

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

DISSERTAÇÃO

**Matéria Orgânica e Atributos Edáficos de
Agregados em Áreas de Sistemas Plantio Direto no
Cerrado Mineiro**

Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto

2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**MATÉRIA ORGÂNICA E ATRIBUTOS EDÁFICOS DE
AGREGADOS EM ÁREAS DE SISTEMAS PLANTIO DIRETO NO
CERRADO MINEIRO**

LUIZ ALBERTO DA SILVA RODRIGUES PINTO

Sob a Orientação do Professor

Marcos Gervasio Pereira

e Co-orientação do Professor

José Luiz Rodrigues Torres

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2020

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P659m	<p>Pinto, Luiz Alberto da Silva Rodrigues, 1987- Matéria orgânica e atributos edáficos de agregados em áreas de sistemas plantio direto no Cerrado mineiro / Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto. – Seropédica, 2020. 84 f. : il.</p> <p>Orientador: Marcos Gervasio Pereira. Dissertação (Mestrado). – – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2020.</p> <p>1. Sistemas conservacionistas. 2. Carbono orgânico. 3. Vias de formação de agregados. I. Pereira, Marcos Gervasio, 1965-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo III. Título.</p>
-------	--

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

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

LUIZ ALBERTO DA SILVA RODRIGUES PINTO

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/02/2020.

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Erica Souto Abreu Lima. Dr. UFRRJ

Thadeu Rodrigues de Melo. Dr. UEL

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Marly e Carlos Alberto,
ao meu irmão Eduardo e
aos meus amigos.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos, primeiramente a Deus e meus Orixás, por tudo que me deram nessa vida. Obrigado por fazerem de mim um instrumento de trabalho, caridade e amor.

Aos meus pais Carlos Alberto Rodrigues Pinto e Marly da Silva Rodrigues Pinto, que são meus exemplos de vida, de dignidade, de esperança, minha base, meu norte. A vocês devo minha vida. Mãe, obrigado pelo seu amor incondicional e por me inspirar tanta paz e tranquilidade. Pai, obrigado por me mostrar que mesmo diante das adversidades da vida, no final tudo dá certo.

À minha segunda mãe, Josefa Euda Batista, por ser meu braço forte e nunca ter desistido daquilo que acreditamos, mesmo quando acreditar se tonar a última esperança.

Aos meu irmão Eduardo da Silva Rodrigues Pinto, por todos os momentos bons e difíceis, a vida não é fácil, mas juntos nada devemos temer, te amo.

À minha família Silva por todo o apoio, carinho e por ter entendido os momentos de ausência. “Não somos a Grande Família, mas somos uma grande família”. Em especial ao meu tio Telmo da Silva, meu herói hoje e sempre.

Aos meus grandes e velhos amigos Luciano Batista, Bruno José, Aline da Silva, Rossini de Santana, Jorge Claudio e Rose Cardeiro por toda amizade e companheirismo, minhas paixões nessa vida e nas próximas.

Ao meu casal de amigos Raquel Vitoriano e Celso Carlos. Eu seria incapaz de traduzir em palavras o quanto vocês são fundamentais em minha vida.

À Elias Lima Junior (Branco), por ter feito parte desse momento único e delicado em minha vida. Por todos os momentos, todas as alegrias, as risadas, o carinho, o companheirismo. Sei que sem o seu apoio não teria conseguido superar certos obstáculos neste percurso. Serei eternamente grato por tudo, meu anjo.

À minha amiga e fiel escudeira, Melania Merlo Ziviani. Meu braço direito nas pesquisas. Obrigado por compartilhar momentos de estudo, conversas, cumplicidade, preocupação, carinho e descontração.

Aos amigos que a Rural me presenteou durante esses anos, em especial: Igor Lucas, Christine Sanchez, Nara Brito, João Pedro Vasconcelos, William Brito, Celeste Rossi, Maria Helena, Rafael Mota, Renato Siquini, Camila Matos, Iara Maria, Núbia Nunes, Lucienne Oliveira e Gilsonley Lopes. “Amigos, pra toda vida”.

Ao meu amigo Marcos Gervasio Pereira, pela amizade, carinho, preocupação, conselhos, alegrias, risadas, choros, caminhadas e reciprocidade. Obrigado por tudo. “Perdoa a minha inocência, mas eu ainda acredito que pequenos gestos de gentileza podem salvar o mundo”, assim você me definiu.

Às minhas amigas Sandra Lima e Shirlei Almeida pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho. Obrigado pelas sugestões, críticas, ensinamentos, companheirismo e preocupações. Pessoas incríveis para mim, amigades que levarei por toda a vida.

Aos meus amigos, Igor de Sousa, Robert Ferreira, Wanderson Farias e Elias Deulefeu, por terem me ajudado com as análises. Pelo carinho e preocupação. Obrigado pela festa surpresa depois do resultado do processo seletivo do doutorado.

Aos meus amigos Sidinei Julio Beutler (Paraná), Eduardo Neto, Roni Fernandes Guareschi, Cristiane Figueira, Carlos Roberto e Otávio Queiroz, pela amizade e confiança. Obrigado por me atenderem sempre que precisei.

Aos meus amigos Guilherme Duarte e Raphael Terra. Sempre em minhas preces.

Aos meus amigos Juliano Coelho Braga, Rozaura Souza, Cristina de Freitas, Valéria Lima, Jean Carlos, Sandra Regina, José Paulo do Santos e D. Cecília. Obrigado por toda luz.

Aos meus amigos de Riachuelo-Jacaré, em especial: Caroline Menegussi, Juliana Dourado, Karen Campos e Rodrigo Pereira, por toda preocupação, carinho e amizade.

Ao professor, amigo e orientador na graduação Nivaldo Schultz pelos ensinamentos, paciência e dedicação durante todos esses anos.

Ao meu orientador Marcos Gervasio Pereira, pela imensurável contribuição no desempenho deste trabalho. Obrigado pela orientação, paciência, cobrança, sinceridade, respeito e, principalmente a dedicação que o senhor teve por mim. Pelo exemplo de profissionalismo e pelo incentivo que muito contribuiu para minha formação e amor à Ciência do Solo.

Ao meu co-orientador José Luiz Rodrigues Torres. Sem a sua colaboração este estudo não poderia ser realizado. Obrigado também pela disponibilização de todas as informações necessárias. Ao Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) *campus* Uberaba-MG, pelo fornecimento do material para o presente estudo.

À UFRRJ, meu segundo lar na vida. Ao CNPq e a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo (PPGA-CS/UFRRJ) pelo apoio prestado. Obrigado aos secretários, discentes, docentes, colaboradores, orientadores e coordenadores do programa pela dedicação e comprometimento.

Aos amigos e colegas dos laboratórios de Gênese e Classificação de Solos e Indicadores Edafo-Ambientais – Matéria Orgânica, pelos bons momentos passados juntos.

A todos os funcionários do Departamento de Solos.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto nasceu no Município de Seropédica – RJ, no dia 7 de junho de 1987. Em 2005 concluiu o ensino médio no Colégio Estadual Professor Waldemar Raythe. Após conclusão do ensino médio foi trabalhar no comércio, onde aprendeu sobre conceitos relacionados à como lidar com o próximo. Em 2011 ingressou no curso de graduação em Licenciatura em Ciências Agrícolas na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), posteriormente em 2012 fez reopção interna e iniciou seus estudos no curso de graduação em Agronomia, e concluindo-o em 2017. Durante o período de graduação foi bolsista de Iniciação Científica (PROVERDE/JB/PROPPG) no período de 2015 a 2017. E no período de novembro de 2014 a março de 2015 exerceu o cargo de monitor na disciplina de Física do Solo desta instituição. Em março de 2018 ingressou no Mestrado no Programa de Pós-graduação em Agronomia - Ciência do Solo (PPGA-CS/UFRRJ).

RESUMO GERAL

PINTO, L. A. S. R. **Matéria orgânica e atributos edáficos de agregados em áreas de sistemas plantio direto no Cerrado mineiro.** 2020. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

A mensuração do impacto da mudança das formas de uso e manejo da terra ao longo do tempo tem sido avaliada a partir de indicadores de qualidade do solo. Dentre eles, destacam-se a agregação (estabilidade, gênese ou vias de formação) e matéria orgânica do solo (MOS) (acúmulo, proteção ou frações). O presente trabalho foi dividido em 2 capítulos com diferentes objetivos, a saber: capítulo I, avaliar i) a influência do sistema de manejo do solo na estabilidade dos agregados e a proporção da agregação biogênica; e ii) as possíveis associações entre as vias de formação dos agregados e a dinâmica da matéria orgânica do solo; e o capítulo II, identificar i) a contribuição de diferentes plantas de coberturas utilizadas em sistema plantio direto (SPD) na agregação biogênica; e ii) a influência da formação dos agregados na compartimentalização da matéria orgânica do solo. No capítulo I, foram avaliadas três áreas manejadas (sistemas de manejo) e uma área de referência sem ação antrópica, totalizando quatro diferentes áreas amostrais: SPD com 6 anos (SPD6), SPD com 18 anos (SPD18), sistema plantio convencional com 20 anos (SPC20) e uma área de Cerrado (AC). Para o capítulo II, avaliaram-se duas áreas manejadas sob SPD com diferentes tempos de implantação (6 e 18 anos, SPD6 e SPD18 respectivamente) e coberturas vegetais, configurando seis áreas amostrais: SPD6, milho (SPD6MI); SPD6, braquiária (SPD6BR); SPD6, crotalária (SPD6CR); SPD18, milho (SPD18MI); SPD18, braquiária (SPD18BR); SPD18, e crotalária (SPD18CR). Em cada área amostral foram coletadas cinco pseudorepeticções (torrões) nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m de profundidade. Após a coleta as amostras foram secas ao ar e posteriormente submetidas a peneiramento utilizando um conjunto de peneiras de 9,7 e 8,0 mm de malha, sendo selecionados somente os agregados retidos nesse intervalo. Nestes quantificou-se o percentual de cada tipo de agregado a partir da identificação e separação deles em fisiogênicos e biogênicos. Posteriormente foram realizadas as análises de carbono orgânico total e os fracionamentos da matéria orgânica do solo: químico (fração ácido fúlvico, ácido húmico e húmica), físico granulométrico (carbono orgânico particulado e associado aos minerais) e físico densimétrico (carbono da fração leve-livre). Concluiu-se no primeiro capítulo, que o menor revolvimento do solo em sistemas agrícolas conservacionistas (sistema plantio direto) favorece a agregação biogênica e que agregados biogênicos afetam a dinâmica da MOS, promovendo a proteção e estabilização, e conseqüentemente, o acúmulo das diferentes frações da MOS. No segundo capítulo, constatou-se que o uso de gramíneas, em especial as braquiárias, como plantas de cobertura em sistema plantio direto após 6 e 18 anos de adoção favorece a formação de agregados da via biogênica e os mesmos alteram a compartimentalização da MOS, sendo mais influenciados e beneficiados pelos mecanismos de estabilização das diferentes frações do material orgânico.

