença de forrageira, nos quais foram observados os maiores teores de COp na camada 0,20-0,40 m, o que pode ser devido a maior presença de resíduos de raízes que ainda estão em fase inicial de decomposição. As raízes da forrageira possuem um sistema radicular bem desenvolvido e conseguem atingir profundidades maiores no solo, incrementando os teores de COp (LOSS, 2011).

Para os teores de carbono ligado a minerais (COam) não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre os tratamentos na camada superficial e em 0,20-0,40 m (Figura 2D). As mudanças nessa fração de carbono ocorrem de forma mais lenta e gradual, uma vez que representa o carbono estável no solo (SOLLINS et al., 1996; CUNHA et al., 2005; SILVA; MENDONÇA, 2007).

Na profundidade de 0,10-0,20 m verifica-se maior teor de CO_{am} na área de CE, a qual não difere dos tratamentos com MP e MP/S. Estes dois sistemas são estatisticamente diferentes de S/MP/P/P, que tem menos CO_{am}. O resultado encontrado nessa camada de solo indica que o Cerrado nativo e os sistemas de produção com forrageira que recebem adubação anualmente tendem a proporcionar incremento no carbono estável do solo. Além disso, os sistemas de produção que fornecem entrada constante de matéria seca aérea e radicular e nos quais o solo permanece sempre coberto por resíduos vegetais, concorrem para manter a qualidade do solo e do sistema de produção (SÁ et al., 2013; ASSUNÇÃO et al., 2019).

4.1.1 Índices de Carbono

Na Tabela 6 encontram-se os dados de relação C/N do solo e os índices de carbono calculados a partir do fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) e do COT (Figura 2B, C e D).

Por meio das probabilidades de F oriundas das análises de variância (Tabela 6) nota-se que a relação C/N foi menos responsiva aos diferentes cultivos empregados, ao contrário do índice de compartimento de carbono (ICC) e do índice de manejo de carbono (IMC) na camada superficial, e da labilidade do C (L), índice de labilidade (IL) e IMC nas demais camadas, para os quais as probabilidades de F foram <0,0001.

Em 0,0-0,10 e 0,20-0,40 m não houve diferença significativa entre os tratamentos para a relação C/N, sendo a média dessas camadas de 16,73 e 17,69, respectivamente. Na camada 0,10-0,20 m, as áreas com P, MP/S e MP/P apresentam relação C/N superior ao CE, e este não difere dos demais tratamentos (Tabela 6). Esta maior relação C/N pode ser devido à menor decomposição dos resíduos vegetais radiculares nesses tratamentos, pois a redução da relação C/N é condicionada pelo consumo de resíduos pelos micro-organismos do solo, constituindo-se em um indicativo da humificação da MOS (LUCA et al., 2008). Já as menores relações na camada superficial, de forma geral, podem ser atribuídas ao suprimento de N pelos resíduos vegetais e/ou fertilizantes aplicados (SÁ et al., 2001; GRAHAM et al., 2002). De acordo com Stevenson (1994), nos solos tropicais sem revolvimento, o equilíbrio na relação C/N ocorre entre valores de 10 e 15.

Tabela 6 – Relação C/N, índice de compartimento de carbono (ICC), Labilidade (L), Índice de Labilidade (IL) e índice de Manejo de Carbono (IMC), nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m

Sistema de produção	Cultivo anterior (2015/16)	C/N	ICC	L	IL	IMC
0,0 – 0,10 m						
M ¹	Milho	15,70 a	0,77 bcd	0,41 bc	0,64 bcd	49 cd
MP	Milho+Piatã	16,22 a	0,74 cd	0,45 bc	0,70 bcd	52 cd
S	Soja	15,54 a	0,64 e	0,35 c	0,54 d	34 e
P	Piatã	17,93 a	0,73 cde	0,51 b	0,80 bc	57 bcd
MP/S	Soja	17,99 a	0,83 bc	0,43 bc	0,68 bcd	56 bcd
MP/P	Piatã	18,08 a	0,85 b	0,50 b	0,78 bc	66 b
MP/P/P	Piatã	15,13 a	0,74 cde	0,54 ab	0,83 ab	62 bc
MP/P/S	Soja	15,13 a	0,67 de	0,44 bc	0,67 bcd	46 de
S/MP/P/P	Soja	18,61 a	0,81 bc	0,42 bc	0,63 cd	51 cd
CE		16,95 a	1,00 a	0,67 a	1,00 a	100 a
C.V. (%) ²		9,58	7,41	16,72	15,72	13,77
Probab. de F		0,0846	<0,0001	0,0097	0,0076	<0,0001
0,10 – 0,20 m						
M	Milho	16,74 bc	0,72 d	0,22 d	0,80 e	58 f
MP	Milho+Piatã	17,58 abc	0,97 ab	0,40 a	1,48 a	142 a
S	Soja	16,83 bc	0,75 cd	0,24 cd	0,88 cde	65 f
P	Piatã	19,29 a	0,83 bcd	0,42 a	1,53 a	125 b
MP/S	Soja	19,46 a	0,89 abc	0,22 cd	0,82 de	73 ef
MP/P	Piatã	18,55 ab	0,85 bcd	0,30 b	1,09 bc	92 cd
MP/P/P	Piatã	17,97 abc	0,77 cd	0,28 bc	1,04 bcd	81 de
MP/P/S	Soja	16,62 bc	0,81 cd	0,33 b	1,23 b	98 c
S/MP/P/P	Soja	17,55 abc	0,71 d	0,27 bcd	1,00 cde	71 ef
CE		16,17 c	1,00 a	0,27 bcd	1,00 cde	100 c
C.V. (%)		6,70	10,00	11,70	11,93	10,00
Probab. de F		0,0009	0,0046	<0,0001	<0,0001	<0,0001
0,20 – 0,40 m						
M	Milho	17,20 a	1,07 a	0,21 bc	1,25 bc	135 bc
MP	Milho+Piatã	17,25 a	1,16 a	0,23 bc	1,34 bc	155 b
S	Soja	16,34 a	0,98 a	0,22 bc	1,26 bc	121 bc
P	Piatã	19,00 a	1,08 a	0,35 a	2,06 a	222 a
MP/S	Soja	18,69 a	1,17 a	0,33 a	1,94 a	230 a
MP/P	Piatã	18,76 a	1,11 a	0,24 b	1,42 b	157 b
MP/P/P	Piatã	17,37 a	1,11 a	0,33 a	1,94 a	212 a
MP/P/S	Soja	18,19 a	1,17 a	0,34 a	2,01 a	235 a
S/MP/P/P	Soja	18,63 a	1,06 a	0,25 b	1,46 b	155 b
CE		15,40 a	1,00 a	0,17 c	1,00 c	100 c
C.V. (%)		8,33	8,18	12,06	13,26	15,17
Probab. de F		0,1117	0,1453	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$). ¹M- Milho solteiro em sucessão anual; MP – consórcio Milho+Piatã em sucessão anual; S - Soja em sucessão anual; P - Pastagem de Piatã em cultivo solteiro; MP/S - Milho+Piatã e Soja em rotação anual; MP/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem de Piatã em rotação anual; MP/P/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem por 2 anos; MP/P/S - Sequência Milho+Piatã, pastagem de Piatã e Soja em rotação anual; S/MP/P/P - Sequência Soja, Milho+Piatã, e pastagem de Piatã por 2 anos em rotação; CE - Cerrado nativo.

²Anova: C.V. (%) - Coeficiente de variação; Probab. de F - probabilidade dos valores de F.

O ICC estabelece relação entre o COT das áreas cultivadas e o COT da área de referência, no caso Cerrado nativo. De forma geral, observa-se aumento no ICC na profundidade 0,20-0,40 m para os sistemas de produção. Na profundidade 0,0-0,10 m todos os tratamentos ficaram abaixo de 1,00, valor padrão da área de referência, no entanto, os sistemas MP/P, MP/S e S/MP/P/P obtiveram índices mais próximos do CE, diferindo de S e MP/P/S com menores ICCs. Para a camada 0,10-0,20 m constata-se que MP e MP/S não diferem do CE e na camada 0,20-0,40 m não houve diferença significativa para os tratamentos avaliados nesta pesquisa (Tabela 6). Nos sistemas com maior ICC pode-se inferir que houve incremento ou pelo menos manutenção de C no solo ao longo dos anos de cultivo em SSD (FARIAS et al., 2015).

A labilidade do carbono no solo (L) expressa a relação entre o C lábil e o C não lábil. Na camada 0,0-0,10 m, a labilidade foi maior no CE sem diferir do sistema MP/P/P (Tabela 6). Ainda os tratamentos P, MP/P e MP/P/P diferem de S, que apresenta menor labilidade em função do seu menor teor de C lábil (Figura 2C). A cultura da soja fornece menor quantidade de resíduos vegetais e esses resíduos apresentam baixa relação C/N, por isso se decompõe mais rápido que os resíduos de Piatã. Como a coleta de solo foi realizada no mês de março, ou seja, aproximadamente há um ano da colheita da soja do ano anterior, é provável que esses sejam os motivos da menor presença de COp neste tratamento e, conseqüentemente, da menor L na camada superficial do solo.

Na camada 0,10-0,20 m os tratamentos com MP e P possuem maior labilidade que os demais sistemas de cultivo, os quais não diferem da área CE. Em 0,20-0,40 m observa-se que os tratamentos com M, MP e S não diferem do Cerrado, entretanto maior labilidade foi verificada em P, MP/S, MP/P/P e MP/P/S (Tabela 6).

Salton (2005) estudando matéria orgânica e agregação do solo em rotação lavoura-pastagem sob Latossolo Vermelho Distroférrico de textura argilosa em Dourados-MS, observou L inferior aos valores encontrados nesta pesquisa, tanto para a área com vegetação nativa, variando de 0,08 à 0,28, como na área com lavoura em SSD, de cerca de 0,08 a 0,26, na camada 0,0-0,20 m. A divergência dos resultados está relacionada aos diferentes teores de C, sendo menores os verificados por Salton (2005) do que os da Figura 2. No entanto, da mesma forma que observado por Salton (2005), houve maior L na camada superficial do solo o que pode ser atribuído à maior quantidade de resíduos vegetais e concentração de COp, em termos gerais (Figura 2C).

O IL aumentou em profundidade, devido à redução dos valores de L na área de referência e, em geral, nos tratamentos. Esta observação também é verificada nos trabalhos de Salton (2005) e Rossi et al. (2012). Na camada superficial, o sistema MP/P/P não difere do CE quanto ao IL, estando, portanto, mais próximo de 1,00, valor da área de referência CE. Percebe-se, ainda, que os tratamentos P e MP/P são superiores à área com S, a qual possui menor IL, assim como ocorreu com a L. Na camada subsuperficial, os tratamentos MP e P seguidos de MP/P/S são superiores aos demais, os quais não diferem do CE. Em 0,20-0,40 m verifica-se o mesmo resultado obtido para L (Tabela 6). Embora haja diferença nos teores de C entre os tratamentos, pelo IL é possível observar se a L desses é próxima ou abaixo da condição natural sem intervenção antrópica, de forma que valores de IL próximos ou acima de 1,00 indicam que o sistema de produção empregado está proporcionando adição de C lábil similar ou maior que a condição original, respectivamente.

Rossi et al. (2012), ao avaliarem áreas com cultivo de soja no período chuvoso e *Brachiaria ruziziensis* no período seco, soja na safra e sorgo na safrinha e uma área de vegetação nativa, sob Latossolo Vermelho Distrófico em Montividiu-GO, observaram valores de IL entre 1,1 a 4,9 na camada 0,0-0,10 m e acima de 5,0 na camada 0,10-0,20 m. Nas áreas estudadas por Rossi et al. (2012) eram estabelecidos dois cultivos diferentes no ano, com leguminosa seguida por uma espécie gramínea, o que contribui para o aumento nos teores de C lábil e, conseqüentemente, no IL.

Os valores de IMC foram superiores conforme o aumento da profundidade do solo para os nove sistemas de produção estudados, sendo que o Cerrado tem um valor padrão de referência (CE=100) (Tabela 6).

Na camada superficial, os IMCs dos sistemas de produção foram inferiores à área de referência. Constata-se que o tratamento S apresenta o menor IMC nessa camada sem diferir de MP/P/S, e os maiores IMCs ocorrem em MP/P e MP/P/P diferindo das demais áreas cultivadas. De forma geral, em 0,0-0,10 m o IMC foi, em média, aproximadamente 34% (MP/P) a 66% (S) menor do que no CE.

Em 0,10-0,20 m os tratamentos MP e P apresentam IMC superior ao CE. As áreas com MP/P e MP/P/S não diferem da área de referência. Menor IMC ocorre nas áreas com M e S, sem diferir de MP/S e S/MP/P//P. Na camada 0,20-0,40 m, todos os sistemas de produção apresentam IMC superior a 100 (CE), sendo estatisticamente superiores na área com P, MP/S, MP/P/P e MP/P/S em relação aos demais tratamentos (Tabela 6).

O IMC representa uma medida de sustentabilidade dos diferentes sistemas de produção ou usos da terra e pode ser usado para comparar as mudanças que ocorrem nos conteúdos de C lábil e COT em decorrência das práticas agrícolas (SIGNOR; CERRI, 2013).

Segundo Silva et al. (2011b), os tratamentos com maiores valores de IMC evidenciam capacidade de promover a sustentabilidade do sistema de produção em regiões tropicais, pela manutenção de C no sistema agrícola. Desse modo, os maiores valores de IMC significam efeito positivo das práticas de uso e manejo do solo sobre o conteúdo de matéria orgânica (RAUBER; ANDRADE; MAFRA, 2017), enquanto os menores valores indicam que os compostos de C estão sendo degradados (BLAIR et al., 1995), refletindo a menor quantidade e qualidade dos resíduos adicionados pelos sistemas de produção, ou seja, menor conteúdo de C lábil (SIGNOR; CERRI, 2013). De Bona et al. (2008) e Signor e Cerri (2013) destacam que o IMC deve ser usado como um indicador da qualidade do solo, mas é preciso levar em consideração também que vários outros fatores além da labilidade do C, utilizada para o cálculo do IMC, influenciam a qualidade do solo.