Palavras-chave: Sistemas conservacionistas. Carbono orgânico. Vias de formação de agregados.

GENERAL ABSTRACT

PINTO, L. A. S. R. **Organic matter and edaphic attributes of aggregates in no-tillage areas in the Cerrado mineiro.** 2020. 81 p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

The impact of change in land use and management over time has been evaluated using soil quality indicators. Among them, aggregation (stability, genesis or formation pathways) and soil organic matter (SOM) (accumulation, protection or origin). The study was divided into 2 chapters with different objectives: chapter I, to evaluate i) the influence of the soil management system on the stability of aggregates and the proportion of biogenic aggregation; and ii) the possible associations between the pathways of aggregate formation and the dynamics of organic matter in the soil; and chapter II, to evaluate i) the contribution of different cover crops used in no-tillage system (NTS) in biogenic aggregation; and ii) the influence of aggregate formation on the compartmentalization of soil organic matter. In Chapter I, three managed areas (management systems) and a reference area without anthropic action were evaluated, totaling four different sample areas: NTS with 6 years (NTS6), NTS with 18 years (NTS18), conventional tillage systems with 20 years (CTS20) and a Cerrado area (CA). For Chapter II, two areas managed under NTS with different adoptions times (6 e 18 years, NTS6 and NTS18, respectively) and plant coverings were evaluated, configuring six sample areas: NTS6, millet (NTS6MI); NTS6, brachiaria (NTS6BR); NTS6, crotalaria (NTS6CR); NTS18, millet (NTS18MI); NTS18, brachiaria (NTS18BR); NTS18, and crotalaria (NTS18CR). In each area five pseudorepetitions were collected in the soil depth of 0.00-0.05 and 0.05-0.10 m. After sampling the soil material was air-dried and separated using a set of 9.7 and 8.0 mm mesh sieves, being selected only the aggregates retained in this interval. In these aggregates, the percentage of each type according to size class was quantified and separated into physicogenic and biogenic. Subsequently, total organic carbon and the following soil organic matter fractionation analyses were performed: chemical (fulvic acid fraction, humic acid and humine), particle physics (particulate organic carbon and associated with minerals) and densimetric physics (carbon of the light-free fraction). In the first chapter, was observed that the soil with less disturbance, i.e., the agricultural conservation systems (No-till system) biogenic aggregation was favored and the biogenic aggregates affect the dynamics of SOM, promoting protection and stabilization, and consequently, the accumulation of different SOM fractions. In the second chapter, it was concluded that the use of grass, specially the brachiaria, as covering plant in the no-tillage system, after 6 and 18 years of adoption, favored the aggregates formation in the biogenic pathway which also might change the compartmentalization of the SOM, thus being more influenced and benefited by the stabilization mechanisms of the different fractions of organic material.

Keywords: Conservationist systems. Organic carbon. Aggregation formation pathways.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização do município de Uberaba-MG. **Fonte:** Elaborado pelo autor. 16
- Figura 2.** Variação da média mensal da precipitação e da temperatura durante o ano do estudo. **Fonte:** Dados climáticos obtidos no site climate-data.org. (2019), e elaborado pelo autor..... 16
- Figura 3.** Distribuição, em porcentagem, de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG. Comparação dos sistemas de manejo em relação à área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, $p < 0,05$. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; e SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos. 25
- Figura 4.** Carbono orgânico total de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo no bioma Cerrado, Uberaba-MG, na camada 0,00-0,05 m. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema de manejo (Teste de Tukey, $p < 0,05$). Comparação dos sistemas de manejo em relação à área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, $p < 0,05$. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo. 26
- Figura 5.** Carbono orgânico total de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo no bioma Cerrado, Uberaba-MG, na camada 0,05-0,10 m. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema de manejo (Teste de Tukey, $p < 0,05$). Comparação dos sistemas de manejo em relação à área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, $p < 0,05$. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; e CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo. 27
- Figura 6.** Distribuição, em porcentagem, de carbono das frações húmicas em agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo no bioma Cerrado, Uberaba-MG, na camada 0,00-0,05 m. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; %CAF: Porcentagem de carbono da fração ácido fúlvico; %CAH: Porcentagem de carbono da fração ácido húmico; %CHUM: Carbono da fração humina; %CNH: Porcentagem de carbono não humificado; F: Fisiogênicos; e B: Biogênicos. 31
- Figura 7.** Distribuição, em porcentagem, de carbono das frações húmicas em agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo no bioma Cerrado, Uberaba-MG, na camada 0,05-0,10 m. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; %CAF: Porcentagem de carbono da fração ácido fúlvico; %CAH: Porcentagem de carbono da fração ácido húmico; %CHUM:

Carbono da fração humina; %CNH: Porcentagem de carbono não humificado; F: Fisiogênicos; e B: Biogênicos. 31

Figura 8. Análise de componentes principais (ACP) integrando a proporção relativa, o conteúdo de carbono orgânico total e as frações químicas e físicas da MOS de agregados fisiogênicos (Fis) e biogênicos (Bio), nos diferentes sistemas de manejo, à camada de 0,00-0,05 m, no bioma Cerrado, Uberaba-MG. AC: Área de Cerrado; SPC: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; %Fis: Proporção de agregados fisiogênicos; %Bio: Proporção de agregados biogênicos; COT: Carbono orgânico total; C-FAF: Carbono orgânico da fração ácido fúlvico; C-FAH: Carbono orgânico da fração ácido húmico; C-HUM: Carbono orgânico da fração humina; %SH: Porcentagem de substâncias húmicas; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; e CFLL: Carbono orgânico da fração leve-livre. 36

Figura 9. Análise de componentes principais (ACP) integrando a proporção relativa, o conteúdo de carbono orgânico total e as frações químicas e físicas da MOS de agregados fisiogênicos (Fis) e biogênicos (Bio), nos diferentes sistemas de manejo, à camada de 0,05-0,10 m, no bioma Cerrado, Uberaba-MG. AC: Área de Cerrado; SPC: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; %Fis: Proporção de agregados fisiogênicos; %Bio: Proporção de agregados biogênicos; COT: Carbono orgânico total; C-FAF: Carbono orgânico da fração ácido fúlvico; C-FAH: Carbono orgânico da fração ácido húmico; C-HUM: Carbono orgânico da fração humina; %SH: Porcentagem de substâncias húmicas; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; e CFLL: Carbono orgânico da fração leve-livre. 37

Figura 10. Carbono orgânico total (COT) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais na camada 0,00-0,05 m de profundidade no bioma Cerrado, Uberaba-MG. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais. 58

Figura 11. Carbono orgânico total (COT) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais na camada 0,05-0,10 m de profundidade no bioma Cerrado, Uberaba-MG. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais. 59

Figura 12. Área de cerrado, visão interna (A) e externa (B), Uberaba-MG. **Fotos:** José Luiz Rodrigues Torres, 2019. 77

Figura 13. Área de plantio convencional (SPC20) (C) e cobertura de milho utilizada como planta de cobertura nas áreas de plantio direto (D) SPD6 e SPD18. Fotos: José Luiz Rodrigues Torres, 2019.	77
Figura 14. Plantas de cobertura braquiária (E) e crotalária (F) utilizadas nas áreas de SPD6 e SPD18. Fotos: José Luiz Rodrigues Torres, 2019.	77
Figura 15. Agregado fisiológico sob AC (A) e Agregado biológico sob AC (B). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.	78
Figura 16. Agregado fisiológico sob SPC20 (C) e Agregado biológico sob SPC20 (D). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.	78
Figura 17. Agregado fisiológico sob SPD6BR (E) e Agregado biológico sob SPD6BR (F). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.	79
Figura 18. Agregado fisiológico sob SPD6CR (G) e Agregado biológico sob SPD6CR (H). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.	79
Figura 19. Agregado fisiológico sob SPD6MI (I) e Agregado biológico sob SPD6MI (J). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.	80
Figura 20. Agregado fisiológico sob SPD18BR (L) e Agregado biológico sob SPD18BR (M). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.	80
Figura 21. Agregado fisiológico sob SPD18CR (N) e Agregado biológico sob SPD18CR (O). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.	81
Figura 22. Agregado fisiológico sob SPD18MI (P) e Agregado biológico sob SPD18MI (Q). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Histórico, descrição e localização das áreas de estudo.....	17
Tabela 2. Carbono total, nitrogênio total e diâmetro médio ponderado dos agregados de 4,0 mm em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no município de Uberaba-MG.....	22
Tabela 3. Caracterização dos atributos químicos dos agregados de 4,0 mm em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no município de Uberaba-MG.	23
Tabela 4. Carbono orgânico da fração ácido fúlvico (C-FAF) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.	28
Tabela 5. Carbono orgânico da fração ácido húmico (C-FAH) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.	29
Tabela 6. Carbono orgânico da fração humina (C-FHUM) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.	30
Tabela 7. Carbono orgânico particulado (COP) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.....	32
Tabela 8. Carbono orgânico associado aos minerais (COAM) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.	33
Tabela 9. Carbono orgânico da fração leve-livre (CFLL) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.	34
Tabela 10. Distribuição, em porcentagem, de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos e coberturas vegetais em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.	56
Tabela 11. Carbono orgânico da fração ácido fúlvico (C-FAF) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.....	61
Tabela 12. Carbono orgânico da fração ácido húmico (C-FAH) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.....	62
Tabela 13. Carbono orgânico da fração humina (C-FHUM) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.....	64
Tabela 14. Carbono orgânico particulado (COP) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.	65