4.2 Fracionamento químico da matéria orgânica do solo

O fracionamento químico da MOS (Tabela 7) ratifica o resultado obtido através do fracionamento físico (Figura 2C e D) pelo padrão semelhante, com maiores quantidades carbono como complexos orgânico-minerais no solo e, por consequência, menores na fração lábil, o que também foi observado por Gmach et al. (2018).

O fracionamento químico, dado pelos teores de C nas substâncias húmicas (humina, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos), demonstra efeito significativo dos sistemas de produção, com exceção da fração de ácidos húmicos (C_{AH}) na camada 0,20-0,40 m ($p=0,1495$). De forma geral, nota-se que os menores valores de probabilidade de F ocorreram nas primeiras camadas do solo (Tabela 7).

Em relação aos teores de C na fração humina (C_{Hum}), constata-se que a área CE apresenta maior teor na camada superficial do solo (Tabela 7). Ainda nessa camada, o sistema MP/P possui C_{Hum} superior ao M, sendo os demais tratamentos estatisticamente similares a ambos. Na camada 0,10-0,20 m, o CE também apresenta maior C_{Hum} , mas não difere de MP e P. Em 0,20-0,40 m, o tratamento MP/P/S tem

maior C_{Hum} , porém não difere do CE e de MP, MP/S e S/MP/P/P, ademais na área com S em monocultivo nota-se menor C_{Hum} sem diferir de M e MP/P/P (Tabela 7).

Tabela 7 – Teores de carbono orgânico nas frações químicas da MOS: Humina (C_{Hum}), ácidos húmicos (C_{AH}), ácidos fúlvicos (C_{AF}) e relação C_{AH}/C_{AF} , nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m

Sistema de produção	Cultivo anterior	C _{Hum}		C _{AH}		C _{AF}		C _{AH} /C _{AF}	
(2015/16)		----- (g kg ⁻¹) -----							
0,0 – 0,10 m									
M ¹	Milho	10,60	c	5,87	abcd	7,85	a	0,74	cd
MP	Milho+Piatã	12,97	bc	4,63	de	6,70	abc	0,70	d
S	Soja	12,52	bc	4,61	de	3,75	f	1,24	a
P	Piatã	12,47	bc	3,86	e	6,08	bcde	0,64	d
MP/S	Soja	11,82	bc	5,00	bcde	8,04	a	0,62	d
MP/P	Piatã	13,89	b	6,22	ab	4,75	ef	1,31	a
MP/P/P	Piatã	13,23	bc	6,03	abc	6,20	bcd	1,00	b
MP/P/S	Soja	13,21	bc	4,75	cde	5,15	def	0,94	bc
S/MP/P/P	Soja	12,87	bc	5,04	bcde	5,37	cde	0,94	bc
CE		18,12	a	7,15	a	7,04	ab	1,01	b
C.V. (%) ²		12,22		14,80		13,72		13,96	
Probab. de F		0,0035		0,0028		<0,0001		<0,0001	
0,10 – 0,20 m									
M	Milho	10,60	c	5,45	de	4,17	cde	1,35	ab
MP	Milho+Piatã	13,33	ab	6,92	bc	4,44	cde	1,57	a
S	Soja	10,47	c	5,78	cd	3,44	e	1,86	a
P	Piatã	13,33	ab	5,01	de	5,46	bc	0,92	bc
MP/S	Soja	11,06	bc	8,37	a	5,03	bcde	1,73	a
MP/P	Piatã	11,22	bc	7,20	ab	3,80	de	1,90	a
MP/P/P	Piatã	10,27	c	5,17	de	3,67	de	1,42	ab
MP/P/S	Soja	11,17	bc	4,30	e	7,36	a	0,60	c
S/MP/P/P	Soja	11,52	bc	5,54	de	5,15	bcd	0,88	bc
CE		14,67	a	5,65	d	6,48	ab	0,88	bc
C.V. (%)		12,14		12,54		19,58		24,88	
Probab. de F		0,0163		<0,0001		0,0014		0,0006	
0,20 – 0,40 m									
M	Milho	8,21	de	4,82	a	4,55	bc	1,07	abc
MP	Milho+Piatã	12,59	ab	4,30	a	5,27	ab	0,82	c
S	Soja	8,14	e	4,30	a	3,65	c	1,21	ab
P	Piatã	10,56	bc	4,06	a	5,68	ab	0,72	c
MP/S	Soja	11,83	ab	4,67	a	5,41	ab	0,86	bc
MP/P	Piatã	10,43	bcd	4,56	a	5,87	a	0,78	c
MP/P/P	Piatã	9,50	cde	3,36	a	4,52	bc	0,84	c
MP/P/S	Soja	13,01	a	4,45	a	4,47	bc	1,00	abc
S/MP/P/P	Soja	10,97	abc	4,07	a	5,41	ab	0,75	c
CE		11,88	ab	4,59	a	3,38	c	1,37	a
C.V. (%)		12,30		12,70		14,66		22,75	
Probab. de F		0,0019		0,1495		0,0041		0,0218	

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$).

¹M - Milho solteiro em sucessão anual; MP - consórcio Milho+Piatã em sucessão anual; S - Soja em sucessão anual; P - Pastagem de Piatã em cultivo solteiro; MP/S - Milho+Piatã e Soja em rotação anual; MP/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem de Piatã em rotação anual; MP/P/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem por 2 anos; MP/P/S - Sequência Milho+Piatã, pastagem de Piatã e Soja em rotação; S/MP/P/P - Sequência Soja, Milho+Piatã, e pastagem de Piatã por 2 anos em rotação; CE - Cerrado nativo.

²Anova: C.V. (%) - Coeficiente de variação; Probab. de F - probabilidade dos valores de F.

A fração humina compõe o carbono mais estável e muito resistente à decomposição (SOLLINS et al., 1996), representando geralmente a maior parte do C humificado em solos tropicais (BENITES et al., 2003; 2017), como verificado neste estudo, uma vez que, o C_{Hum} representou em média, cerca de 53% das substância húmicas nas áreas cultivadas e 57% no CE.

A composição molecular da fração humina é bastante complexa devido à presença de estruturas moleculares mais recalcitrantes, com maior grau de polimerização e peso molecular em relação às outras frações (SOLLINS, et al., 1996; SILVA; MENDONÇA, 2007), ocorrendo variação em sua composição em função dos resíduos que são adicionados ao solo (ZECH et al., 1997). A redução de C nessa fração da MOS indica que as práticas de manejo do solo conduziram a perda de parte do C estável no decorrer dos anos de cultivo, desde a conversão da mata nativa em área agricultável.

Para os teores de C na fração de ácidos húmicos (C_{AH}), verifica-se que o CE, com maior teor nessa fração da MOS, não difere de MP/P, MP/P/P e M, em 0,0-0,10 m. Na camada 0,10-0,20 m, diferem da área de referência o sistema MP/S e MP/P com maiores teores de C_{AH} seguidos de MP. O sistema MP/P/S difere do CE por possuir menos C nessa fração (Tabela 7).

Esperava-se que no tratamento S em monocultivo, os teores de C nas frações químicas da MOS fossem menores que nos demais tratamentos, uma vez que esta cultura fornece menor cobertura do solo, todavia não se observou este efeito para C_{Hum} na camada superficial e C_{AH} nas demais camadas. Isso pode ser justificado pela elevada resiliência dessas frações e, também pelo alto teor de argila do solo (Tabela 1) que confere ao carbono orgânico maior proteção coloidal dificultando a degradação da matéria orgânica (WENDLING et al., 2005). Apesar disso, foi possível verificar diferenças na fração C_{AF} .

Os teores de C_{AF} , na camada superficial do solo, foram maiores em M e MP/S, sem diferir de MP e do CE. Na camada 0,10-0,20 m, maior C_{AF} encontra-se no tratamento MP/P/S sem diferir do CE. Os menores teores nessa fração ocorrerem em S, a qual

não difere de M, MP, MP/S, MP/P e MP/P/P. Em 0,20-0,40 m, observa-se menor C_{AF} na área de referência e em S, sendo estatisticamente semelhantes aos tratamentos M, MP/P/P e MP/P/S. Enquanto que MP/P apresenta teores superiores sem diferir, no entanto, de MP, P, MP/S e S/MP/P/P (Tabela 7).

O C_{AH} assume um papel importante como indicador da qualidade da MOS porque esta fração é a que mais passa por alterações estruturais durante o processo de humificação (CUNHA et al., 2005). Por sua vez, os AF são considerados como a fração mais lábil das substâncias húmicas, e assim, mais suscetível a mudanças (ZECH et al., 1997; CHAN, 2001; GMACH et al., 2018), pois possuem menor peso molecular e maior quantidade de grupos carboxílicos, por isso apresentam maior solubilidade e polaridade (SILVA; MENDONÇA, 2007). Contudo, de acordo com Chan (2001), ambas as frações são importantes na manutenção da qualidade do solo e, portanto, podem ser usadas como indicadores dos efeitos de uso e manejo, pois as diferentes frações das substâncias húmicas apresentam envolvimento direto em grande parte dos processos físicos, químicos e biológicos no solo (CANELLAS et al., 2008).

A redução nos teores de C nas frações de substâncias húmicas com o aumento da profundidade, que ocorreu de forma mais evidente no CE (Tabela 7), provavelmente seja uma consequência da adição de resíduos vegetais depositados na superfície do solo e, em razão disso, da maior atividade da fauna e microbiota do solo. A maior presença de resíduos culturais na superfície do solo também pode explicar os maiores teores de C_{AF} em 0,0-0,10 m, que ocorreu na maioria dos sistemas estudados.

Para a relação C_{AH}/C_{AF} observa-se que, na camada 0,0-0,10 m, os tratamentos S e MP/P apresentam maiores valores, seguidos por CE, MP/P/P, MP/P/S e S/MP/P/P (Tabela 7). Em 0,10-0,20 m, as maiores relações se encontram nos sistemas MP, S, MP/S e MP/P sem diferir de M e MP/P/P. Na camada 0,20-0,40 m, o CE apresenta maior razão C_{AH}/C_{AF} , mas não difere de M, S e MP/P/S.

Segundo Gmach et al. (2018) a relação C_{AH}/C_{AF} reflete a mobilidade de C presente na MOS, logo a redução neste parâmetro pode significar perda de MOS causada pelo uso e manejo do solo, devido a oxidação microbiana dos materiais orgânicos protegidos nos agregados do solo (SPACCINI et al., 2000).

Neste estudo, constata-se que a relação C_{AH}/C_{AF} variou entre as camadas de solo e sistemas de produção (Tabela 7), já que as frações de AH não foram sempre maiores que as de AF, embora, em sua maioria, os valores de C_{AH}/C_{AF} estejam

próximos ou acima de 1,00, os quais indicam áreas onde há predomínio de material orgânico mais estável e de melhor qualidade (CANELLAS et al., 2003; GAZOLLA et al., 2015). Gazolla et al. (2015) encontraram valores próximos a 1,00 na camada 0,0-0,05 m para áreas conduzidas em SSD, e segundo os autores esses resultados indicam material de boa qualidade que poderia melhorar as propriedades do solo, o que também é relatado por outros estudos encontrados na literatura (EBELING et al., 2004; GIÁCOMO et al., 2008; GMACH et al., 2018).

De acordo com Canellas et al. (2003), a presença da fração C_{AH} tem sido relacionada a solos férteis e com alto conteúdo de bases trocáveis. Segundo Stevenson (1994) o baixo conteúdo de bases trocáveis no solo pode diminuir a intensidade do processo de humificação, ou seja, as reações de síntese e condensação química e microbiana, o que pode levar a ocorrência de menor relação C_{AH}/C_{AF} nos solos intemperizados de Cerrado (CUNHA et al., 2005). Portanto, o C_{AH} é considerado um marcador do processo de humificação, refletindo o uso e o manejo do solo, já que representa a fração intermediária no processo de estabilização dos compostos húmicos (RANGEL; SILVA, 2007; SANTOS et al., 2013).

No entanto, nota-se que o tratamento S em monocultivo apresenta relação C_{AH}/C_{AF} maior que 1,00 em todo o perfil, contudo, isso não conduziu a maiores teores de C_{AH} e C_{HUM} em comparação aos outros tratamentos, indicando que a maior relação C_{AH}/C_{AF} em S deve-se, na verdade, à menor proporção de C lábil (Figura 2C), a partir do qual é formada a MOS humificada, o que levou a menores teores de C_{AF} neste tratamento.

O fracionamento químico, embora mais trabalhoso e com maior possibilidade de erros, permitiu visualizar diferenças significativas no C humificado mesmo quando os resultados do fracionamento físico não foram significativos. Com o método químico também é possível detectar em qual das frações húmicas está ocorrendo maior acúmulo de C, enquanto que no físico isso não é possível. Por isso, a associação dos métodos propicia melhor análise da MOS e maior confiabilidade aos resultados obtidos.

O acúmulo de MOS humificada ocorre de forma bastante lenta, consequentemente as alterações causadas pelo uso e manejo do solo podem não apresentar diferenças significativas em todas as frações no curto espaço de tempo em regiões tropicais (TRUMBORE; CZIMCZIK, 2008; WANG et al., 2014; GMACH et al., 2018), pelas maiores taxas de decomposição favorecidas por altas temperaturas, características

dessas regiões (FREITAS et al., 2000; GMACH et al., 2018). Todavia as diferenças significativas observadas neste estudo podem ser devido ao tempo de conversão da área nativa para cultivo agrícola, tendo ocorrido há 22 anos, sendo que o experimento com os sistemas de produção tem sete anos de condução.

4.3 Física do solo

4.3.1 Estabilidade de Agregados

A porcentagem de agregados maiores que 2 mm (%Agreg>2mm) foi superior na área de CE, sendo que os tratamentos P, MP/P e MP/P/P não diferiram ($p \leq 0,05$) deste (Tabela 8). Menor porcentagem de agregados foi obtido no tratamento com S em monocultivo, 41% menor que a área de referência CE, e não diferiu estatisticamente dos sistemas com MP/S e S/MP/P/P, os quais possuem cerca de 30% menos agregados que o CE.

Tabela 8 – Porcentagem de agregados de maiores que 2,0 mm estáveis em água (%Agreg>2mm), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA), na camada de 0,0 - 0,10 m

Sistema de produção	Cultivo anterior	%Agreg>2mm		DMG		DMP		IEA	
	(2015/16)	(%)		----- (mm) -----				(%)	
M ¹	Milho	78,6	bcd	3,13	bcde	4,08	bcd	96,13	a
MP	Milho+Piatã	82,1	bcd	3,40	bcd	4,24	bcd	97,22	a
S	Soja	57,4	e	2,21	e	3,21	e	94,61	a
P	Piatã	90,9	ab	4,08	ab	4,60	ab	98,06	a
MP/S	Soja	68,0	de	2,54	de	3,66	de	95,27	a
MP/P	Piatã	85,1	ab	3,62	bc	4,37	ab	97,04	a
MP/P/P	Piatã	84,4	abc	3,53	bcd	4,34	abc	96,70	a
MP/P/S	Soja	77,6	bcd	3,14	bcde	4,06	bcd	96,36	a
S/MP/P/P	Soja	69,4	cde	2,69	cde	3,70	cde	94,49	a
CE		98,1	a	4,76	a	4,91	a	99,38	a
C.V. (%) ²		11,41		17,85		9,26		2,01	
Probab. de F		0,0015		0,0021		0,0017		0,1300	

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$).

¹M- Milho solteiro em sucessão anual; MP – consórcio Milho+Piatã em sucessão anual; S - Soja em sucessão anual; P - Pastagem de Piatã em cultivo solteiro; MP/S - Milho+Piatã e Soja em rotação anual; MP/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem de Piatã em rotação anual; MP/P/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem por 2 anos; MP/P/S - Sequência Milho+Piatã, pastagem de Piatã e Soja em rotação; S/MP/P/P - Sequência Soja, Milho+Piatã, e pastagem de Piatã por 2 anos em rotação; CE - Cerrado nativo.

²Anova: C.V. (%) - Coeficiente de variação; Probab. de F - probabilidade dos valores de F.

Ao observar os dados de diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG) constata-se que apenas o P é estatisticamente similar ao CE, e difere de S, MP/S e S/MP/P/P. Já com relação ao diâmetro médio ponderado (DMP) observa-se comportamento semelhante ao verificado para %Agreg>2mm.

A área sem interferência antrópica (CE) mantém sua estrutura inalterada e, por conseguinte, apresenta melhores índices de agregação do solo. Os sistemas de produção que envolvem o cultivo de Piatã solteira e sem cultivo de soja na sucessão de culturas obtiveram, em geral, melhores índices.

Segundo Cavalcante et al. (2019), a cobertura eficaz da superfície por forrageiras reduz ou até mesmo evita o impacto das gotas de chuva, cria rugosidade hidráulica e reduz o escoamento superficial (HUI et al., 2010; ZHAO et al., 2016; CANTALICE et al., 2017), favorecendo a preservação da umidade no solo e contribuindo para um ambiente mais favorável à agregação deste (COSTA et al., 2015).

A literatura tem indicado o importante papel do IMC na agregação (HAYNES, 2004; MILNE; HURISSO et al., 2013; CAVALCANTE et al., 2019; GHOSH et al., 2019). No presente estudo os tratamentos que apresentaram maior IMC (Tabela 6) também possuem melhor agregação, exceto MP/S. Uma possível justificativa, talvez, seja o período com solo descoberto da safra anterior (2015/16), referente ao cultivo de soja.

Observa-se que o tempo de cultivo na área S apresenta efeito negativo sobre a agregação e, em menor grau, este efeito ocorre nos outros sistemas em que a área fica sem cultivo no período de outono-inverno (quando há cultivo de soja no verão). Isso mostra que o fato do solo ficar parte do ano sem vegetação implica desestruturação ao longo do tempo, porque além da proteção do solo, a vegetação atua na formação dos agregados através da ação mecânica das raízes e/ou por excreção de substâncias com ação cimentante (BRONICK; LAL, 2005; NICODEMO et al., 2018), às quais podem servir de substrato para micro-organismos, estimulando sua atividade, levando à produção de novos agentes cimentantes (SILVA; MENDONÇA, 2007).

Oades (1984) relata que os agentes orgânicos transicionais e os temporários estão envolvidos na formação e estabilização dos macroagregados do solo. Os transicionais são, principalmente, polissacarídeos, que rapidamente são decompostos pelos micro-organismos (ANGERS; MEHUYS, 1989) e os agentes temporários são as raízes e hifas de fungos (OADES, 1984; BASTOS et al., 2005; SILVA; MENDONÇA, 2007).

De acordo com Hungria et al. (2009), a entrada contínua de matéria orgânica em SSD, aumenta a atividade microbiana do solo, formando agentes agregadores, desde subprodutos microbianos a exsudatos radiculares (SIX et al., 2002; FERREIRA et al., 2020). Dessa forma, o efeito da vegetação também está atrelado às frações de carbono orgânico, pois representam importantes agentes de ligação na formação de agregados (SIX et al., 2002).

Os agregados maiores podem ser formados em torno de resíduos recentemente adicionados ao solo, os quais compõe a matéria orgânica particulada (SIX et al., 2000). Esses resíduos induzem a formação de macroagregados por ser fonte de C lábil para a atividade microbiana e para a produção de agentes de ligação (FERREIRA et al., 2020). Portanto, o carbono particulado, provavelmente, favoreceu a formação de agregados e o DMP no CE, P, MP/P e MP/P/P, tendo em vista que o CE e MP/P/P, seguido de P e MP/P, apresentaram maior Labilidade de carbono (L) em relação aos demais sistemas (Tabela 6), e no CE, MP/P e MP/P/P houve maior teor de CO_p na camada superficial do solo (Figura 2C).

Além do efeito do C lábil (CO_p), a agregação nos tratamentos CE, MP/P e MP/P/P pode estar relacionada aos maiores valores de C_{AH} nesses tratamentos (Tabela 7), e ao C_{Hum} no sistema MP/P, na camada superficial. A matéria orgânica humificada tem capacidade de se associar às partículas minerais do solo, formando ligações argilo-metal-húmicas (EDWARDS; BREMNER, 1967), o que contribui com a agregação do solo (BASTOS et al., 2005; SILVA; MENDONÇA, 2007; TAVARES FILHO et al., 2014).

Em solos tropicais, há forte ação cimentante entre as partículas primárias, proporcionada pelos oxihidróxidos de Fe e Al e pela forte interação com caulinita (SILVA; MENDONÇA, 2007). Essas interações físico-químicas juntamente com as ligações argilo-metal-húmicas são responsáveis pela formação e estabilização dos microagregados (TISDALL; OADES, 1982; OADES, 1989; BASTOS et al., 2005; SILVA; MENDONÇA, 2007).

Além do papel cimentante das partículas do solo, a MOS humificada retarda a entrada de água nos agregados e, conseqüentemente, sua ação desagregadora, aumentando a resistência desses quando umedecidos (SILVA; MENDONÇA, 2007). Esse papel importante na proteção dos agregados deve-se a natureza predominantemente apolar da fração mais recalcitrante, C_{Hum}, que é pouco modificada devido a sua associação com a fração mineral (CUNHA et al., 2005). Ainda a fração de C_{AH}, devido às suas características hidrofóbicas, é importante na estabilização e

formação de macroagregados dos solos com intemperismo avançado (BASTOS et al., 2005).

A maior agregação nas áreas CE e P podem também ser atribuídas, em parte, a processos químicos, uma vez que essas áreas não são corrigidas quimicamente, assim, espera-se uma condição ácida e com altos teores de alumínio, o que pode estar favorecendo a agregação, pois cátions polivalentes possuem ação agregante no solo (ALVES, 2020).

O índice de estabilidade de agregados (IEA) não apresentou resposta significativa ($p=0,1300$) em função dos diferentes sistemas de produção avaliados nesta pesquisa. Apesar disso, é importante ressaltar os altos valores deste índice (acima de 90%) refletindo o histórico de utilização da área em SSD (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998; ROSCOE et al., 2006) e a textura muito argilosa (Tabela 1) (BRONICK; LAL, 2005; SALTON et al., 2008). Lal (2000) e Madari (2004) destacam que os solos tropicais, em geral, são originalmente bem estruturados, com altos IEA, a exemplos dos Latossolos.

4.3.2 Densidade e porosidade do solo

Verifica-se pelos menores valores de probabilidade de F que a macroporosidade (Macro) ($p<0,0001$) foi mais sensível às mudanças causadas pelos sistemas de produção em todo o perfil do solo, seguida da densidade e da microporosidade (Micro), em comparação com a porosidade total (PT) (Tabela 9).

A área de referência (CE) é estatisticamente diferente dos sistemas de produção estudados em todo o perfil para os dados de densidade e Macro, e nas primeiras camadas do solo para Micro. Assim, em CE tem-se menor densidade, maior volume de Macro e menor de Micro (Tabela 9). Dessa forma, é possível perceber que houve redução da Macro e aumento de Micro e da densidade nas áreas cultivadas, pois com o cultivo do solo ocorrem alterações nas propriedades físicas e normalmente essas alterações são desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas em comparação à condição original (SPERA et al., 2004; CALONEGO et al., 2011b).

Tabela 9 – Densidade, macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT) nas camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m

Sistema de produção	Cultivo anterior	Densidade	Macro	Micro	PT
	(2015/16)	(Mg m ⁻³)	----- (m ³ m ⁻³) -----		
0,0 – 0,10 m					
M ¹	Milho	1,11 ab	0,11 bc	0,47 a	0,58 bc
MP	Milho+Piatã	1,08 abc	0,11 bc	0,48 a	0,59 ab
S	Soja	1,12 a	0,09 c	0,46 a	0,55 c
P	Piatã	1,06 bc	0,12 b	0,46 a	0,59 bc
MP/S	Soja	1,04 c	0,12 b	0,48 a	0,61 ab
MP/P	Piatã	1,08 abc	0,11 bc	0,45 a	0,57 bc
MP/P/P	Piatã	1,09 abc	0,11 bc	0,47 a	0,58 bc
MP/P/S	Soja	1,07 abc	0,11 bc	0,47 a	0,58 bc
S/MP/P/P	Soja	1,11 ab	0,12 b	0,47 a	0,60 ab
CE		0,78 d	0,30 a	0,33 b	0,63 a
C.V. (%) ²		3,19	11,22	4,38	4,04
Probab. de F		<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0411
0,10 – 0,20 m					
M	Milho	1,10 a	0,11 bc	0,48 ab	0,59 a
MP	Milho+Piatã	1,02 abc	0,13 bc	0,45 ab	0,58 a
S	Soja	1,03 abc	0,11 bc	0,47 ab	0,58 a
P	Piatã	1,04 abc	0,13 bc	0,45 ab	0,58 a
MP/S	Soja	1,01 bc	0,13 b	0,43 b	0,57 a
MP/P	Piatã	1,07 ab	0,10 bc	0,45 ab	0,55 a
MP/P/P	Piatã	1,04 abc	0,12 bc	0,46 ab	0,59 a
MP/P/S	Soja	0,97 c	0,12 bc	0,48 ab	0,60 a
S/MP/P/P	Soja	1,07 bc	0,10 c	0,49 a	0,59 a
CE		0,81 d	0,26 a	0,32 c	0,58 a
C.V. (%)		5,10	15,77	5,39	4,10
Probab. de F		0,0007	<0,0001	<0,0001	0,5008
0,20 – 0,40 m					
M	Milho	1,17 a	0,11 b	0,44 a	0,56 bc
MP	Milho+Piatã	1,09 a	0,13 b	0,45 a	0,59 bc
S	Soja	1,08 a	0,12 b	0,43 a	0,55 c
P	Piatã	1,09 a	0,13 b	0,46 a	0,60 ab
MP/S	Soja	1,08 a	0,12 b	0,44 a	0,57 bc
MP/P	Piatã	1,09 a	0,12 b	0,45 a	0,58 bc
MP/P/P	Piatã	1,11 a	0,12 b	0,46 a	0,58 bc
MP/P/S	Soja	1,10 a	0,12 b	0,47 a	0,60 ab
S/MP/P/P	Soja	1,10 a	0,11 b	0,45 a	0,57 bc
CE		0,92 b	0,23 a	0,41 a	0,64 a
C.V. (%)		6,45	12,79	5,89	4,45
Probab. de F		0,0008	<0,0001	0,1282	0,0245

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) (p≤0,05).

¹M- Milho solteiro em sucessão anual; MP – consórcio Milho+Piatã em sucessão anual; S - Soja em sucessão anual; P - Pastagem de Piatã em cultivo solteiro; MP/S - Milho+Piatã e Soja em rotação anual; MP/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem de Piatã em rotação anual; MP/P/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem por 2 anos; MP/P/S - Sequência Milho+Piatã, pastagem de Piatã e Soja em rotação; S/MP/P/P - Sequência Soja, Milho+Piatã, e pastagem de Piatã por 2 anos em rotação; CE - Cerrado nativo.

²Anova: C.V. (%) - Coeficiente de variação; Probab. de F - probabilidade dos valores de F.