Tabela 15. Carbono orgânico associado aos minerais (COAM) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.....	67
Tabela 16. Carbono orgânico da fração leve-livre (CFL) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.....	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Sistemas de Manejo do Solo	3
2.2. Agricultura Conservacionista e Práticas Conservacionistas	3
2.3. Plantio Direto	4
2.4. Sistema Plantio Direto	5
2.5. Influência do Tempo de Adoção do Sistema Plantio Direto	5
2.6. Benefícios do Sistema Plantio Direto ao Ambiente Edáfico	6
2.7. Indicadores de Qualidade do Solo	6
2.8. Agregação, Vegetação e Matéria Orgânica do Solo: Interações	7
2.9. Agregação: Vias de Formação	8
3. CAPÍTULO I ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS, VIAS DE FORMAÇÃO E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM AGREGADOS DE ÁREAS SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO NO CERRADO MINEIRO	12
3.1. RESUMO	13
3.2. ABSTRACT	14
3.3. INTRODUÇÃO	15
3.4. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo	16
3.4.2. Histórico da área experimental	17
3.4.3. Amostragem e separação dos agregados	18
3.4.4. Análises realizadas nos agregados de 4,0 mm	18
3.4.5. Análises realizadas nos agregados de 8,0 mm	19
3.4.6. Análises estatísticas	21
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.5.1. Carbono e nitrogênio total, estabilidade e atributos químicos dos agregados de 4,0 mm	22
3.5.2. Vias de formação e matéria orgânica do solo dos agregados de 8,00 mm	24
3.5.3. Análises de componentes principais	35
3.6. CONCLUSÕES	39
3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
4. CAPÍTULO II FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DE AGREGADOS FISIOGÊNICOS E BIOGÊNICOS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO COM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO E COBERTURAS VEGETAIS DO SOLO NO CERRADO MINEIRO	49
4.1. RESUMO	50
4.2. ABSTRACT	51
4.3. INTRODUÇÃO	52
4.4. MATERIAL E MÉTODOS	54

4.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo	54
4.4.2. Histórico da área experimental.....	54
4.4.3. Amostragem e separação dos agregados.....	54
4.4.4. Análises realizadas	54
4.4.5. Análises estatísticas.....	55
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.5.1. Contribuição relativa.....	56
4.5.2. Carbono orgânico total.....	57
4.5.3. Carbono orgânico das frações húmicas.....	60
4.5.4. Carbono orgânico das frações particuladas, associadas aos minerais e leve livre	65
4.6. CONCLUSÕES	70
4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
5. CONCLUSÕES GERAIS	75
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
7. ANEXOS.....	77

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento populacional previsto pela ONU (2019) para o ano de 2030 poderá ser de 10%, tendendo a alcançar 26% em 2050 e ultrapassar 42% em 2100. Essa expansão da população mundial demandará o aumento significativo da produção de alimentos, desafiando o crescimento da produtividade em áreas cada vez menores e sujeitas a degradação por conta do manejo inadequado do recurso solo. A intensa utilização agrícola do solo sob manejo inadequado ou sem considerar a sua capacidade de uso, pode levar a sua degradação, intensificando problemas sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do mesmo. Dentre os componentes do manejo do solo, o preparo é atividade que mais influencia nos atributos mencionados, visto que sua ação atua diretamente sobre a estrutura do solo, podendo promover alterações na porosidade, densidade do solo, agregação (RIBEIRO et al., 2016), fertilidade, acúmulo de matéria orgânica e na fauna edáfica.

As modificações no uso dos solos das áreas de produção agrícola, dependendo do sistema de manejo adotado, podem comprometer significativamente a qualidade e as funções edáficas. No que tange os sistemas de manejo mais amplamente usados sobre os solos brasileiros, destacam-se o sistema plantio convencional (SPC) e o sistema plantio direto (SPD), com características, origens, idades e práticas distintas. As práticas adotadas no preparo do solo para o SPC deixam-no descoberto, favorecendo a ação dos processos erosivos, bem como, contribuindo para a redução do conteúdo de matéria orgânica e da fertilidade (GUARESCHI et al., 2012). Já o SPD compreende um conjunto de práticas no solo que pode favorecer sua qualidade ou reduzir sua degradação, a saber: redução ou supressão de mobilização do solo; diversificação de espécies, em estruturas de rotação, consorciação ou sucessão de culturas; e cobertura permanente do solo por meio de retenção de resíduos orgânicos ou plantas de cobertura (OPARA-NADI, 1993).

Diversos estudos já foram realizados comparando e demonstrando os benefícios da implantação do SPD em relação ao SPC sob condições ambientais específicas (PEREIRA et al., 2010; SCHIAVO et al., 2011; BELL & MOORE, 2012; AZIZ et al., 2013; LOSS et al., 2014 a). Para tais avaliações, alguns atributos edáficos têm sido utilizados como indicadores de qualidade do solo, mensurando o impacto da mudança do uso da terra ao longo do tempo. Dentre eles, destacam-se a matéria orgânica do solo (MOS) e a agregação do solo, em virtude da notável sensibilidade às diferentes formas de manejo que ambos apresentam, e ressaltando sempre a estreita correlação que existe entre eles.

A MOS é considerada como o indicador chave na mensuração da qualidade do solo e apresenta uma relação intrínseca com o processo de formação dos agregados. Visto que, compostos orgânicos são considerados os principais agentes de cimentação das partículas do solo e, ao mesmo tempo, o próprio agregado promove maior oclusão da MOS, possibilitando o seu acúmulo (BORGES et al., 2015). Portanto, pode-se inferir que os agregados podem possivelmente atuar como agentes diretos no sequestro de carbono no solo, funcionando como verdadeiros reservatórios de matéria orgânica, evidenciando assim o seu potencial uso como indicador da qualidade de áreas submetidas a diferentes sistemas de manejo.

A aproximação e cimentação das partículas são etapas fundamentais para o processo de agregação e resultam da ação de íons e moléculas oriundas de processos físicos, químicos e biológicos do solo (RIBEIRO et al., 2012). Estes processos mencionados estão relacionados diretamente às vias de formação dos agregados, nas quais os agregados formados a partir da ação dos processos físicos e químicos são denominados fisiogênicos (via fisiogênica), e biogênicos (via biogênica) quando formados por maior ação dos processos biológicos (LOSS

et al., 2014 b). Vale ressaltar, que as alterações que ocorrem na agregação do solo oriundas da forma de sistema de manejo adotado, podem resultar também em mudanças nas vias de formação dos agregados, especialmente, na via biogênica (LOSS et al., 2014b).

Trabalhos realizados com agregados formados por diferentes vias, verificaram variações na caracterização dos atributos químicos, físicos e biológicos em agregados biogênicos quando comparados aos agregados fisiogênicos. Em suma, esses trabalhos têm demonstrado que os agregados formados pela via biológica possuem maiores teores de nutrientes, bem como, auxiliam na proteção física e estabilização da MOS (SILVA NETO et al., 2010), conseqüentemente aumentando os estoques de carbono no solo. Fato este que evidencia o potencial emprego dos agregados formados por diferentes vias como indicadores na avaliação da qualidade do solo, principalmente os de origem biológica, em virtude de sua maior sensibilidade aos diferentes sistemas de uso e manejo do solo (LOSS et al., 2014 b).

A partir do exposto, este estudo teve como hipótese que diferentes sistemas de manejo do solo (plantio direto e plantio convencional) influenciam nas vias de formação dos agregados, assim como no teor e na composição da matéria orgânica presente nos mesmos. Para avaliar essa hipótese, esta dissertação foi dividida em 2 capítulos com diferentes objetivos:

O Capítulo I intitulado “Atributos físicos e químicos, vias de formação e matéria orgânica do solo em agregados de áreas sob diferentes sistemas de manejo do solo no Cerrado mineiro”, teve como objetivos avaliar i) a influência do sistema de manejo do solo na estabilidade dos agregados e a proporção da agregação biogênica; e ii) as possíveis associações entre as vias de formação dos agregados e a dinâmica da matéria orgânica do solo.

O Capítulo II intitulado “Frações da matéria orgânica de agregados fisiogênicos e biogênicos em sistema plantio direto com diferentes tempos de implantação e coberturas vegetais do solo no Cerrado mineiro”, teve como objetivos avaliar i) a contribuição de diferentes plantas de coberturas utilizadas em sistema plantio direto (SPD) na agregação biogênica; e ii) a influência da formação dos agregados na compartimentalização da matéria orgânica do solo

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sistemas de Manejo do Solo

A população mundial deverá crescer de 7,7 bilhões em 2019 para 8,5 bilhões em 2030 (aumento de 10%), crescendo em média 80 milhões de pessoas por ano, tendendo a alcançar 9,7 bilhões em 2050 (26%) e ultrapassar os 10,9 bilhões em 2100 (42%) (ONU, 2019). Este aumento populacional significativo, é linear, e expande a demanda mundial por alimentos, desafiando a expansão da produtividade em áreas cada vez menores, devido à desertificação e degradação do ambiente edáfico causados principalmente pelo manejo inadequado desses solos. A utilização agrícola do solo sob manejo inadequado ou sem considerar a sua capacidade de uso, pode levar a sua degradação, acarretando ou intensificando problemas sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do mesmo.

No Brasil, a forma predominante de preparo dos solos envolvia práticas de revolvimento, com ampla utilização de implementos, tais como o arado, grade, enxada rotativa, escarificador dentre outros, sendo essa forma de uso denominada de cultivo convencional (ou sistema plantio convencional - SPC). Esta forma de manejo, resultante dos diversos processos imigratórios vivenciados no país, contribuiu para alavancar a mecanização e o aumento da produção agrícola nacional. Em compensação, desencadeou processos de degradação dos solos que passaram a ameaçar seriamente a viabilidade e a sustentabilidade da agricultura a médio e longo prazo (MOTTER & ALMEIDA, 2015). De acordo com Casão Junior et al. (2012), o uso dos implementos mencionados acima gerou impactos ambientais indesejáveis que levaram à degradação dos recursos naturais em áreas agricultáveis.

Dentre os componentes do manejo, o preparo do solo é atividade que mais influencia nos seus atributos físicos, químicos e biológicos, uma vez que atua diretamente sobre a estrutura e promove alterações na porosidade, densidade do solo, agregação (RIBEIRO et al., 2016), fertilidade, acúmulo de matéria orgânica e na fauna edáfica. As práticas adotadas no preparo do solo para o SPC deixam-no descoberto, favorecendo ou intensificando a ação dos processos erosivos, bem como, contribuindo para a redução do conteúdo de matéria orgânica e da fertilidade (GUARESCHI et al., 2012).

As modificações no uso dos solos das áreas de produção agrícola, dependendo do sistema de manejo adotado, podem comprometer significativamente a qualidade e as funções edáficas. Vale ressaltar ainda, que solos semelhantes submetidos a diferentes sistemas de manejo, possivelmente apresentaram níveis de degradação diferentes, sendo o plantio convencional o sistema que promove maior degradação do solo, quando comparado aos sistemas de manejo conservacionistas (ASSIS & LANÇAS, 2010; SALES et al., 2016).

Em resumo, a degradação do solo em áreas agricultáveis sob o SPC é causada a partir da sua exposição à ação do vento, da chuva e do sol, tornando-o mais susceptível aos processos erosivos. Além disso, o SPC acelera a decomposição da MOS, destrói os agregados e reduz sua estabilidade nas camadas superficialmente manejadas, além de favorecer a redução da porosidade, assim aumentando a densidade do solo e a resistência à penetração no perfil (SALES et al., 2016). Portanto, é urgente a adoção de sistemas conservacionistas para promover condições adequadas para o bom desenvolvimento das culturas.

2.2. Agricultura Conservacionista e Práticas Conservacionistas

O sistema de gestão da Agricultura Conservacionista (AGRC) é fundado em três pilares básicos: i) redução ou supressão de mobilização do solo; ii) diversificação de espécies, em rotação, consorciação ou sucessão de culturas; e iii) cobertura permanente do solo por meio de

retenção de resíduos orgânicos ou plantas de cobertura (OPARA-NADI, 1993). A partir do exposto, a AGRC pode ser entendida como a agricultura conduzida sob a proteção de um complexo de tecnologias de caráter sistêmico, objetivando preservar, manter e restaura ou recuperar os elementos da biosfera ou recursos naturais, mediante o manejo integrado do solo, da água e da biodiversidade, devidamente compatibilizados com uso de insumos externos (DENARDIN et al., 2012). Em suma, a AGRC compreende um conjunto de práticas agrícolas ou de preceitos que podem minimizar as alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (como estrutura, fertilidade e biodiversidade, p. ex.).

Estas práticas ou preceitos conservacionistas podem ser de caráter vegetativo, edáfico ou mecânico, e que para as regiões de clima subtropical e tropical, esse conjunto de práticas sob a ótica da AGRC pode ser ainda mais amplo e exigente, compreendendo: i) obediência à aptidão agrícola das terras; ii) respeito sobre a capacidade de uso do solo; iii) erradicação da queima de restos culturais; iv) diversidade de sistemas de produção; v) adição de matéria orgânica ao solo, em quantidade, qualidade e frequência compatíveis com a demanda biológica do sistema edáfico; vi) manejo integrado de pragas; e vii) implantação de práticas mecânicas ou hidráulicas, para manejo de enxurradas e controle de erosão (DENARDIN et al., 2012).

A utilização de sistemas de manejo dentro dos preceitos da AGRC, visa aumentar a sustentabilidade da agricultura nos aspectos socioeconômicos, gerar competitividade para o agronegócio, garantir segurança e qualidade alimentar e preservar o ambiente. Dentro do contexto da AGRC, um dos sistemas mais amplamente adotado é o sistema plantio direto (SPD). Inicialmente, a expressão plantio direto (ou semeadura direta) foi conceituada como simples prática conservacionista, especialmente voltada ao controle da erosão hídrica. Posteriormente, o enfoque concedido a essa prática foi ampliado, passando a ser compreendido como um amplo e complexo “sistema de manejo” embasado nos fundamentos da AGRC, sendo por isso representado pela expressão sistema plantio direto (CERETTA et al., 2007).

2.3. Plantio Direto

O termo plantio direto (PD) ou semeadura direta é conceituado como a ação de semear mediante mobilização de solo restrita à linha de semeadura e manutenção dos restos culturais na superfície do solo (DENARDIN et al., 2012). Esse termo é fiel ao conceito dos termos *no-till*, *notillage* e *zero-tillage*, oriundos da Inglaterra e dos EUA, de onde essa prática foi importada em 1969, sob o enfoque de simples método alternativo de preparo reduzido de solo (CERETTA et al., 2007). Dentro dos preceitos da AGRC, o PD engloba somente dois dos pilares básicos, a saber: redução ou supressão da mobilização intensa do solo e cobertura permanente do solo por meio retenção de resíduos orgânicos ou plantas de cobertura (DENARDIN et al., 2012).

Para as condições edafoambientais das regiões subtropical e tropical do Brasil, esses preceitos são insuficientes para promoverem conservacionismo em áreas de produção com culturas anuais (CASSOL et al., 2007). Em outros termos, nessas regiões mencionadas acima, a redução da intensidade do preparo do solo e a manutenção dos restos culturais na superfície do solo não são suficientes para enquadrar o PD dentro da ótica da AGRC. Em virtude da elevada taxa de mineralização dos resíduos culturais, impostas por essas condições, tornando efêmera e transitória tanto a cobertura quanto a estabilidade estrutural do solo requerida para o bom desenvolvimento do sistema radicular das espécies cultivadas (DENARDIN et al., 2019).

Sendo assim, o PD necessitou ser adaptado e praticado sob a visão de um “sistema de manejo” e não somente como uma prática conservacionista alternativa de redução da intensidade do preparo do solo, associado à manutenção dos restos culturais na camada superficial. É nesse contexto que surge o sistema plantio direto.

2.4. Sistema Plantio Direto

O termo sistema plantio direto (SPD) é um conceito originalmente brasileiro. Surgiu, em meados dos anos 1980, cerca de 11 anos após a introdução do PD no Brasil, período em que foi verificada a necessidade do PD evoluir para SPD. Assim, o SPD passou a ser consensualmente conceituado como um complexo de preceitos da AGRC destinado à exploração de sistemas de produção agrícola, compreendendo: i) mobilização do solo somente na linha ou cova de semeadura ou de plantio; ii) manutenção do solo permanentemente coberto com plantas vivas e resíduos culturais; iii) diversificação de culturas, estrutura em rotação, consorciação e/ou sucessão de culturas; iv) aporte de material orgânico ao solo em quantidade, qualidade e frequência compatíveis com a demanda biológica do solo; v) preservação dos restos culturais; e vi) redução ou supressão do intervalo de tempo entre colheita e semeadura (DENARDIN et al., 2019).

Vale ressaltar, que por se tratar de um “sistema”, o SPD engloba o plantio direto ou semeadura direta, além do plantio direto na palha e o sistema plantio direto na palha. Em síntese, enquanto o PD atende a apenas dois preceitos da AGRC, o SPD em razão da palavra “sistema”, atende a pelo menos seis, como mencionados anteriormente. Logo, quando adotado conforme seus preceitos básicos, o SPD pode proporcionar inúmeros benefícios, como a racionalização do uso de insumos e máquinas, manutenção e/ou melhoria dos atributos edáficos, além de reduzir a perda dos recursos naturais (solo, água e nutrientes) (CASSOL et al., 2007).

Entretanto, dentro do cenário da agricultura brasileira, os modelos de produção dominantes e vigentes nas áreas agricultáveis com culturas anuais viabilizam o PD em detrimento ao SPD, em virtude da reduzida quantidade e qualidade dos resíduos orgânicos anualmente aportados sobre a camada superficial do solo (DENARDIN et al., 2019) ou da falta de conhecimento sobre as principais diferenças entre PD e SPD, motivos estes que estão limitando a agricultura brasileira de todos os benefícios esperados pela AGRC.

2.5. Influência do Tempo de Adoção do Sistema Plantio Direto

A melhoria dos atributos edáficos em áreas conservacionistas depende da qualidade e quantidade de biomassa produzida pelas plantas de cobertura e aportadas sobre a superfície do solo, do tempo de instalação do sistema vigente e das condições climáticas da região (ROSSET, 2015; ANDRADE et al., 2018). Uma variável importante para analisar no SPD é avaliar o tempo de adoção do sistema. Estudos têm evidenciado que o SPD pode alterar as propriedades do solo, à medida que os cultivos se sucedem com o passar dos tempos, em virtude do contínuo aporte de material orgânico sobre a superfície do solo, oriundos dos resíduos vegetais; da ação benéfica do sistema radicular das plantas instaladas (plantas de cobertura e culturas de interesse econômico); e da proteção oferecida à superfície do solo (ANDRADE et al., 2018).

Em estudo avaliando os estoques de COT e atributos físicos de um Latossolo em cronosequência sob diferentes manejos, Rossetti & Centurion et al. (2015), verificaram que os estoques de carbono aumentaram na camada superficial do solo à medida que a duração do SPD aumentou. Ressaltando que em sistemas menos perturbados pelo preparo do solo, como SPD, após a adição e decomposição dos resíduos vegetais ao longo dos anos de adoção, os estoques de COT podem aumentar na camada mais superficial do solo. Nesse sentido, é fundamental destacar a importância do tempo de instalação do SPD para que se processem alterações no ambiente edáfico.

Em sequência, é possível observar que nos primeiros 5 anos de instalação do SPD (fase de adoção do sistema), os teores de matéria orgânica no solo são baixos, menor acúmulo de palhada na superfície, início do processo de reagregação das partículas e restabelecimento da

atividade microbiana edáfica. À medida que aumenta o tempo de implantação do sistema (5-10 anos, fase de transição; 10-20 anos, fase de consolidação; e mais de 20 anos, fase de manutenção), observa-se melhorias dos atributos edáficos, quando manejados corretamente (ANGHINONI, 2007; ROSSET, 2015).

2.6. Benefícios do Sistema Plantio Direto ao Ambiente Edáfico

Dentro dos preceitos da AGRC, o uso de sistemas de manejo do solo como o SPD, pode atenuar o processo de degradação do solo e resultar em melhorias significativas à qualidade física, química e biológica do solo (SIQUEIRA NETO et al., 2010). A redução do revolvimento do solo, a utilização de cobertura com material orgânico e a estrutura em rotação de culturas, favorecem a maior entrada de biomassa ao sistema, e conseqüentemente aumentando os estoques de carbono do solo, podendo proporcionar benefícios ao ambiente edáfico (BENBI et al., 2015).