Para as áreas cultivadas, na camada 0,0-0,10 m, verifica-se maior densidade no tratamento com S em monocultivo, seguido de M em monocultivo e da sucessão S/MP/P/P, os demais possuem densidades intermediárias entre estes e MP/S, com menor densidade. Na profundidade 0,10-0,20 m, as densidades do solo nas áreas cultivadas, de maneira geral, são menores do que na camada superficial. Os tratamentos M e MP/P possuem densidade superior à MP/P/S. Em 0,20-0,40 m, as densidades variaram entre 1,08 e 1,17 Mg m⁻³ nas áreas cultivadas, as quais não diferem entre si.

Os menores valores de densidade no solo sob CE podem ser atribuídos à maior quantidade de matéria orgânica. A MOS na forma de serapilheira e raízes em deterioração contribui para o aumento do espaço total de poros (GERAEI et al., 2016). Além disso, a matéria orgânica humificada possui importante papel na redução da densidade, pois tem como características elevada porosidade total e baixo peso específico (CALONEGO et al., 2011b). A diversidade de plantas em áreas com vegetação natural geralmente é bastante alta, por conseguinte há alta diversidade de organismos no solo, o que também contribui para o desenvolvimento dos poros e redução da densidade (ROSSETTI; CENTURION, 2018).

As menores densidades nas primeiras camadas do solo, em geral, nas áreas cultivadas também podem ser relacionadas com a maior quantidade de COT em comparação com a profundidade 0,20-0,40 m (Figura 2B) (LOSS et al., 2011).

Em relação à Macro, constata-se que esta é superior nos tratamentos P, MP/S e S/MP/P/P em relação ao tratamento S, na camada 0,0-0,10 m. Na profundidade 0,10-0,20 m, MP/S difere de S/MP/P/P, pois este possui menor volume de Macro, sendo que os demais sistemas de produção não diferem destes. Em 0,20-0,40 m, as áreas cultivadas são estatisticamente semelhantes entre si, com Macro variando de 0,11 a 0,13 m³ m⁻³ e diferem do CE, já que este apresenta Macro de 0,23 m³ m⁻³ (Tabela 9).

No tratamento S, em 0,0-0,10 m, a Macro está abaixo de 0,10 m³ m⁻³ considerada como o mínimo necessário de macroporos para que haja desenvolvimento satisfatório das raízes no solo (GRABLE; SIEMER, 1968; REICHERT et al., 2007). Os macroporos são responsáveis pela aeração do solo e pelas trocas gasosas, logo esse resultado indica que pode ocorrer limitação na aeração do solo nesse tratamento (ROSSETTI; CENTURION, 2018).

A Micro, na camada superficial, é estatisticamente semelhante para as áreas cultivadas, variando de 0,45 a 0,48 m³ m⁻³. Na camada subsuperficial, somente há

diferença significativa entre as áreas cultivadas com S/MP/P/P e MP/S, sendo essas com maior e menor micro, respectivamente. Na camada 0,20-0,40 m não há diferença estatística, sendo que a micro variou de 0,43 a 0,47 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ nas áreas cultivadas, e foi de 0,41 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ no CE (Tabela 9).

Os resultados de Micro podem estar relacionados com os teores do COam, uma vez que apresentam comportamento semelhantes no perfil, o que demonstra o efeito da MO humificada nas propriedades físicas do solo, pois o CE e o tratamento MP/S possuem maior teor de COam e menor Micro em relação a S/MP/P/P na camada subsuperficial, profundidade em que as diferenças entre os sistemas de produção foram significativas para essas variáveis (Figura 2D e Tabela 9).

De acordo com Bonini et al. (2015) e Nicodemo et al. (2018) a Macro é afetada diretamente pela degradação ou melhoria da estrutura do solo, enquanto a Micro está mais relacionada a textura do solo, mas estas variáveis são afetadas pelo manejo, principalmente pelo fator compactação do solo.

O impacto da conversão de áreas nativas à agricultura sobre as propriedades físicas do solo pode ser verificado comparando os resultados da área de referência com os das áreas cultivadas pela Tabela 9. De forma geral, no SSD a densidade aumenta em relação ao CE (WENDLING et al., 2012), sendo comum o aumento de poros de menor diâmetro em função do rearranjo das partículas sólidas em solo sem revolvimento (MOREIRA et al., 2006; CALONEGO et al., 2011b) aliado à pressão provocada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas, especialmente quando realizado em solos argilosos e com elevados teores de umidade (SILVEIRA; STONE, 2003; CALONEGO et al., 2011b).

Para a porosidade total (PT), que é uma resultante da quantidade de Macro e Micro, na camada superficial do solo verifica-se maior quantidade de poros no CE e nos tratamentos MP, MP/S e S/MP/P/P, e menores em S. Os demais sistemas não diferem destes. Na camada 0,10-0,20 m não houve efeito significativo para esta variável ($p=5008$), sendo que a PT variou entre 0,55 a 0,60 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Em 0,20-0,40 m, maior PT ocorre no CE sem diferir de P e MP/P/S e há menor PT em S, os outros tratamentos não diferem desses (Tabela 9).

4.3.3 Curva característica de retenção de água no solo e índice S

Na figura 3 foram plotadas todas as curvas de retenção de água no solo, na qual é possível observar principalmente as diferenças dos conteúdos de água no solo nos pontos de maior potencial matricial (potenciais menos negativos). O formato da curva é influenciado pelo diâmetro e distribuição dos poros no solo (DEXTER; RICHARD, 2009), que são resultantes da ação dos atributos do solo relacionados ao sistema de produção e manejo adotados (CARDUCCI et al., 2015).

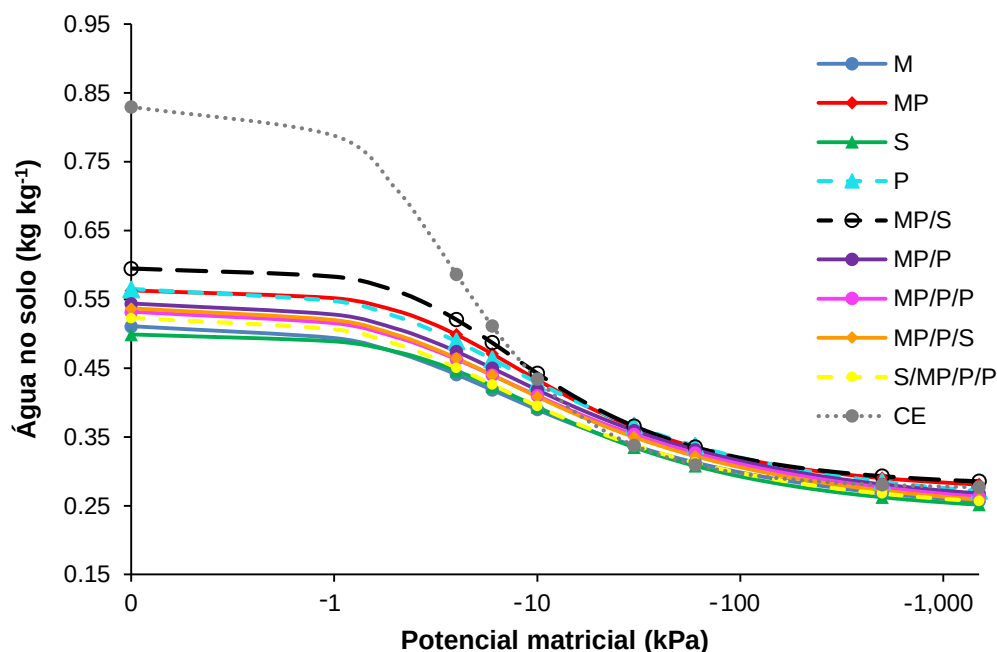
A curva referente ao Cerrado nativo é nitidamente diferente em seu formato em relação às curvas das áreas cultivadas, que embora possuam diferenças no conteúdo de água no solo apresentam formatos semelhantes (Figura 3). Curvas menos achatadas, como a da área CE, indicam maior volume de água disponível (CALONEGO, 2007; SEREIA, 2017).

Pode-se observar que os tratamentos com monocultivo (S e M) proporcionaram menor conteúdo de água no solo, principalmente com o solo saturado ($\Psi=0$) até o potencial matricial de cerca de -1 kPa. Em contraste, o sistema MP/S seguido do consórcio MP e de P, retiveram maior conteúdo de água do $\Psi=0$ até -6 kPa, faixa de tensão em que a água está retida nos macroporos (KLEIN; LIBARDI, 2002), os demais sistemas foram intermediários entre estes e os monocultivos.

No tratamento S observou-se menor Macro e PT (Tabela 9), sendo que a presença de poros de maior diâmetro favorece o aumento no conteúdo de água em potenciais matriciais mais altos, indicando justamente maior volume de poros totais e de macroporos no solo (REICHARDT; TIMM, 2004; SEREIA, 2017). Em M o resultado pode ser atribuído à interação de densidade e macro, embora não sejam tão contrastantes com os outros tratamentos quanto em S (Tabela 9).

Verifica-se que nas áreas cultivadas há maior retenção de água nos menores potenciais matriciais, ou seja, nos potenciais mais negativos, o que está de acordo com o volume de microporos. Nas áreas cultivadas a microporosidade representa 78% da PT nos tratamentos MP/S e S/MP/P/P, 83% para S e 81% nos demais sistemas de produção, enquanto que no CE essa porcentagem é de 52% do volume da PT (Tabela 9).

Figura 3 – Curvas características de retenção de água no solo para nove sistemas de produção envolvendo milho (M), soja (S), piatã (P) e consócio milho+piatã (MP) em monocultivo ou em sucessão anual, e uma área de cerrado nativo (CE), na camada 0,0-0,10 m



De acordo com Reeve e Carter (1991), o aumento na retenção de água nos menores potenciais, comumente ocorre em função da maior microporosidade, o que acarreta em aumento do volume de água capilar. Os macroporos ficam preenchidos com água gravitacional nos maiores potenciais matriciais, aqueles menos negativos, por isso solos compactados apresentam menor retenção de água nas baixas tensões (0 a -10 kPa), como resultado da redução de poros totais, principalmente da macroporosidade do solo.

Reichardt e Timm (2004) explicam que conforme há redução do potencial matricial ocorre um esvaziamento de poros progressivamente menores, de forma que nos potenciais mais negativos, apenas poros muito pequenos conseguem reter água.

Nos potenciais de -6 a -1500 kPa a água se encontra retida nos microporos (KLEIN; LIBARDI, 2002), isso justifica a maior retenção de água nos sistemas de produção nessa faixa de tensão, pois possuem maior volume de microporos em comparação com a área de referência. Entretanto a água retida no potencial matricial de -1500 kPa, que é o chamado ponto de murcha permanente, compreende a água que não está disponível as plantas. Segundo Brady e Weil (1999) e Cavalieri et al. (2006), após o solo ser submetido à tensão de -1500 kPa, a água restante apresenta-se retida por

adsorção, isto é, com alta energia, ao redor dos coloides do solo. Assim, quanto maior o adensamento, maior será a quantidade de partículas por unidade de volume, aumentando a superfície de adsorção (BERG et al., 1997).

Neste estudo o conteúdo de água retido no ponto de murcha permanente, variou de 0,25 a 0,28 kg kg⁻¹ nas áreas cultivadas, sendo 0,27 kg kg⁻¹ para o CE, portanto as diferenças entre as áreas para este ponto são pequenas, o que pode ser reflexo das características do solo, como sua textura.

De acordo com Gomes et al. (2004), a retenção de água nos horizontes da superfície do solo está positivamente correlacionada com os teores de argila e carbono orgânico do solo.

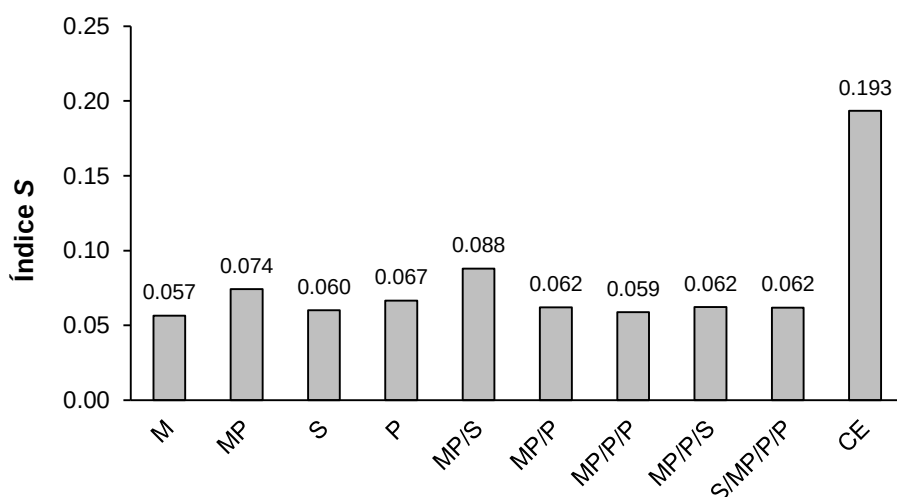
Apesar disso, não foi possível neste estudo, obter por observação, uma relação direta entre os teores C da análise de COT e das frações químicas da MOS com a retenção de água no solo, com exceção do tratamento S em monocultivo e do CE, que são as áreas mais contrastantes deste estudo. Talvez isso seja devido aos valores dessas variáveis serem próximos, embora estatisticamente diferentes, pois o C nas substâncias húmicas variou de 21 g kg⁻¹, no tratamento S, a 25 g kg⁻¹ nos tratamentos MP/S, MP/P e MP/P/P, já nos tratamentos MP e P esses teores foram de 24 e 22 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 7). Por isso, através desses dados explica-se em parte os resultados encontrados nas curvas de retenção de água no solo, outra parte da justificativa se encontra associada aos dados de densidade e porosidade (Tabela 9).