Esses benefícios são promovidos por uma série de fatores, a saber: proteção física dos compostos orgânicos contra a decomposição microbiana, proporcionada pela oclusão do carbono em agregados; e a proteção química dos compostos, por meio da interação destes com os minerais e cátions do solo, o que dificulta a oxidação microbiana (SIQUEIRA NETO et al., 2010).

Muitos estudos já foram realizados demonstrando os benefícios da implantação deste sistema de manejo sob condições específicas, com destaque para os aspectos relacionados aos atributos químicos do solo (PEREIRA et al., 2010; SCHIAVO et al., 2011; BELL & MOORE, 2012; AZIZ et al., 2013; LOSS et al., 2014 a). Alguns atributos edáficos têm sido utilizados como indicadores de qualidade do solo, mensurando o impacto da mudança do uso da terra ao longo do tempo. Dentre eles, destacam-se a matéria orgânica do solo (MOS) (acúmulo, proteção ou origem) e a agregação (estabilidade, gênese ou vias de formação), salientando sempre a estreita correlação que existe entre ambos.

2.7. Indicadores de Qualidade do Solo

O intenso revolvimento no preparo do solo, a falta de cobertura sobre a superfície do solo e não obediência na capacidade de uso das terras, podem culminar em redução de sua qualidade, compreendida, em resumo, como sua capacidade de manter uma produção de modo sustentável (COSTA et al., 2006). Para Doran & Parkin (1994), a qualidade do solo relaciona-se com a capacidade deste sustentar a produtividade biológica, preservando a qualidade do ambiente e promovendo a saúde da flora e da fauna, abrangendo a concepção de qualidade do alimento e segurança alimentar e nutricional.

Do exposto, indicadores de qualidade do solo são, portanto, atributos mensuráveis que indicam a capacidade do solo de sustentar e promover a qualidade ambiental, podendo ser classificados em físicos, químicos e biológicos (MURPHY et al., 2006). Todavia, somente por meio de um conjunto de indicadores edáficos e suas interações, é possível monitorar e avaliar o impacto dos diferentes sistemas manejo e condições ambientais sobre a qualidade do solo (LIMA et al., 2013).

O primeiro indicador de qualidade do solo observado nas primeiras áreas de produção agrícola sob plantio direto foram as minhocas. Esta observação é apontada por Paulino Motter e Herlon Goelzer de Almeida, autores do livro *“Plantio direto: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira”* (MOTTER & ALMEIDA, 2015) numa passagem do engenheiro agrônomo Cícero Bley que merece ser reproduzida:

“A minhoca foi o primeiro indicador biológico da correção do processo agrícola. A minhoca descia no solo até uns 20 centímetros, abrindo trincheiras. Elas ficavam enroladas e esperavam passar aquela agressão maluca de revolvimento do solo com grade. Quando a agressão passava, elas voltavam e apareciam nas palhas. Era uma festa quando o campo tinha minhoca. Mostrava que o cara estava correto, fazendo um plantio direto correto (...)”

Na ocasião da escolha do indicador mais apropriado a integrar um índice de qualidade do solo, alguns aspectos devem ser levados em consideração, tais como (DORAN & PARKIN, 1996): i) facilidade de medição; ii) sensibilidade a mudanças de manejo e clima; iii) economicamente viável; e iv) eficiente para explicar os processos do ecossistema e os limites claros entre condições de sustentabilidade e não sustentabilidade. Dentre os indicadores existentes, a MOS e a agregação podem ser considerados eficientes indicadores na avaliação da qualidade do solo, devido a elevada sensibilidade a modificações proporcionadas pelas ações antrópicas que ambos apresentam.

2.8. Agregação, Vegetação e Matéria Orgânica do Solo: Interações

Os agregados constituem-se em um conjunto coerente de partículas do solo com forma e tamanho definidos, comportando-se como uma unidade estrutural (BOCHNER et al., 2008). Six et al. (2002) propuseram duas origens para macroagregados do solo, de acordo com o processo que os produziu: estruturas criadas por engenheiros do ecossistema (minhocas, formigas e cupins) e ainda estabilizados por uma microagregação secundária; e uma aglomeração de microagregados microbianos em estruturas macroagregadas maiores. Outros estudos diferenciam as estruturas por padrões morfológicos (BULLOCK et al., 1985), além das vias de formação (PULLEMAN et al., 2005; BATISTA et al., 2013).

O tipo de vegetação é um dos fatores considerados importantes na formação dos agregados, principalmente pela ação mecânica das raízes ou pela excreção de substâncias com ação cimentante e, indiretamente, fornecendo nutrientes à fauna do solo (BRONICK & LAL, 2005). A grande quantidade de fitomassa proveniente das plantas de cobertura se decompõe, aumentando a atividade microbiana, o acúmulo de nutrientes e MOS sobre a superfície do solo, e conseqüentemente, favorece o aumento da formação e estabilidade dos agregados do solo (LOSS et al., 2011).

Dentro da família *Poaceae* (gramíneas), as espécies mais comuns para a utilização como plantas de cobertura em SPD são: Milheto (*Pennisetum glaucum*), Sorgo (*Sorghum bicolor*), Braquiária (*Brachiaria spp.*), Aveia (*Avena spp.*), entre outras. As gramíneas por apresentarem um sistema radicular fasciculado, adicionam carbono ao solo mediante rizodeposição e morte das raízes, auxiliando para que haja aumento de matéria orgânica, contribuindo para a formação dos agregados (VELOSO, 2018).

Para a família *Fabaceae*, (leguminosas), Veloso (2018), destaca as seguintes espécies: Crotalária (*Crotalaria juncea* L. e *Crotalaria spectabilis*), Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), Feijão Guandu (*Cajanus cajan*), Lablab (*Dolichos lablab* L.). As leguminosas elevam os teores de nitrogênio no solo, pois realizam associações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio (FBN), possibilitando uma maior produção de fitomassa. Porém, são menos eficientes no processo de formação de agregados quando comparadas as gramíneas.

Em síntese, a estruturação do sistema de manejo com diversidade de espécies vegetais pode contribuir para a melhoria das propriedades físicas do solo, e que para as condições edafambientais das regiões subtropical e tropical do Brasil, espécies de gramíneas de verão (DENARDIN et al., 2019) e leguminosas fixadoras de N, são vitais para viabilizar o SPD.

Em estudos desenvolvidos por Salton et al. (2008) no bioma Cerrado, os autores verificaram que a formação e manutenção da agregação do solo em condições de vegetação natural foram semelhantes às observadas sobre rotação lavoura-pastagem em ciclos de dois anos, ou mesmo em áreas com pastagem permanente com gramíneas, devido à elevada influência do sistema radicular, porém apenas os macroagregados apresentaram relação com os teores de carbono no solo.

A MOS é composta por diferentes frações em diferentes estádios de decomposição, substâncias húmicas e compostos carbonizados, associados ou não a fração inorgânica, além dos organismos vivos, resíduos de plantas e animais. Diversos autores destacam a MOS como o indicador chave na mensuração da qualidade do solo, em função da elevada susceptibilidade e sensibilidade as alterações proporcionadas pelas ações antrópicas (CHERUBIN et al., 2015). Nos solos tropicais a MOS representa um dos principais componentes responsáveis pela manutenção da qualidade do solo.

O processo de formação de agregados apresenta uma relação intrínseca com a MOS. Compostos orgânicos são considerados os principais agentes de cimentação das partículas do solo e, ao mesmo tempo, o próprio agregado promove maior oclusão da MOS, possibilitando o seu acúmulo (BORGES et al., 2015). Ou seja, os agregados do solo protegem fisicamente o carbono da mineralização acentuada promovida pela alteração do uso ou intensificação do preparo, favorecendo sua manutenção ou estoque. Portanto, os agregados do solo podem possivelmente atuar como um “reservatório” de matéria orgânica, evidenciando assim o seu potencial uso como indicador da qualidade de áreas submetidas a diferentes sistemas de manejo.

2.9. Agregação: Vias de Formação

No ambiente edáfico, as partículas primárias do solo organizam-se em unidades compostas, formadas a partir de interações entre processos físicos, químicos ou biológicos, sendo então chamados de agregados do solo, e este fenômeno é definido como agregação (LEPSCH, 2016). Estas interações complexas resultam em agregados com formas, tamanhos e arranjos bastante variáveis. A presença de agregação no solo é fundamental para o bom funcionamento do mesmo, pois confere ao ambiente edáfico diversas propriedades benéficas. Propriedades relativas à aeração, permeabilidade, taxas de infiltração, retenção de água e nutrientes ao solo, atividade microbiana edáfica, bem como no sequestro de carbono (MERGEN JUNIOR, 2016).

Todos esses efeitos supracitados têm implicações diretas e indiretas sobre a dinâmica da MOS e ciclagem de nutrientes (VENTURA, 2017). Entretanto, as alterações que ocorrem na agregação do solo oriundas do tipo de sistema de manejo adotado, podem resultar também em mudanças nas vias de formação dos agregados, especialmente, na via biogênica (LOSS et al., 2014 b), justamente por ser a mais rápida na formação de agregados como os oriundos das fezes produzidas por indivíduos da fauna do solo (MELLO et al., 2008; BATISTA et al., 2013).

A agregação é dividida em duas etapas, à saber: aproximação e cimentação das partículas, as quais ocorrem de forma simultânea no sistema edáfico. Tanto a aproximação quanto a cimentação, são fenômenos que resultam da ação de íons ou moléculas oriundas de processos físicos, químicos e biológicos do solo (RIBEIRO et al., 2012), como já mencionado anteriormente.

Esses processos estão relacionados às vias de formação dos agregados, nas quais os agregados formados a partir da ação dos processos físicos e químicos são chamados de fisiogênicos (via fisiogênica), e biogênicos (via biogênica) quando formados por maior ação dos processos biológicos (LOSS et al., 2014 b). A diferenciação entre fisiogênicos e biogênicos é realizada de acordo com a sua gênese, conforme padrões morfológicos (BATISTA et al.,

2013; LOSS et al., 2014 b) estabelecidos por Bullock et al. (1985) e posteriormente adaptados por Pulleman et al. (2005):

a) Agregados fisiogênicos – Identificados por apresentarem formas angulares ou prismáticas e estão diretamente relacionadas à aproximação das partículas unitárias do solo em função dos ciclos de umedecimento e secagem, e pela ação dos agentes cimentantes do solo (matéria orgânica ou óxi-hidróxidos de ferro e alumínio); e

b) Agregados biogênicos – Apresentam formas arredondadas e estão relacionadas às vias biológicas de formação, assim como, pela passagem pelo sistema intestinal da macrofauna do solo, especialmente minhocas, somada a ação cimentante de exsudados das raízes.