De forma geral, observa-se que mesmo as curvas do solo cultivado estando distante do apresentado na curva da área de referência, apresentam boas características estruturais, o que pode ser verificado através do índice S (Figura 4). Este índice representa a declividade da curva característica de retenção da água no solo em seu ponto de inflexão e reflete a qualidade estrutural do solo. O índice S foi proposto por Dexter (2004) com base no fato de que solos com boa qualidade estrutural apresentam curva de retenção de água no solo com maior coeficiente angular, isto é, com maior ângulo formado pela tangente que passa pelo ponto de inflexão da curva.

Andrade e Stone (2009) avaliaram vários solos do cerrado brasileiro visando adequar o índice S para diagnóstico da qualidade física desses solos. Os autores concluíram que o valor de S=0,045 pode ser utilizado como limite apropriado para a divisão entre solos de boa qualidade estrutural e solos com tendência a se tornar

degradados, e que valores de $S \leq 0,025$ são indicativos de solos fisicamente degradados.

Figura 4 – Índice S para nove sistemas de produção envolvendo milho (M), soja (S), piatã (P) e consócio milho+piatã (MP) em monocultivo ou em sucessão anual, e uma área de cerrado nativo (CE), na camada 0,0-0,10 m



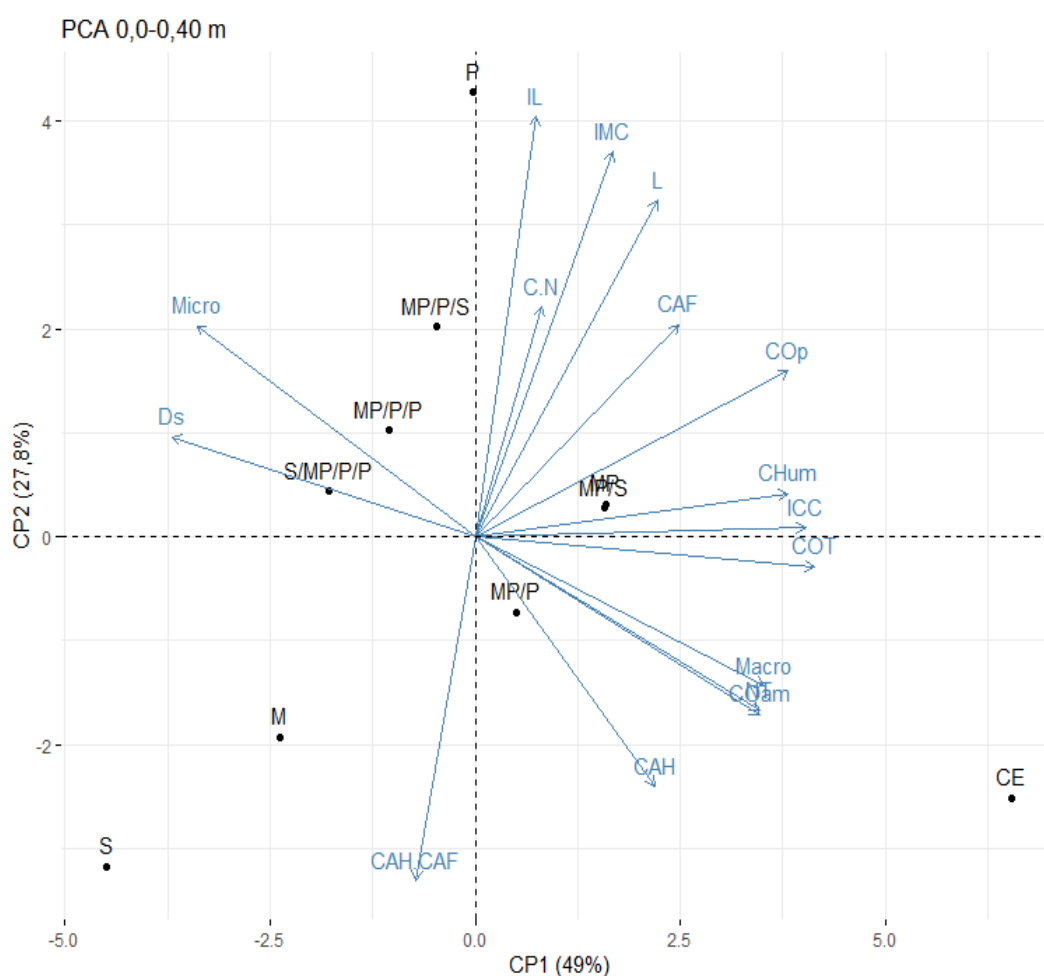
O índice S na área CE é superior às áreas cultivadas, refletindo os resultados de densidade, macro e microporosidade observados na tabela 9. O sistema MP/S seguido do consócio MP e de P apresentam maior índice S.

No entanto, para todos os sistemas de produção o índice S foi superior ao limite estabelecido por Andrade e Stone (2009), evidenciando uma boa qualidade estrutural da área experimental em questão. O que pode estar relacionado com o alto conteúdo de COT, já que a matéria orgânica concorre para maior retenção de água no solo e para menor densidade. Isto também pode explicar o índice S satisfatório mesmo no tratamento S em monocultivo, que apresentou menor macroporosidade ($0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Tabela 9).

4.4 Análise de componentes principais

De acordo com a análise de componentes principais (PCA) (Figura 5), a primeira componente principal (CP1 = 49%) e a segunda componente principal (CP2 = 27,8%) representaram 76,8% da variação total.

Figura 5 – Análise de componentes principais (PCA) 0,0- 0,40 m dos atributos do solo em diferentes sistemas de produção: M- Milho solteiro em sucessão anual; MP - consórcio Milho+Piatã em sucessão anual; S - Soja em sucessão anual; P - Pastagem de Piatã em cultivo solteiro; MP/S - Milho+Piatã e Soja em rotação anual; MP/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem de Piatã em rotação anual; MP/P/P - Sequência de Milho+Piatã e pastagem por 2 anos; MP/P/S - Sequência Milho+Piatã, pastagem de Piatã e Soja em rotação; S/MP/P/P - Sequência Soja, Milho+Piatã, e pastagem de Piatã por 2 anos em rotação; CE - Cerrado nativo. Atributos: NT - nitrogênio total, COT - carbono orgânico total, COp - carbono orgânico particulado, COam - carbono orgânico ligado a minerais, C.N - relação C/N, ICC – índice de compartimento de carbono, L - labilidade, IL - índice de labilidade, IMC - índice de manejo de carbono, CHum – C humina, CAH – C ácidos húmicos, CAF – C ácidos fúlvicos, AH.AF - relação C_{AH}/C_{AF} , Ds - densidade, Macro - macroporosidade, Micro - microporosidade, PT - porosidade total e componentes principais, projeções CP1 e CP2



Na CP1, houve uma separação entre os sistemas de produção, atribuindo valores positivos para MP, MP/S, MP/P e CE. Os outros sistemas de produção (S, M, MP/P/P, MP/P/S e S/MP/P/P) apresentaram na CP1 valores negativos. O tratamento P é intermediário, com valor próximo à zero para a CP1. Na CP2 MP, MP/S, P, MP/P/P,

MP/P/S e S/MP/P/P apresentaram escores positivos e S, M, MP/P e CE tiveram escores negativos (Figura 5).

A CP1 correlacionou-se positivamente com a maioria das variáveis, exceto Densidade (Ds), microporosidade (Micro) e relação C_{AH}/C_{AF} (AH.AF). Quatro indicadores (COT, COp, CHum e ICC) apresentaram altos escores (autovetores maiores ou iguais a 3,75) na CP1. A CP2 também se correlacionou positivamente com a maior parte das variáveis, com maiores escores para IMC e IL, e correlacionou-se negativamente com seis indicadores (NT, COT, COam, CAH e AH.AF) (Figura 5).

Dessa forma, pela PCA é possível perceber que os sistemas de produção formaram quatro grupos, que se distinguem em função da similaridade das variáveis estudadas. No primeiro grupo encontram-se os sistemas MP/P/P, MP/P/S e S/MP/P/P e no segundo os sistemas MP e MP/S, já o P apresenta-se intermediário entre estes grupos. O terceiro é representado pelos monocultivos de S e M e o quarto pelo sistema MP/P e pelo CE.

A separação dos grupos pela PCA indica que entre os sistemas de produção estudados, o sistema MP/P apresenta maior proximidade da área de referência pelas associações com COT, Macro, COam, NT e CAH. Além do mais, os sistemas que envolvem o cultivo de Piatã se diferenciam dos monocultivos S e M.

Quando os ecossistemas nativos são alterados devido às atividades antrópicas, o equilíbrio dinâmico ali existente é rompido e, geralmente, as entradas de C e N são menores do que as saídas, o que leva à redução da quantidade e modificação da qualidade da MOS (PEREIRA, 2018). Entretanto, o uso de sistemas com inclusão de Piatã, propicia diversificação na composição vegetal e nos resíduos culturais em relação aos monocultivos de S e M, e embora a ação antrópica altere atributos no solo é possível que sistemas com alta produção de fitomassa aérea e radicular contribuam para a melhoria da qualidade do solo, se aproximando da condição original, considerada como ideal, a referência CE.

Assim, os efeitos desses sistemas de produção em relação aos atributos do solo constituem uma resposta importante à qualidade dos ecossistemas agrícolas aos distúrbios antropogênicos (PEREIRA, 2018).

Faz-se importante ressaltar a influência da textura do solo sobre as variáveis estudadas nesta pesquisa. Solos com alto teor de argila possuem uma maior resiliência proporcionada pela textura (Tabela 1, Figura 2D, Tabela 7, Tabela 9 e Figura 3), o que fica evidente devido à forte interação da fração orgânica com a fração

mineral, especialmente em solos com mineralogia oxídica, e o elevado índice de estabilidade de agregados mesmo em solo com manejo degradante, como os conduzidos com monoculturas de culturas anuais (Tabela 8). Por isso, esses resultados devem ser analisados sempre relacionando-os com as condições e características da área experimental em questão.

5 CONCLUSÕES

Os sistemas de produção influenciaram a qualidade da matéria orgânica e os atributos físicos do solo, de tal forma que para as condições de Cerrado de Minas Gerais, sistemas de produção sob semeadura direta que integram na sucessão de culturas a *Urochloa brizantha* cv. Piatã, contribuem para a melhoria na qualidade do solo.

A *U. brizantha* cv. Piatã proporciona incremento de carbono lábil em profundidade, o que promove maior aporte de matéria orgânica e melhor estruturação do solo.

A área com S em monocultivo apresenta, em geral, piores índices de qualidade do solo em relação aos demais sistemas.

Considerando as variáveis analisadas destaca-se os sistemas MP/P, MP/S e MP, como os que apresentam resultados promissores em termos de física do solo e matéria orgânica nas condições de solo muito argiloso do Cerrado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C; ERNANI, P.R.; MAFRA, A.L.; FONTANA, E.C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.5, p.799-806, 2003.
- ALVARENGA, R.C.; CABEZAS, W.A.L.; CRUZ, J.C.; SANTANA, D.P. Plantas de cobertura de solo para sistema de plantio direto. **Informe Agropecuário**, v.22, n.208, p. 25-36, 2001.
- ALVES, B.J.R.; et al. Dinâmica do carbono em solos sob pastagem. In. SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p. 561-569.
- ALVES, E.R. Atributos físicos e produtividade de cana planta com calagem e preparo profundo canteirizado em um Latossolo. 2020. 87 p. **(Tese Doutorado)** – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Botucatu
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p.382–388, 2009.
- ANGERS, D.A.; MEHUYS, G.R. Effects of cropping on carbohydrate content and water stable aggregation of a clay soil. **Canadian Journal of Soil Science**, 69:373-380, 1989.
- ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho Acriférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 677-687, 2009.
- ASSUNÇÃO, S.A.; PEREIRA, M.G.; ROSSET, J.S.; BERBARA, R.L.L.; GARCIA, A.C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Science of the Total Environment**, v.658, p.901–911, 2019.
- BALESDENT, J., WAGNER, G.H., MARIOTTI, A. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance, **Soil Science Society of American Journal**, v.52, p.118-124, 1988.
- BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.28, p.1261-1263, 1996.
- BASTOS, R.S.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ, V.H.; CORRÊA, M.M.; COSTA, L.M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p. 21-31, 2005.

BATISTA, K.; DUARTE, A.P.; CECCON, G.; DE MARIA, I.C.; CANTARELLA, H. Acúmulo de matéria seca e de nutrientes em forrageiras consorciadas com milho safrinha em função da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1154-1160, 2011.

BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C. N.; SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society American Journal**, v.65, p.1473–1478, 2001.

BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; SAAB, S. da C.; MILORI, D. M. B. P.; BAGNATO, V. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. **Geoderma**, v.105, p.81-92, 2002.

BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, v.86, p.237-245, 2006.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S. C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um cambissolo húmico em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.537-544, 2003.

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**. Comunicado Técnico 16, EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 7 p., 2003.

BENITES, V.M.; MACHADO, P.L.O. de A.; MADARI, B.E.; FONTANA, A. Fracionamento químico da matéria orgânica. In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (Ed.) Serviço Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. 3º ed., Rio de Janeiro, 2017. 575 p.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, 301 C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p. 681-91, 2010.

BERG, M. van der; KLAMT, E.; van REEUWIJK; SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v.78, p.161-180, 1997.

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.46, p.1459-1466, 1995.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: **America Society of Agronomy**, 1986. p. 363-375.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R.; STAHLMAN, P.W. Soil response to longterm cropping systems on an Argiustoll in the central Great Plains. **Soil Science Society of American Journal**, v.74, p.602-611, 2010.

BORGES, E. N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G. F.; BORGES, E. V. S. Alterações físicas introduzidas pela compactação em material de um Latossolo vermelho-Escuro textura média. Pesquisa Agropecuária brasileira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.9, p. 763-767, 1999.

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

BOGIANI, J.C.; FERREIRA, A.C. de B. Plantas de cobertura no sistema soja-milho-algodão no Cerrado. **Informações Agrônômicas**, n.160, p.1-14, 2017.

BOLLIGER, A.; MAGID, J.; AMADO, T.J.C.; SKÓRANETO, F.; SANTOS RIBEIRO, M.F.; CALEGARI, A.; RALISCH, R.; NEERGAARD, A. Taking Stock of the Brazilian “Zero Till Revolution”: A Review of Landmark Research and Farmers’ Practice. **Advances in Agronomy**, v.91, p. 47-110, 2006.

BONINI, C.S.B.; ALVES, M.C.; MONTANARI, R. Recuperação da estrutura de um Latossolo vermelho degradado utilizando lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, n.1, p.34-42, 2015.

BORGES, W.L.B.; FREITAS, R.S.; MATEUS, G.P.; SÁ, M.E.; ALVES, M.C. Supressão de plantas daninhas utilizando plantas de cobertura do solo. **Planta daninha**, v.32, n.4, p.755-763, 2014.

BORTOLETI JUNIOR, A.; GONÇALVES, L. G.; RIBEIRO, M. A. R.; AFONSO, R. O.; SANTOS, R. F.; SOUZA, C. S. S. A importância do plantio direto e do plantio convencional e as suas relações com o manejo e conservação do solo. **Revista Conexão Eletrônica**, v.12, n. 1, p. 1-11, 2015.

BOTREL, M. de A.; NOVAIS, L.P.; ALVIM, M.J. **Características forrageiras de algumas gramíneas tropicais**. Juiz de Fora, MG: EMBRAPA-CNPGL, 35 p., 1998. (EMBRAPA-CNPGL. Documentos, 66).

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 12 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 881p.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física no solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. VII, p. 221-278, 2011.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v.124, p. 3-22, 2005.

BRÜGGEMANN, G. Estado da arte e divulgação do plantio direto no Brasil. **Revista Plantio Direto**, v.20, n.122, p.16-23, 2011.

BUYANOVSKY, G. A.; ASLAM, M.; WAGNER, G. H. Carbon turnover in soil physical fractions. **Soil Science Society of American Journal**, v.58, p.1167-1173, 1994.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.167-177, 2001.

CALONEGO, J.C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C.A.C. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2183-2190, 2011a.

CALONEGO, J.C.; SANTOS, C.H. dos; TIRITAN, C.S.; CUNHA JÚNIOR, J.R. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, v.25, n.2, p. 128-135, 2011b.

CALONEGO, J.C.; GIL, F.C; ROCCO, V.F.; SANTOS, E.A. dos. Persistência e liberação de nutrientes da palha de milho, braquiária e labe-labe. **Bioscience Journal**, v.28, n.5, p.770-781, 2012.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotação de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1399-1407, 2008.

CALONEGO, J.C. **Uso de plantas de cobertura na recuperação de solo compactado**. / Juliano Carlos Calonego. 2007. 140 f. Tese de doutorado. Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Botucatu. 2007.

CAMPBELL, C.A; ZENTNER, R.P.; SELLERS, F.; BIEDERBECK, V.O.; MCCONKEY, B.G.; BLOMERT, B. JEFFERSON, P.G. Quantifying short-term effects of crop rotations on soil organic carbon in southwestern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, v.80, p. 193-202, 2000.

CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; BRASIL, E. L.; IWATA, B. F. Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.1, p. 304-312, 2013.

CAMARGO, D.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: USP/ESALQ, 1997. 132p.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of American Journal**, v.56, n.3, p.777-783, 1992.

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; RESENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um

Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.5, p. 935-944, 2003.

CANELLAS, L. P.; MENDONÇA, E. S.; DOBBSS, L.; BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Reações da matéria orgânica. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 45-61.

CANTALICE, J.R.B.; SILVEIRA, F.P.M.; SINGH, V.P.; SILVA, Y.J.A.B.; CAVALCANTE, D.M.; GOMES, C. Interrill erosion and roughness parameters of vegetation in rangelands. **Catena**, v.148, p.11–116, 2017.

CARDUCCI, C.E; OLIVEIRA, G.C; OLIVEIRA, L.M.; BARBOSA, S.M.; SILVA, E.A. Retenção de água no solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista de Ciências Agrárias**, v.58, n.3, p.284-291, 2015.

CARTER, M. R. Organic matter and sustainability. In: REES, R. M.; BALL, B. C.; CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A. (Ed.). **Sustainable management of soil organic matter**. New York: CABI Publishing, 2001. p. 9-22.

CARVALHO, A.M.; COSER, T.R., REIN, T.A., DANTAS, R.A., SILVA, R.R., SOUZA, K.W. Manejo de plantas de cobertura na floração e na maturação fisiológica e seu efeito na produtividade do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.7, p.551-561, 2015.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo de amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.527-538, 1998.

CASTRO, G. S. A. Atributos do solo decorrentes dos sistemas de produção e da aplicação superficial de corretivos, 2012. 155p. (**Tese Doutorado**) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CASTRO, O. M.; CAMARGO, O. A.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F., CANTARELLA, H. Caracterização química e física de dois Latossolos em plantio direto e convencional. Campinas: **Instituto Agrônômico**, 1987. 23p. (Boletim científico, 11).

CASTRO, O.M. de. Compactação do solo em plantio direto. In: FANCELLI, A.L. **Plantio direto no estado de São Paulo**. Piracicaba: FEALQ/ESALQ, 1989. p. 129-139.

CASTOLDI, G. Nitrogênio no sistema solo-planta após a dessecação de Brachiarias, 2011. 83 p. (**Dissertação de Mestrado**) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CAVALCANTE, D.M.; CASTRO, M.F. de; CHAVES, M.T.L.; SILVA, I.R. da; OLIVEIRA, T.S. de. Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N

distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil. **Ecological Indicators**, v.107, 105668, 2019.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S., GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.137-147, 2006.

CECCON, G.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C.A.C. Modalidades e métodos de implantação do consórcio milho-braquiária. In: CECCON, G. (ed.). **Consórcio Milho-Braquiária**. Brasília, DF: Embrapa, 2013, p.27-46.

CECCON, G.; KURIHARA, C.H.; STAUT, L.A. Manejo de *Brachiaria ruziziensis* em consórcio com milho safrinha e rendimento de soja em sucessão. **Revista Plantio Direto**, n.113, p.4-8, 2009.

CECCON, G. Milho safrinha com solo protegido e retorno econômico em Mato Grosso do Sul. **Revista Plantio Direto**, ano 16, n.97, p. 17-20, 2007.

CECCON, G.; STAUT, L. A.; SAGRILO, E.; MACHADO, L. A. Z.; NUNES, D. P.; ALVES, V. B. Legumes and forage species sole or intercropped with corn in soybean corn succession in midwestern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.1, p. 204-212, 2013.

CENTURION, J.F.; DEMATÊ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, p. 263-266, 1985.

CFSEMG – COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a Aproximação** / Antonio Carlos Ribeiro, Paulo Tácito Gontijo Guimarães, Vitor Hugo Alvarez V. (Eds.) Viçosa, MG: 1999. 359p.

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em 9 sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.1, p. 37-43, 2012.

CHRISTENSEN, B.T. Structure and organic matter storage in agricultural soils. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: 1996. p. 97-165.

CHAN, K.Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management. **Soil Use Manage**, v.17, p. 217-221, 2001.

COLMAN, B.A. **Qualidade físico-hídrica de um Latossolo sob manejos e consórcios de milho e forrageiras**. 2017. 83p. Tese (Doutorado em Agronomia, Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, 2017.

COLMAN, B. A. **Qualidade microbiológica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária em três ambientes de Mato Grosso do Sul**. 2014. 78p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Produção Vegetal) – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, 2014.

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**, v.29, p.777-788, 2005.

CONCEIÇÃO, P.C.; BAYER, C.; DIECKON, J.; SANTOS, D.C dos. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, v.44, n.5, p.794-800, 2014.

CONCENÇO, G.; CECCON, G.; FONSECA, I.C.; LEITE, L.F.; SCHWERZ, F.; CORREIA, I.V.T. Weeds infestation in corn intercropped with forage at diferente planting densities. **Planta Daninha**, v.30, n.4, p.721-728, 2012.

CONCENÇO, G.; CECCON, G.; MARQUES, R.F.; MARSCHALL, I.R.; ALVES, M.E. dos S.; PALHARINI, W.G.; GALON, L. Cultivos de outono-inverno na supressão de plantas daninhas em soja. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.10, n.2, p.205-210, 2015.

CONCENÇO, G.; SILVA, A.F. Manejo de plantas daninhas no consórcio Milho-Braquiária. In: CECCON, G. (ed.). **Consórcio Milho-Braquiária**. Brasília, DF: Embrapa, 2013, p. 71-87.

COSTA, H. J. U.; JANUSCKIEWICZ, E. R.; OLIVEIRA, D. C.; MELO, E. S.; RUGGIERI, A. C. Massa de forragem e características morfológicas do milho e da *Brachiaria brizantha* cv. piatã cultivados em sistema de consórcio. **Ars Veterinária**, v. 28, n. 2, p. 134-143, 2012.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do Solo e Acúmulo de Carbono na Integração Lavoura-Pecuária em Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 852-863, 2015.

CORRÊA, J. C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.309, 2002.

CRUSCIOL, C.A.C.; CALONEGO, J.C.; BORGHI, E. Atributos físicos e físicos-hídricos do solo com o cultivo de milho solteiro ou consorciado com braquiária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado: **Resumos...** Gramado: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

CRUZ, J.C.; ALVARENGA, R.C.; NOVOTNY, E. H.; PEREIRA FILHO, I. A.; SANTANA, D. P.; PEREIRA, F.T. F.; HERNANI, L.C. **Cultivo do milho - Sistema Plantio Direto**. Brasília: Embrapa, 2004 (Comunicado Técnico).

CUBILLA, M.; REINERT, D.J.; AITA, C.; REICHERT, J.M. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v.71, p.29-32, 2002.

CUNHA, T.J.F.; CANELLAS, L.P.; SANTOS, G. de A.; RIBEIRO, L.P. Fracionamento da matéria orgânica humificada de solos brasileiros. In: CANELLAS, L.P.; SANTOS, G.A. **Humosfera: Tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas**. Campos dos Goytacazes, 2005. p. 54-80. Disponível: UENF: <http://www.uenf.br/Uenf/Downloads/LSOL_2727_1154716116.pdf>. Acesso em: 01 de maio de 2020.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P. M.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica a características dos ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Revista Acta Amazônica**, v. 37, n.1, p. 91-98, 2007.

DEBIASI, H., LEVIEN, R., TREIN, C.R., CONTE, O., KAMIMURA, K.M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.603-612, 2010.

DE BONA, F.D.; BAYER, C.; DIECKOW, J. et al. Soil quality assessed by carbon management index in a subtropical Acrisol subjected to tillage systems and irrigation. **Australian Journal of Soil Research**, 46: 469-475, 2008.

DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil & Tillage Research**, v.20, p.87-100, 1991.

DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. **Soil & Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 113-118, 2009.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.20, p.201-214, 2004.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v.1, p.55-94.

DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: parte II - aplicações**. 1.ed. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 2, cap. 11, p. 1-68.

DIECKOW, J.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. **Sistemas de preparo do solo e características espectroscópicas da matéria orgânica em ambientes tropicais e subtropicais brasileiros**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2005 (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).

DOU, F.; WRIGHT, A. L.; HONS, F. M. Sensitivity of labile soil organic carbon to tillage in wheat-based cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p.1445-1453, 2008.

DOURADO NETO, D.; VAN LIER, Q. J.; BOTREL, T. A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Van Genuchten. **Engenharia Rural**, v.1, p. 92-102, 1990.

EBELING, A. G.; ESPINDULA JUNIOR, A.; VALLADARES, G. S.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Propriedades químicas como indicadores ambientais em organossolos do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Universidade Rural: Série Ciências da Vida**, v.24, n.1, p.1-6, 2004.

EDWARDS, A.P.; BREMNER, J.M. Microaggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.18, p.64-73, 1967.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FARIAS, P. K. P.; MARTINS, C. M.; SOUZA FILHO, L. F. S.; SOUZA, L. S.; LIMA, R. N. S. Índice de manejo do carbono de solos sob vegetação nativa e das áreas manejadas em diferentes tempos sob semeadura direta. **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO: O solo e suas múltiplas funções**. Natal/RN, p.1-4, 2015.

FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio Direto na palha - **Evolução do plantio direto no Brasil**, 2018. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso em: 11/03/2020.

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

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

FERREIRA, A.C.de B.; BORIN, A.L.D.C.; LAMAS, F.M.; ASMUS, G.L.; MIRANDA, J.E.; BOGIANI, J.C.; SUASSUNA, N.D. **Plantas que minimizam problemas do sistema de produção de algodoeiro no cerrado**. Campina Grande: Embrapa algodão, 2012. 4p. (Comunicado Técnico, 371).

FERREIRA, C. dos R.; SILVA NETO, E.C. da; PEREIRA, M.G.; GUEDES, J. do N.; ROSSET, J.S.; ANJOS, L.H.C. dos. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil & Tillage Research**, v.198, p.104533, 2020.

FERRERAS, L.A.; DE BATTISTA J.J.; AUSILIO A.; PECORARI C. Parâmetros físicos del suelo em condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.1, p.161-170, 2001.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, v. 48, p.21-35, 1998.

FRANCHINI, J.C.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; SICHIERI, F.R.; DEBIASI, H.; CONTE, O. Yield of soybean, pasture and wood in integrated crop-livestock-forest system in Northwestern Paraná state, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v.45, p.1006-1013, 2014.