Diversos estudos realizados com agregados formados por diferentes vias demonstram diferenças nos teores de carbono orgânico, bem como, nas características químicas e físicas em agregados biogênicos quando comparados aos agregados fisiogênicos (PULLEMAN et al., 2005; CÉCILLON et al., 2009; SILVA NETO et al., 2010; BATISTA et al., 2013; LOSS et al., 2014 b; SILVA NETO et al., 2016; ROSSI et al., 2016; FERNANDES et al., 2017; LOSS et al., 2017; VENTURA et al., 2018; MERGEN JUNIOR et al., 2019 a,b; PINTO et al., 2019; MELO et al., 2019; SCHULTZ et al., 2019; MOURA et al., 2019; FERREIRA et al., 2020).

Em geral, esses estudos têm verificado que os agregados formados pela via biológica, possuem maiores teores de nutrientes, bem como, auxiliam na proteção física da MOS (sequestro de C) e geralmente possuem elevada estabilidade física em meio aquoso (SILVA NETO et al., 2010) quando comparados aos formados pela via fisiogênica. Sendo usados como potenciais indicadores de qualidade de solo, em virtude de sua sensibilidade aos diferentes sistemas de uso e manejo do solo (LOSS et al., 2014 b).

Ao avaliarem o impacto da atividade de minhocas na formação de agregados e incorporação de MOS em distintos sistemas de cultivo em longo prazo, Pulleman et al. (2005) observaram que os agregados biogênicos encontrados em pastagem plantada e sistema de plantio orgânico apresentaram teores mais elevados de carbono orgânico total (COT) em comparação aos agregados fisiogênicos. Contudo padrão inverso foi observado para os agregados em sistema plantio convencional (SPC). De modo geral, os resultados de Pulleman et al. (2005) demonstraram que as minhocas contribuem para a proteção física da MOS contra a decomposição microbiana.

Analisando três áreas cobertas com vegetação nativa nos Alpes da França, Cécillon et al. (2009) observaram que os teores de carbono orgânico particulado (COP) em agregados biogênicos foram numericamente (mas não significativamente) maiores do que os verificados em agregados fisiogênicos, evidenciando a importância dos processos biogênicos para o equilíbrio e manutenção do solo (LOSS et al., 2014 b).

Em estudo envolvendo agregados biogênicos e fisiogênicos de diferentes classes de solos do estado da Paraíba sob cana-de-açúcar e pastagem de capim braquiária, Silva Neto et al. (2010) verificaram que os biogênicos apresentaram maior estabilidade física em peneiramento úmido e melhor qualidade dos atributos químicos em comparação aos agregados fisiogênicos, como um reflexo da atividade biológica na gênese dos agregados biogênicos. Os autores sugerem a importância dos agregados biogênicos como indicadores de qualidade do solo.

Avaliando a influência física e biológica na gênese de agregados dos solos do Cerrado, assim como, para verificar quais os fatores do ambiente que determinam as características dos agregados em área de produção sob sistema integração lavoura-pecuária em duas épocas do ano (seca e chuvosa), Batista et al. (2013) constataram que os agregados biogênicos apresentaram correlação positiva com teores de COT, COP e com a macrofauna edáfica, principalmente minhocas. Os autores concluíram que os diferentes tipos de agregados formados, além de

apresentarem características morfológicas distintas, também apresentam diferenças quanto às características químicas, com ênfase maior para os biogênicos.

A abundância isotópica de ^{13}C e ^{15}N foi estudada em agregados biogênicos e fisiogênicos em áreas sob SPD, SPC, pastagem e floresta secundária no estado do Paraná-BR, por Loss et al. (2014 b). Os autores quantificaram maiores valores de ^{13}C e ^{15}N em agregados fisiogênicos. Os resultados de Loss et al. (2014 b) corroboraram com os encontrados por Jouquet et al. (2009), que também observaram maiores valores de ^{13}C e menores teores de COT em agregados fisiogênicos. Os autores sugerem que o conteúdo de ^{13}C e ^{15}N refletem a importância ecológica da fauna edáfica, e, portanto, podem ser eficientes indicadores para diferenciar agregados biogênicos de fisiogênicos.

Com o objetivo de identificar as vias de formação de agregados biogênicos, intermediários e fisiogênicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo no município de Seropédica-RJ, sob diferentes sistemas de manejo agroecológico, Rossi et al. (2016) verificaram que os sistemas de manejo não produziram efeito sobre a proporção média de cada classe de agregados, e que a contribuição relativa dos agregados intermediários para a massa total de agregados foi superior à dos demais. Entretanto, não foram constatadas diferenças significativas nos teores de COT e nos atributos químicos entre as classes de agregados avaliadas.

Analisando a proporção relativa e os teores de carbono orgânico das diferentes vias de formação dos agregados em fragmentos da Mata Atlântica em diferentes estádios de regeneração, Fernandes et al. (2017) verificaram que os agregados biogênicos encontravam-se em menor proporção porém com maiores teores de carbono orgânico total em comparação aos agregados fisiogênicos e intermediários. Os autores concluíram que os agregados biogênicos têm potencial para serem utilizados como indicadores de qualidade do solo para ambientes estruturados.

Ao avaliarem os efeitos de diferentes fontes e doses de nutrientes nas vias de formação de agregados e caracterização química dos mesmos, Mergen Junior et al. (2019 a) constataram que os agregados formados pela via biogênica favoreceram o aumento dos teores de N, P, K, Mg e COT em relação aos formados pela via fisiogênica. Os agregados biogênicos se mostraram como indicadores de qualidade sensíveis às mudanças decorrentes da adição de dejetos suínos ao solo como via de fornecimento de nutrientes para as plantas e potenciais sítios de acúmulo de nutrientes no solo.

Em estudo realizado com diferentes sistemas de manejo agroecológico no município de Seropédica-RJ, objetivando quantificar o C mineralizável em agregados biogênicos e fisiogênicos, Pinto et al. (2019) verificaram que o SPD sob manejo agroecológico apresentou maior acúmulo de C-CO₂ entre os sistemas avaliados nos agregados biogênicos e o menor acúmulo nos agregados fisiogênicos. Os autores atribuíram esses resultados ao tipo de carbono estocado em cada tipo de agregado, na qual o carbono estocado nos agregados fisiogênicos é mais recalcitrante quando comparado com o carbono mais lábil estocado em agregados formados pela via biogênica.

O efeito da agregação biogênica na dinâmica química e estrutural em Latossolo Vermelho no município de Londrina-PR após nove contínuos anos de aplicação de dejetos líquidos de suínos e esterco de galinha, foi avaliado por Melo et al. (2019). Os autores verificaram que a agregação biogênica aumentou a disponibilidade de nutrientes, neutralizou a acidez e aumentou o conteúdo de matéria orgânica. Tais benefícios mencionados dependeram diretamente do teor de nutrientes do adubo e da entrada de carbono fornecida pelo estrume.

No estudo supracitado, os autores a partir de imagens de microtomografia computadorizada por raios-X observaram que os agregados biogênicos apresentaram maior proporção de poros com diâmetro superior a 0,10 mm, estando diretamente relacionados a atividade da fauna e crescimento do sistema radicular (MELO et al., 2019). Segundo Liang et

al. (2018), agregados que apresentam poros maiores que 0,10 mm ajudam a proteger a matéria orgânica contra o ataque microbiano em solos sem perturbação antrópica, podendo assim explicar parte do incremento da matéria orgânica encontrada nos agregados biogênicos do estudo de Melo et al. (2019).

Com o objetivo de avaliar a influência da vegetação arbórea e de gramíneas nas vias de formação, estabilidade, atributos químicos e frações de carbono orgânico de agregados em Argissolo Vermelho-Amarelo no município de Seropédica-RJ, Schultz et al. (2019) verificaram que os agregados biogênicos, principalmente os provenientes das áreas sob espécies arbóreas, proporcionaram maior proteção e estabilização do carbono. Os autores concluíram que os agregados biogênicos podem funcionar como potenciais reservatórios de nutrientes.

Com o objetivo de determinar os teores de fósforo total e de suas formas e frações em agregados biogênicos, intermediários e fisiogênicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes sistemas de manejo agroecológico em Seropédica-RJ, Moura et al. (2019) quantificaram maiores teores de P em diferentes frações nos agregados fisiogênicos em comparação aos agregados da via biogênica na maioria das áreas estudadas. Para os autores, as concentrações de P encontradas nos diferentes tipos de agregados evidenciaram o importante papel das vias de formação na avaliação da qualidade do solo.

Ao avaliar a proporção relativa (massa) das diferentes vias de formação de agregados em áreas de SPD com diferentes tempos de instalação e floresta em duas estações do ano em Guaíra-PR, Ferreira et al. (2020) observaram que a proporção de agregados fisiogênicos foi superior a de intermediários e biogênicos em SPD23 (fase de manutenção) em ambas as estações, com padrão inverso para a área de floresta. Os autores justificaram tais resultados à falta de mobilização do solo e aos efeitos cumulativos da pressão de máquinas agrícolas sobre a superfície do solo.

Entretanto, pouca atenção tem sido dada as vias de formação dos agregados, talvez em função da dificuldade em sua identificação, desconhecimento da dinâmica e a sua posição na matriz do solo (SILVA NETO et al., 2010).