FRANZLUEBBERS, A.J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil & Tillage Research**, v.66, p.95-106, 2002.

FREITAS, P.L.; BLANCANEUX, P.; GAVINELLI, E.; LARRÉ-LARROUY, M.C.; FELLER, C. Nível e natureza do estoque orgânico de Latossolos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p. 157–170, 2000.

FUENTES, M.; GONZALEZ-GAITANO, G.; GARCIA-MINA, J. M. The usefulness of UV-visible and fluorescence spectroscopies to study the chemical nature of humic substances from soil and composts. **Organic Geochemistry**, v.37, p.1949-1959, 2006.

GARCIA, R. A. Rotação de culturas e propriedades físicas e matéria orgânica de um Latossolo. 2010, 146f. **(Tese Doutorado)** – Universidade Estadual Paulista, UNESP, Botucatu.

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**, v.36, n.2, p. 693-704, 2015.

GENUTCHEN, M. T. van; NIELSEN, D. R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annales Geophysicae**, v.3, n.5, p. 615- 628, 1985.

GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-897, 1980.

GERAEI, D.S.; HOJATI, S.; LANDI, A.; CANO, A.F. Total and labile forms of soil organic carbon as affected by land use change in southwestern Iran. **Geoderma Regional**, v.7, p.29-37, 2016.

GHOSH, B.N.; MEENA, V.S.; SINGH, R.J.; ALAM, N.M.; PATRA, S.; BHATTACHARYYA, R.; SHARMA, N.K.; DADHWAL, K.S.; MISHRA, P.K. Effects of fertilization on soil aggregation, carbon distribution and carbon management index of maize-wheat rotation in the north-western Indian Himalayas. **Ecological Indicators**, v.105, p.415-424, 2019.

GIÁCOMO, R. G.; PEREIRA, M. G.; BALIEIRO, F. C. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição das frações húmicas no solo sob diferentes coberturas florestais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.1, p.42-48, 2008.

GILL, K.S.; GAJRI, P.R.; CHOUDHARY, J. Tillage, mulch and irrigation effects on corn (*Zea mays* L.) in relation to evaporative demand. **Soil & Tillage Research**, v.39, p.213-227, 1996.

GMACH, M.-R.; DIAS, B.O.; SILVA, C.A.; NÓBREGA, J.C.A.; LUSTOSA-FILHO, J.; SIQUEIRA-NETO, M. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v.14, e00178, 2018.

GOMES, J.B.V.; CURI, N.; MOTTA, P.E.F.; KER, J.C.; MARQUES, J.J.G.S.M.; SCHULZE, D.G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 137-153, 2004.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, v.32, p. 180-186, 1968.

GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J. & MEYER, J.H. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. **Soil Biology Biochemistry**, v.34, p. 93-102, 2002.

GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A. Métodos químicos e físicos. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008, cap. 13, p. 185-199.

HAKOYAMA, S.; YOSHIDA, K.; NAKAGAWA, J.; MORAES, M.H.; IWAMA, H.; IGUITA, K. & NAKAGAWA, J. Efeitos da semeadura direta e do preparo convencional em algumas propriedades físicas do solo. **Científica**, v.23, p. 17-30, 1995.

HUI, E.Q., HU, X., JIANG, C.B. A study of drag coefficient related with vegetation based on the flume experiment. **Journal of Hydrology**, v.22, p. 329–337, 2010.

HUNGRIA, M., FRANCHINI, J.C., BRANDAO-JUNIOR, O., KASCHUK, G., SOUZA, R.A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v.42, n.3, p.288–296, 2009.

HURISSO, T.T.; JAY, B.; NORTON, J.B.; NORTON, U. Soil profile carbon and nitrogen in prairie, perennial grass–legume mixture and wheat–fallow production in the central High Plains, USA. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v.181, p.179–187, 2013.

INDA JÚNIOR, A.V.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; BOENI, M.; SALTON, J.C.; TONIN, A.T. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais

em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, v. 37, p.1301-1307, 2007.

JANTALIA, C.P.; RESCK, D.V.S.; ALVES, B.R.J.; ZOTARELLI, L.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R.M. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. **Soil and Tillage Research**, v. 95, p.97-109, 2007.

KAHLON, M. S.; CHAWLA, K. Effect of tillage practices on least limiting water range in Northwest India. **International Agrophysics**, v. 31, n. 1, p. 183-194, 2017.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: Black, C.A. et al., **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, part. 1, cap 40, p. 499-510, 1965. Agronomy, 9).

KLEIN, V.A; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.857-867, 2002.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p. 635-662.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. Manejo sustentável dos solos dos cerrados. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, p. 61-104, 2003a.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. Desempenho de culturas anuais sobre palhada de braquiária. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003b. p. 499-522.

KOOL, J. B.; PARKER, J. C.; GENUTCHEN, M. T. van. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models: a review. **Journal of Hydrology**, v.91, p. 255-293, 1987.

LAL, R. Physical management of the soils of the tropics: priorities for the 21st century. **Soil Science**, v.165, n.3, p. 191-207, 2000.

LAL, R. Soils and the Greenhouse effect. In: LAL, R. (Ed.). **Soil Carbon and the greenhouse effect**. Madison: Soil Science Society of America, 2001. p. 1-8. (SSSA Special Publication Number 57).

LANZANOVA, M. E.; ELTZ; F.L.F.; NICOLOSO, R. da S.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J.; ROCHA, M.R. Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1333-1342, 2010.

LECO CORPORATION. **TruSpec CHN/CHNS Carbon/Hydrogen/Nitrogen/Sulfur Determinators**: Instruction Manual. 1. ed. St JOSEPH, 2011. 532p.

LEITE, L.F.C.; MACIEL, G.A.; ARAÚJO, A.S.F. **Agricultura conservacionista no Brasil**. 1ª edição. Brasília DF. Embrapa Informação tecnológica, 598p. 2014.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; LEAO, T. P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 945-951, 2004.

LLORENTE, M., GLASER, B., BELEN TURRION, M. Storage of organic carbon and black carbon in density fractions of calcareous soils under different land uses. **Geoderma**, v.159, p. 31–38, 2010.

LORENZ, K.; LAL, R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. **Advances in Agronomy**, v.88, p.35-66, 2005.

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; GIÁCOMO, S.G.; PERIN, A.; ANJOS, L.H.C. dos. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1269-1276, out. 2011

LOSS, A. **Dinâmica da matéria orgânica, fertilidade e agregação do solo em áreas sob diferentes sistemas de uso no Cerrado Goiano**. (Tese de Doutorado). Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2011. 122p.

LOSS, A., PEREIRA, M.G., BEUTLER, S.J., PERIN, A., ANJOS, L.H.C. Densidade e fertilidade do solo sob sistemas de plantio direto e de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Revista Ciências Agrárias**, v.55, p. 260-268, 2012.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M. Carbono e nitrogênio adicionados e sua relação com o rendimento do milho e estoques destes elementos no solo em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n.1, p. 175-187, 2004.

LUCA, E.F.; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHÊS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.32, p. 789-800, 2008.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 133-146, 2009.

MACHADO, L. A. Z.; ASSIS, P. G. de. Produção de palha e forragem por espécies anuais e perenes em sucessão à soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 4, p. 415-422, 2010.

MACHADO, L.A.Z.; VALLE, C.B. do. Desempenho agrônomo de genótipos de capim-braquiária em sucessão à soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1454-1462, 2011.

MADARI, B.E. **Fracionamento de agregados: Procedimento para uma estimativa compartimentada do sequestro de carbono no solo**. EMBRAPA: Rio de Janeiro, RJ, 2004. (Comunicado Técnico, 22)

MAKINO, P. A. **Desempenho agrônômico e fisiológico de milho em arranjos de plantas, com e sem braquiária, no verão e no outono-inverno**. 2018. 107p. Tese (Doutorado em Agronomia, Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, 2018.

MARCHÃO, R.L., BECQUER, T., BRUNET, D., BALBINO, L.C., VILELA, L., BROSSARD, M. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop–livestock management systems. **Soil and Tillage Research**, v.103, p. 442–450, 2009.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. London, Academic Press, p. 508-536.1995.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: Gabriel A. Santos; Flávio Anastácio de Oliveira Camargo. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo - ecossistemas tropicais e subtropicais**. 1ª ed. Porto Alegre: Genesis, 1999, p.1-8.

MIGUEL, A.C.D.C.S.; PACHECO, L.P.; CARVALHO, I.C. de; SOUZA, A.D. de; FEITOSA, P.B.; PETTER, F.A. Phytomass and nutrient release in soybean cultivation systems under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, n.10, p.1119-1131. 2018.

MILNE, R.M., HAYNES, R.J. Soil organic matter, microbial properties, and aggregate stability under annual and perennial pastures. **Biology and Fertility of Soils**, v.39, 172–178, 2004.

MILORI, D. M. B. P.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLES-PÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, p.57-63, 2006.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P.L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Bragantia**, v.54, n.2, p.393-403, 1995.

MOREIRA, J. A. A.; SOUZA, E. R. de; STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; LANNA, A. C. **Plantas de cobertura de solo e retenção de água de um Latossolo Vermelho Distrófico em sistema de produção orgânico**. Embrapa Arroz e Feijão. 2006. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/927537/plantas-de-cobertura-de-solo-e-retencao-de-agua-de-um-latossolo-vermelho-distrofico-em-sistema-de-producao-organico>>. Acesso em: 30.04.2020.

MORO, E.; CRUSCIOL, A. C.; NASCENTE, A. S.; CANTARELLA, H. Teor de nitrogênio inorgânico no solo em função de plantas de cobertura, fontes de

nitrogênio e inibidor de nitrificação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, n. 4, p. 424-435, 2013.

NASCENTE, A. S. et al. Cover Crop Termination Timing on Rice Crop Production in a No-Till System. **Crop Science**, v.53, n.6, p.2659-2669, 2013.

NICODEMO, M.L.F; BORGES, W.L.B; SOUZA, I.M.D de. Atributos físicos do solo em quatro sistemas de uso da terra em São Carlos, SP. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, n.2, 2018.

NUNES, R. S.; LOPES, A.A.C.; SOUSA, D. M. G.; MENDES, I.C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em latossolo de cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1407-1419, 2011.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, v.76, p. 319-337, 1984.

OADES, J.M. **An introduction to organic matter in minerals soils**. In: DIXON, J.B.; WED, S.B. (eds.). Minerals in soil environments 2 ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989, p.89-160.

ONU - United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Volume II: Demographic Profiles.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L.; CRESTANA, S. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n.04, p. 709-715, 2001.

PEGORARO, R.F.; SILVA, I.R. da; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; FONSECA, S.; DAMBROZ, C.S. Estoques de carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica em argissolo sob eucalipto e pastagem. **Ciência Florestal**, v.21, n.2, p.261-273, 2011.

PEREIRA, A.P.; REZENDE, J.O.; CARVALHO, S.R.L.C.; FERNANDES, J.C. Poder de penetração de raízes de leguminosas e gramíneas em solos coesos dos tabuleiros costeiros. **Revista Bahia Agrícola**, v.6, p.2–8, 2004.

PEREIRA, V. da C. Efluxo de CO₂ e modelagem de carbono no solo sob diferentes sistemas de cultivo, 2018. **Tese** (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 83 p., 2018.

PEREIRA, A.V.; PACIULLO, D.S.C.; GOMIDE, C.A. de M.; LÉDO, F.J. da S. **Catálogo de forrageiras recomendadas pela Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa, 76 p. 1 ed., 2016.

RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 284 p., 2001.

RAIJ, B.V. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008, 233 p.

RAUBER, L.P.; ANDRADE, A.P.; MAFRA, A.L. Soil organic carbon stocks in granulometric fractions under use and management systems with swine and poultry manure. **Brazilian Journal of Agriculture**, v.92, n.2, p. 101-114, 2017.

RAPHAEL, J. P. A. **Matéria orgânica do solo em rotações de culturas sob sistema semeadura direta**, 2014. (Dissertação) – Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Botucatu, SP. 117 p.

RAPHAEL, J. P. A. **Matéria orgânica do solo em rotações de culturas sob sistema semeadura direta**, 2014. (Dissertação) – Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Botucatu, SP. 117 p.

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**, v.31, p.1609-1623, 2007.

R CORE TEAM (2018). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

REEVE, J. M.; CARTER, A. D. Water release characteristics. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C. E. (Eds.). **Soil analysis: physical methods**. New York: M. Dekker, 1991. p.111-160.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Editora Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M., eds. **Tópicos Ciência do Solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.5, p.49-134.

REICHERT, J.M.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; RIQUELME, U.F.B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.3, p.310-309, 2009.

RESCK, D.V.S.; FERREIRA, E.A.B.; FIGUEIREDO, C.C.; ZINN, Y.L. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. rev. e atual. Porto Alegre, RS: Metropole, 2008, 654 p.

RIBEIRO, L.M.; CECCON, G.; MECCHI, I.A.; SANTOS, A.L. F. dos; FACHINELLI, R.; MAKINO, P.A. Produtividade de soja em sucessão a cultivos de outono-inverno. **Revista Agrarian**, v.11, n.40, p.120-131, 2018.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação de solo: Causas e efeitos. **Semina Ciência Agrária**, v. 26, n.3, p. 321-344, 2005.

RIGON, J. P. G. **Sistemas de produção como fatores determinantes da quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo**. Botucatu: UNESP, 2017. 190 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Agronomia (Agricultura) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017.

ROCHA, K. F.; CASSOL, L. C.; PIVA, J. T.; MINATO, E. A.; FAVERSANI, J. C. Caracteres morfológicos e componentes de rendimento de milho sob diferentes sistemas de preparo de solo e plantas de cobertura de inverno. **Synergismus scyentifica**, v. 9, n. 1, p. 1-5, 2014.

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

ROSA, D. M.; NÓBREGA, L. H. P.; LIMA, G. P.; MAULI, M. M. Desempenho da cultura do milho implantada sobre resíduos culturais de leguminosas de verão em sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 4, p. 1287-1296, 2011.

ROSA, D. M.; NOBREGA, L. H. P.; MAULI, M. M.; LIMA, G. P.; PACHECO, F. P. Substâncias húmicas do solo cultivado com plantas de cobertura em rotação com milho e soja. **Revista Ciência Agrônômica**, v.48, n. 2, p. 221-230, 2017.

ROSSETTI, K. D.V.; CENTURION, J.F. Use of S-index as a structural quality indicator for compacted Latossols cultivated with maize. **Revista Caatinga**, v.31, n.2, p.455-465, 2018.

ROSOLEM, C. A.; PIVETTA, L. A. Mechanical and biological approaches to alleviate soil compaction in tropical soils: assessed by root growth and activity (Rb uptake) of soybean and maize grown in rotation with cover crops. **Soil use and Management**, v. 33, p. 141-152, 2016.

ROSSI, C.Q.; PEREIRA, M.G.; GIÁCOMO, S.G.; BETTA, M.; POLIDORO, J.C. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em Latossolo Vermelho sob plantio de soja no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, n.2, p.233-241, 2012.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; FILHO, S. P. V.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Organic Matter Dynamics and Carbon Sequestration Rates for a Tillage Chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n.5, p. 1486-1499, 2001.

SÁ, J.C.M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, R., BRIEDIS, C.; SANTOS, J.B.; HARTMAN, D.C.; BERTOLINI, C.G.; ROSA, J., FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping

systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v.26, p. 531–543, 2013.

SALTON, J.C. Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura pastagem em ambiente tropical. 2005. 158p. (**Tese Doutorado**) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1349-1356, 2011.

SALTON, R; 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**, v.32, p. 11-21, 2008.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Dourados, MS: Embrapa, 2014. (Comunicado técnico 198)

SANTANA, G.S; DICK, D.P.; JACQUES, A.V.A.; CHITARRA, G. da S. Substâncias húmicas e suas interações com Fe e Al em Latossolo subtropical sob diferentes sistemas de manejo de pastagem. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.35, p.361-472, 2011.

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. **Revista Ciência Rural**, v.43, n.5, 2013.

SANTOS, G; CAMARGO, F. 1999. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 69-90.

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

SCHIAVO, J.A.; ROSSET, J.S.; PEREIRA, M.G.; SALTON, J.C. Índice de manejo de carbono e atributos químicos de Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p. 1332-1338, 2011.

SCHULTEN, H.R.; LEINWEBER, P. New insight into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure. **Biology and Fertility of Soils**, v.30, p.399-432, 2000.

SEGNINI, A. Estrutura e estabilidade da matéria orgânica em áreas com potencial de sequestro de carbono no solo. São Carlos, 2007, 131 f. (**Tese Doutorado**) – Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos.

SEREIA, R.C.; LEITE, L.F.; ALVES, V.B.; CECCON, G. Crescimento de *Brachiaria* ssp. e milho safrinha em cultivo consorciado. **Agrarian**, v.5, n.18, p.349-355, 2012.

SEREIA, R. C. **Qualidade do solo em sistemas consorciados de milho, capim-marandu e feijão-guandu e sobressemeadura da aveia para pastejo de cordeiros** / Rodrigo César Sereia. 2017. 147 f. Tese de doutorado. Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Botucatu. 2017.

SILVA, J.E. da; RESCK, D.V.S. Matéria orgânica no solo. In: VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. **Biologia dos solos dos Cerrados**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1997, p.467-524.

SILVA, E.M. da; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A. de; RODRIGUES, L.N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p. 323-330, 2006.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. de S. Matéria Orgânica do Solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.V.H.; BARROS, N.F.; FERREIRA, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Org.). **Fertilidade do Solo**. 1 ed. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 275-374.

SILVA, A.A.; GALON, L.; FERREIRA, F.A.; TIRONI, S.P.; FERREIRA, E.A.; SILVA, A.F.; ASPIAZÚ, I.; AGNESI, E.L. Sistema de Plantio Direto na Palhada e seu impacto na agricultura brasileira. **Revista Ceres**, v.56, p. 496-506, 2009a.

SILVA, P. C. G.; FOLONI, J. S. S.; FABRIS, L. B.; TIRITAN, C. S. Fitomassa e relação C/N em consórcios de sorgo e milho com espécies de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 44, n. 11, p. 1504-1512, 2009b.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a compactação de um Latossolo VermelhoAmarelo. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p.547-554, 2011a.

SILVA. E.F. da; LOURENTE, E.P.R.; MARCHETTI, M.E.; MERCANTE, F.M.; FERREIRA, A.K.T.; FUJII, G.C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1321-1331, 2011b.

SILVA, J. F. da. **Milho safrinha em espaçamento reduzido consorciado com populações de plantas de *Brachiaria ruziziensis***. Dourados, MS: UFGD, 2014. 45f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, 2014.

SILVEIRA P.M.; SILVA, J.H.; LOBO JUNIOR M.; CUNHA P.C.R. Atributos do solo e produtividade do milho e do feijoeiro irrigado sob sistema integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1170-1175, 2011.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p. 240-244, 2003.

SIGNOR, D.; CERRI, C.E.P. Comparação entre metodologias para cálculo do índice de manejo de carbono do solo em São Luís - MA. In: **I REUNIÃO NORDESTINA DE CIÊNCIA DO SOLO**, Areia – PB, 2013.

SIX, J., ELLIOTT, E.T., PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v.32, n.14, p. 2099–2103, 2000.

SIX, J., FELLER, C., DENEFF, K., OGLE, S.M., DE MORAES, J.C., ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. **Agronomie**, v.22, p. 755–775, 2002.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. **Geoderma**, v.74, p.65-105, 1996.

SOUZA, E.D. de; SILVA, F.D. da; PACHECO, L.P.; LAROCA, J. dos S.V.; SOUZA, J.M.A. de; BONETTI, J. de A. Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. In: SOUZA, E.D.; SILVA, F.D.; ASSMANN, T.S.; CARNEIRO, M.A.C.; CARVALHO, P.C.F.; PAULINO, H.B. (Org.). **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil**. 1 ed. Tubarão: Copiart, 2018, v. 1, p. 107-120.

SUZUKI, L.E.A.S.; LIMA, C.L.R. de; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; PILLON, C.N. Estrutura e armazenamento de água em um Argissolo sob pastagem cultivada, floresta nativa e povoamento de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p. 94-106, 2014.

SPERA, S. T; SANTOS, H.P.; TOMM, G.O; FONTANELI, R.S. Avaliações de alguns atributos físicos de solo em sistemas de produção de grãos, envolvendo pastagens sob plantio direto. **Revista Científica Rural**, v.9, n.1, p. 23-31, 2004.

STEFANOSKI, D.; SANTOS, G.G.; MARCHÃO, R.L.; PETTER, F.A.; PACHECO, L.P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia. Agrícola e Ambiental**, v.17, n.12, 2013.

STEVENSON, F.J. **Humus Chemistry: genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York: Wiley, 1994. 496 p.

STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. **Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. 2. ed. New York: J. Wiley, 1999. 427 p.

STEWART, C.E.; PLANTE, A.F.; PAUSTIAN, K.; CONANT, R.T.; SIX, J. Soil carbon saturation: Implications for mensurable carbono pool dynamics in long-term incubations, **Soil Biology Biochemistry**, v.41, p.357-366, 2009.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro – I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.207-212, 2002.

STONE, L.R.; SCHLEGEL, A.J. Tillage and crop rotation phase effects on soil physical properties in the West-Central Great Plains. **Agronomy Journal**, v.102, p.483-491, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Editora: Artmed, 2013. 954 p.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 725-730, 2001.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; RIBON, A.A. Physical properties of dystrophic Red Latosol (Oxisol) under different agricultural uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.925-933, 2010.

TAVARES FILHO, J.; MELO, T.R. de; MACHADO, W.; MACIEL, B.V. structural changes and degradation of red Latosols under different management systems for 20 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1293-1303, 2014.

TIECHER, T. **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre: UFRGS, 2016. 187p.

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

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; FABIAN, A.J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.3, p.421-428, 2008.

TREVISAN, R. G.; FREDDI, O. S.; WRUCK, F. J.; TAVANTI, R. R.; PERES, F. S. C. Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. **Bragantia**, v.76, n.1, p. 145-154, 2017.

TRUMBORE, S.E., CZIMCZIK, C.I. An uncertain future for soil carbon. **American Association for the Advancement of Science**, v.321, p.1455-456, 2008.

VASCONCELOS, R. F. B.; BARROS CANTALICE, J. R.; SOUZA DE OLIVEIRA, V.; COSTA, Y. D. J.; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.2, 2010.

WANG, H., GUAN, D., ZHANG, R., CHEN, Y., HU, Y., XIAO, L. Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field. **Ecological Engineering**, v.70, p. 206-211, 2014.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. de S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.487-494, 2005.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I.C.; OLIVEIRA, R.C. de; BABATA, M.M.; BORGES, E.N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, v. 28, Supplement 1, p. 256-265, 2012.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.891-900, 2004.

WUTKE, E.B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. do P. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: LIMA FILHO, O.F. de; AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; CARLOS, J.A.D. (Ed.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília: Embrapa, v.1, p.59- 168, 2014.

XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânicos e convencionais na Chapada da Ibiapaba – CE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.247-258, 2006.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, v.28, p.337-351, 1936.

ZANCANARO, L.; KAPPES, C.; VALENDORFF, J.D.P.; CORADINI, D.; DAVID, M.A.; ONO, F.B.; SEMLER, T.D.; VIDOTTI, M.V. **Manejo do solo e sistemas de produção**. FUNDAÇÃO MT: Boletim de Pesquisa - 2017/2018 - Soja, Algodão e Milho. 18 ed. Cuiabá - MT: Entrelinhas, 2017, v. 1, p. 53-79.

ZECH, W. N.; SENESI, G.; GUGGENBERGER, K.; KAISER, J.; LEHMANN, T.M.; MIANO A.; MILTNER G.; SCHROTH. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v.79, p.69-116, 1997.

ZHAO, C., GAO, J., HUANG, Y., WANG, G., ZHANG, M. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges. **Land Degradation & Development**, v.27, p. 748–757, 2016.

ZONTA, E.; BRASIL, F. da; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. da. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Parâmetros calculados para ajuste da curva característica de retenção de água no solo¹, na camada 0,0-0,10 m

Sistema de produção	Parâmetros					R ²
	α	n	m	θ_r	θ_s	-
M	0,374	1,409	0,290	0,236	0,511	0,992**
MP	0,251	1,554	0,356	0,270	0,563	0,994**
S	0,251	1,476	0,323	0,236	0,499	0,992**
P	0,336	1,424	0,298	0,249	0,565	0,989**
MP/S	0,250	1,630	0,386	0,278	0,595	0,991**
MP/P	0,330	1,415	0,293	0,245	0,544	0,990**
MP/P/P	0,348	1,394	0,283	0,238	0,532	0,992**
MP/P/S	0,345	1,412	0,292	0,236	0,537	0,995**
S/MP/P/P	0,348	1,444	0,307	0,239	0,523	0,991**
CE	0,405	1,871	0,466	0,275	0,830	0,950**

¹ $\theta_v = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / (1 + (\alpha\Psi)^n))^m$; θ_v : umidade volumétrica do solo em cada potencial matricial; θ_r : umidade volumétrica do solo no potencial matricial de -1500 kPa; θ_s : umidade volumétrica do solo saturado; Ψ : é o potencial matricial; α , n, m: coeficientes da equação; R²: coeficiente de determinação. **significativo a 1% de probabilidade pelo teste de F.

APÊNDICE B – Fotos das análises de fracionamento químico da matéria orgânica e de física dos solo.

Figura A – Obtenção e titulação das frações de ácidos húmicos (AH) e ácidos fúlvicos (AF): Copos descartáveis de 80 ml com as frações após extração e balões volumétricos de 50 ml com as frações separadas após filtragem – (A). Sequência de cores durante a titulação das amostras, da direita para a esquerda – (B). Botucatu, SP

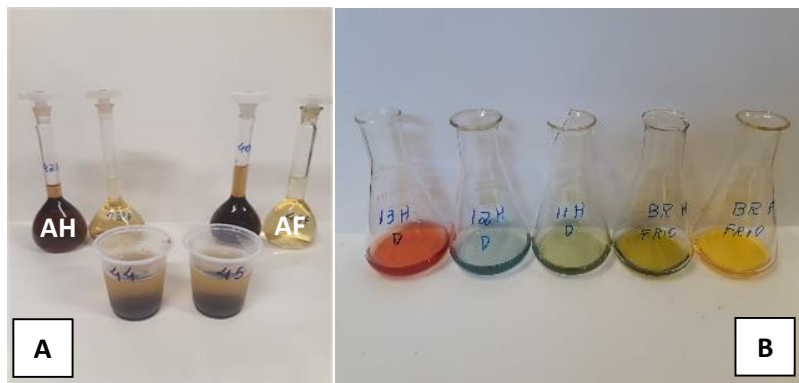


Figura B – Placa de petri com a fração humina seca em estufa à 45 °C, frasco Erlenmeyer com amostra macerada para ser oxidada e amostra da prova em branco oxidada, da direita para esquerda – (A). Sequência de cores durante a titulação das amostras de humina, da direita para a esquerda – (B). Botucatu, SP



Figura C – Aparelho de oscilação vertical – (A); e amostras após tamisamento em água – (B), Botucatu, SP



Figura D – Anéis volumétricos saturando em água – (A); e amostras na câmara de Richards – (B), Botucatu, SP