3. CAPÍTULO I

ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS, VIAS DE FORMAÇÃO E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM AGREGADOS DE ÁREAS SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO NO CERRADO MINEIRO

3.1. RESUMO

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil, e uma das estratégias para sua utilização mais sustentável é o emprego do sistema de plantio direto (SPD), que pode promover uma série de modificações nos atributos do solo, com destaque para a agregação. Os agregados podem ser classificados como fisiogênicos (formados por processos físicos e químicos) e biogênicos (formados pelos agentes biológicos). Os agregados desempenham várias funções no solo, com destaque para a proteção do carbono orgânico, sendo considerados o principal núcleo de todos os mecanismos de sequestro de carbono no solo. Desta maneira, os objetivos deste estudo foram avaliar i) a influência do sistema de manejo do solo na estabilidade dos agregados e a proporção da agregação biogênica; e ii) as possíveis associações entre as vias de formação dos agregados e a dinâmica da matéria orgânica do solo. Foram avaliadas três áreas manejadas e uma área de referência sem ação antrópica, totalizando quatro diferentes áreas amostrais, a saber: SPD com 6 anos (SPD6), SPD com 18 anos (SPD18), sistema plantio convencional com 20 anos (SPC20) e uma área de Cerrado (AC). Em cada área amostral foram coletadas cinco pseudorepeticções (torrões) nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m de profundidade. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e, posteriormente, submetidas a peneiramento, sendo utilizado um conjunto de peneiras de 9,7, 8,0 e 4,0 mm de malha, sendo selecionados somente os agregados retidos nos intervalos 9,7-8,0 e 8,0-4,0. Nos agregados de 4,0 mm foram realizadas as análises de carbono e nitrogênio total, estabilidade dos agregados, através do diâmetro médio ponderado via úmida (DMPVU) e via seca (DMPVS) e caracterização dos atributos químicos; nos agregados de 8,00 mm quantificou-se o percentual de cada tipo de agregado, e posteriormente foram realizadas as análises de carbono orgânico total (COT), e os fracionamentos da MOS: químico: fração ácido fúlvico (C-FAF), ácido húmico (C-FAH) e humina (C-FHUM), físico granulométrico: carbono orgânico particulado (COP) e associado aos minerais (COAM) e físico densimétrico, carbono da fração leve livre (CFLL). Nas duas camadas, foram quantificados os maiores valores de DMPVU e DMPVS nos agregados dos sistemas SPD18 e SPD6. Em relação aos tipos de agregados, houve predominância de agregados fisiogênicos em todas as áreas para as duas camadas avaliadas. Porém a proporção de agregados biogênicos aumentou com a diminuição da intensidade de manejo. Para o COT e C-FAH, entre os sistemas de manejo, somente para os agregados biogênicos do SPD18 e SPD6 apresentaram os maiores teores de carbono em comparação aos agregados biogênicos do SPC20 na camada de 0,00-0,05 m. Para COP e CFLL, entre as vias de formação foram verificadas diferenças, na qual os agregados biogênicos dos sistemas SPC20 e SPD18 para COP, e SPC20, SPD6 e SPD18 para CFLL apresentaram os maiores teores de carbono quando comparados aos agregados fisiogênicos. O menor revolvimento do solo em sistemas agrícolas conservacionistas (sistema plantio direto) favorece a agregação biogênica e que agregados biogênicos afetam a dinâmica da MOS, promovendo a proteção e estabilização, e conseqüentemente, o acúmulo das diferentes frações da MOS.

Palavras-chave: Sequestro de carbono. Agregados biogênicos. Sistema plantio direto.

3.2. ABSTRACT

The Cerrado is the second largest biome in Brazil, is one of the strategies for its more sustainable use and the use of the No-tillage system (NTS), which can promote a series of changes in soil attributes, especially aggregation. Aggregate can be classified as physicogenic (formed by physical and chemical processes) and biogenic (formed by biological agents). Aggregates play several functions in the soil, with emphasis on organic carbon protection, being considered the main core of all soil carbon sequestration mechanisms. Thus, the objectives of this study were to assess i) the influence of the soil management system on the stability of aggregates and the proportion of biogenic aggregation; and ii) the possible associations between the pathways of aggregate formation and the dynamics of organic matter in the soil. Three managed areas and one reference area without anthropic action were evaluated, totaling four different sample areas: NTS with 6 years (NTS6), NTS with 18 years (NTS18), conventional tillage system with 20 years (CTS20) and an area of Cerrado (CA). In each sample area five pseudoreplicates were collected in layers of 0.00-0.05 and 0.05-0.10 m. After collecting the samples, they were air-dried and later submitted to sieving, using a set of 9.7, 8.0, and 4.0 mm mesh sieves, and only the aggregates retained in the 9.7-8.0 and 8.0-4.0 intervals were selected. In the 4.0 mm aggregates analyses of carbon and total nitrogen, stability of the aggregates through the weighted mean diameter via wet (WMDVW) and dry (WMDVD) and characterization of chemical attributes were performed; in the 8.00 mm aggregates the percentage of each type of aggregate was quantified, and later analyses of total organic carbon (TOC) and the MOS fractionations were performed: chemical: fulvic acid fraction (C-FAF), humic acid (C-HAF) and humine (C-HUMF), particle physics: particulate organic carbon (POC) and associated with minerals (OCAM) and densimetric physics, free light fraction carbon (FLFC). In both layers, the highest values of WMDVW and WMDVD were quantified in the aggregates of the NTS18 and NTS6 systems. Regarding the types of aggregates, there was a predominance of physicogenic aggregates in all areas for the two layers evaluated. However, the proportion of biogenic aggregates increased with a decrease in management intensity. For TOC and C-HAF, among the management systems, only for the biogenic aggregates of NTS18 and NTS6 presented the highest carbon levels compared to the biogenic aggregates of CTS20 in the 0.00-0.05 m layer. For POC and FLFC, between the formation pathways differences were verified, in which the biogenic aggregates of the CTS20 and NTS18 systems for POC, and CTS20, NTS6 and NTS18 for FLFC presented the highest carbon contents when compared to the physicogenic aggregates. The smaller soil turnover in conservationist agricultural systems (no-tillage system) favors biogenic aggregation and that biogenic aggregates affect the dynamics of the MOS, promoting protection and stabilization, and consequently, the accumulation of the different fractions of the MOS.

Keywords: Carbon sequestration. Biogenic aggregates. No-till system.

3.3. INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, sendo verificados diferentes formas de uso das terras que são fortemente afetadas pelas condições ambientais e atividades antropogênicas (LOSS et al., 2013). Por vezes os solos não oferecem condições adequadas para o desenvolvimento das culturas, sendo que estas podem ser modificadas por diferentes sistemas de cultivos. Neste aspecto, uma das estratégias mais eficientes para a melhoria dos atributos edáficos e utilização sustentável dessas áreas é a adoção de sistemas de manejo do solo dentro dos preceitos da agricultura conservacionista, tais como o sistema plantio direto (SPD).

A eficiência do SPD no Cerrado, decorre da redução ou supressão de mobilização do solo; da diversificação de espécies, em estrutura de rotação, consorciação ou sucessão de culturas; e da cobertura permanente do solo por meio de retenção de resíduos orgânicos ou plantas de cobertura (OPARA-NADI, 1993).

O reflexo positivo da adoção do SPD em áreas de produção agrícola no Cerrado quando comparado ao sistema plantio convencional (SPC), pode ser observado através da melhoria dos atributos do solo, com destaque para o estado de agregação e o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS). Esses atributos são considerados importantes indicadores de qualidade do solo, e quando avaliados em conjunto, a partir de suas interações é possível monitorar e mensurar o impacto dos diferentes sistemas de manejo.

Os agregados desempenham várias funções no solo, e estão diretamente envolvidos nos mecanismos de estabilização da matéria orgânica em solos sob sistemas de manejo sem ou com o mínimo de revolvimento possível da camada superficial. Nesse sentido, a agregação do solo é considerada o principal núcleo de todos os mecanismos de sequestro de carbono no solo (BLANCO-CANQUI & LAL, 2004; CÉCILLON et al., 2009).

Os agregados do solo podem ser classificados como fisiogênicos (formados por processos físicos e químicos) e biogênicos (formados pela ação dos agentes biológicos) (LOSS et al., 2014). A diferenciação entre fisiogênicos e biogênicos é realizada de acordo com sua gênese ou vias de formação, a partir de padrões morfológicos (BULLOCK et al., 1985; PULLEMAN et al., 2005; BATISTA et al., 2013).

Diversos estudos demonstram diferenças nos teores de MOS e de suas respectivas frações nos diferentes tipos de agregados, com destaque especial para os formados pelos agentes biológicos do solo (macrofauna e raízes, principalmente). Os agregados biogênicos, em geral, possuem maiores teores de nutrientes, bem como, auxiliam na proteção física da MOS (sequestro de carbono) e geralmente possuem elevada estabilidade física em meio aquoso (SILVA NETO et al., 2010) quando comparado aos fisiogênicos.

A partir destes relatos, a agregação biogênica tem sido apontada como um potencial indicador da qualidade edáfica, justamente por sua formação e sua maior sensibilidade frente aos diferentes sistemas de uso e manejo do solo (PULLEMAN et al., 2005; SILVA NETO et al., 2010; LOSS et al., 2014, 2017; SILVA NETO et al., 2016; MELO et al., 2019). Desta maneira, os objetivos deste estudo foram avaliar i) a influência do sistema de manejo do solo na estabilidade dos agregados e a proporção da agregação biogênica; e ii) as possíveis associações entre as vias de formação dos agregados e a dinâmica da matéria orgânica do solo.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo

O estudo foi realizado no Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) *campus* Uberaba-MG, localizado no Município de Uberaba, entre as coordenadas 19°39'10,17" de latitude Sul e 47°58'15,65" de longitude Oeste, com altitude variando entre 790 e 819 m, em áreas experimentais com diferentes sistemas de manejo e coberturas vegetais (Figura 1).

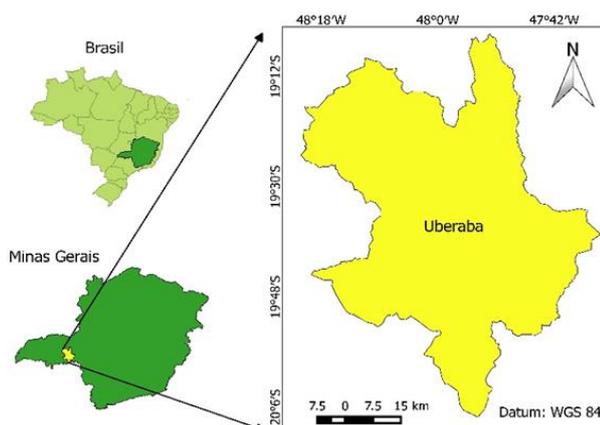


Figura 1. Localização do município de Uberaba-MG. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

O clima da região é tropical quente (Aw), segundo classificação de Köppen, com estação chuvosa no verão e seca no inverno, apresentando inverno frio e seco. Os valores médios de precipitação pluviométrica e temperatura da região de estudo nos últimos 20 anos (CLIMATE-DATA.ORG, 2019) encontram-se apresentados na Figura 2.

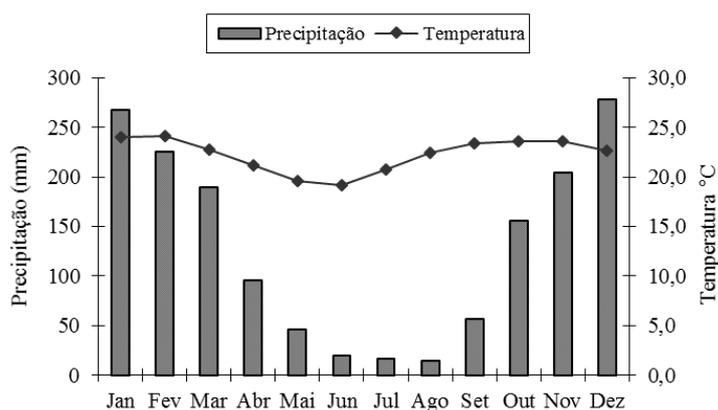


Figura 2. Variação da média mensal da precipitação e da temperatura durante o ano do estudo. **Fonte:** Dados climáticos obtidos no site climate-data.org. (2019), e elaborado pelo autor.

O solo das áreas experimentais foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), textura média (Santos et al., 2018), que estava sendo cultivado em sistema de plantio convencional (SPC), quando foi implantado o sistema de plantio direto (SPD) em duas das áreas, com diferentes tempos de instalação, em uma área 6 anos e outra com 18 anos.

3.4.2. Histórico da área experimental

Para este estudo, foram avaliadas três áreas manejadas (sistemas de manejo) e uma área de referência (área de Cerrado) sem ação antrópica, totalizando quatro diferentes áreas amostrais analisadas em delineamento inteiramente casualizado (DIC), a saber: área com sistema de plantio direto implantado há 6 anos (SPD6) com culturas de cobertura (milheto, braquiária e crotalária) rotacionadas com culturas anuais (milho, soja e feijão); área com sistema de plantio direto implantado há 18 anos (SPD18) semelhante a anterior; área com sistema de plantio convencional consolidado há 20 anos (SPC20) com o plantio de culturas anuais (milho, soja e feijão); e área de Cerrado (AC). A descrição detalhada das áreas é apresentada na Tabela 1. O manejo das plantas de cobertura é conduzido de forma similar entre os SPDs, diferenciando-se apenas quanto ao tempo de instalação. Em todas as áreas manejadas, a cultura anual que antecedeu o momento da coleta das amostras foi a soja (*Glycine max* L.).

Tabela 1. Histórico, descrição e localização das áreas de estudo.

Sistema de manejo	Descrição
SPC20	Área total de 6,75 ha, 819 m de altitude, localizada entre a latitude 19°39'10,17" (S) e longitude 47°58'15,65" (O), área com 20 anos sob sistema de plantio convencional.
SPD6	Área total de 0,21 ha, 797 m de altitude, localizada entre a latitude 19°39'22,69" (S) e longitude 47°57'25,86" (O), área em transição para o SPD.
SPD18	Área total de 0,21 ha, 798 m de altitude, localizada entre a latitude 19°39'21,81" (S) e longitude 47°57'26,82" (O), área em transição para o SPD, área em fase de consolidação do SPD.
AC	Área total de 10,2 ha, 790 m de altitude, localizada entre a latitude 19°39'38,89" (S) e longitude 47°57'45,06" (O), área preservada, sem qualquer tipo de atividade exploratória, utilizada com referencial.

Na área sob SPC20, de maneira geral, são efetuadas duas gradagens, sendo uma aradora e a outra niveladora, sempre antecedendo o plantio da cultura anual (milho, soja e feijão). Nas áreas sob SPD6, SPD18 e SPC20 a adubação das culturais anuais é realizada segundo recomendações de Ribeiro et al. (1999), da seguinte forma: para o milho tem-se aplicado 400 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-16 no momento da semeadura (adubação de base), com 140 kg ha⁻¹ de N e 80 kg ha⁻¹ de K em cobertura, parcelados aos 20 e 40 dias após plantio; para a soja utilizam-se 200 kg ha⁻¹ do formulado 00-20-15 + 2,5% de Zn + 2,5% de Mn na ocasião da semeadura (adubação de base), correspondendo respectivamente a 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 60 kg ha⁻¹ de K₂O, 5 kg ha⁻¹ de Zn e 5 kg ha⁻¹ de Mn, com a inoculação da semente; e para o feijão aplica-se 350 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-16 + 0,5% de Zn na adubação de base.

3.4.3. Amostragem e separação dos agregados

A amostragem foi realizada em janeiro de 2019. Em cada área amostral foram coletadas cinco pseudorepetições (torrões) nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m. Após a coleta as amostras foram secas ao ar e posteriormente submetidas a peneiramento, sendo utilizado um conjunto de peneiras de 9,7, 8,0 e 4,0 mm de malha, sendo selecionados somente os agregados retidos nos intervalos 9,7-8,0 e 8,0-4,0. Deste modo, os agregados foram separados em duas classes de tamanho, 4,0 e 8,0 mm, e posteriormente analisados.

3.4.4. Análises realizadas nos agregados de 4,0 mm

a) Estabilidade de agregados

A estabilidade dos agregados foi representada pelo diâmetro médio ponderado dos agregados calculado pelos métodos de determinação via úmida (VU) e via seca (VS) (TEIXEIRA et al. 2017). Ambos os métodos partem do mesmo princípio, sendo utilizadas 25 g dos agregados de 4,0 mm colocados na parte superior de um conjunto de peneiras de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; e 0,105 mm de diâmetro de malha.

Para o método VU, os agregados inicialmente colocados na peneira de 2,0 mm foram umedecidos com atomizador, posteriormente o conjunto de peneiras foi submetido à tamisação vertical via úmida por 15 minutos, a 42 oscilações por minuto em aparelho de Yooder. Transcorrido esse tempo, o material retido em cada peneira foi retirado, separado com jato d'água, colocado em placas de Petri previamente pesadas e identificadas, e levado à estufa a 105 °C por 24 horas.

No método VS, o conjunto de peneiras foi submetido à agitação vertical por 15 minutos com potência de 30% em agitador do tipo ROTAP de velocidade controlada e movimentos rotatórios com vibração. Ao término do tempo, o material retido em cada peneira foi retirado com auxílio de pincel e colocado em placa de Petri previamente pesadas e identificadas, e levado à estufa a 105 °C por 24 horas.

Após 24 horas, as placas de ambos os métodos foram retiradas da estufa e pesadas para obtenção da massa de agregados em cada classe de tamanho do conjunto de peneiras. A partir da massa de agregados foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados. O valor do DMP em cada método foi obtido de acordo com a seguinte equação:

$$\text{DMP (VU e VS)} = \sum x_i y_i \quad (1)$$

Em que: i = intervalo de classe: $8,0 \geq x > 2,0$ mm, de $2,0 \geq x > 1,0$ mm, de $1,0 \geq x > 0,5$ mm, de $0,5 \geq x > 0,25$ mm e de $0,25 \geq x > 0,105$ mm; x_i = é o diâmetro do centro de classe (mm); y_i = é a razão entre a massa de agregados dentro da classe (i) e a massa total de agregados, ambas corrigidas quanto à umidade.

b) Preparo das amostras dos agregados de 4,0 mm

Os agregados de 4,0 mm foram destorroados e passados por peneira de 2,0 mm de malha, obtendo-se assim a fração terra fina seca ao ar (TFSA), utilizada para a caracterização dos atributos químicos e quantificação do carbono e nitrogênio total.

c) Caracterização dos atributos químicos

Realizada a partir de TFSA para a determinação dos valores de pH e os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , K^+ , Na^+ , P e H+Al. O pH em água foi determinado potenciométricamente na suspensão solo-líquido de 1:2,5 m:v, com tempo de contato de 1 hora com agitação da suspensão antes da leitura. Para a determinação dos cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+}), foi realizada a extração com solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L^{-1} (proporção solo:solução 1:10 m:v) sendo os teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ e o Ca^{2+} determinados por complexometria. O Mg^{2+} foi obtido pela diferença. O Al^{3+} foi determinado por titulação com solução de hidróxido de sódio (NaOH) $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ como titulante e azul de bromotimol como indicador.

Para a determinação de sódio e potássio trocáveis (Na^+ e K^+) e fósforo disponível foi utilizada a solução de ácido clorídrico (HCl) $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e (H_2SO_4) $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ (proporção solo:solução 1:10 m:v), na qual Na^+ e K^+ foram determinados por fotometria de chama. O P disponível foi determinado por colorimetria (630 nm) após a redução do complexo fosfomolibdico com ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), na presença de sal de bismuto.

A acidez potencial do solo (H+Al) foi extraída com solução de acetato de cálcio ($\text{C}_4\text{H}_6\text{CaO}_4$) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, ajustado a pH 7,0 (proporção solo:solução 1:15 m:v) e determinada por titulação com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ e fenolftaleína como indicador (TEIXEIRA et al., 2017).

d) Quantificação dos teores de carbono e nitrogênio total

O carbono e o nitrogênio total dos agregados de 4,0 mm do solo foram determinados pelo método de combustão a seco, em analisador elementar Perkin Elmer 2400 CHN, a análise foi realizada utilizando $1,1 \pm 0,1 \text{ mg}$ de amostras pesadas em micro balança acoplada ao aparelho (NELSON & SOMMERS, 1996; SATO et al., 2014).

3.4.5. Análises realizadas nos agregados de 8,0 mm

a) Identificação das vias de formação dos agregados

Não foi realizada a separação das vias de formação nos agregados de 4,0 mm, em virtude dessa classe de agregados apresentar tamanho inviável para a identificação com bases nos padrões morfológicos estabelecidos por Bullock et al. (1985), e posteriormente adaptados por Pulleman et al. (2005). Sendo assim, os agregados de 8,0 mm foram levados para o laboratório e observados sob lupa e separados à mão em frações morfológicas, identificando-se duas classes: fisiogênicos e biogênicos.

A diferenciação foi feita através de padrões morfológicos, obedecendo aos seguintes critérios: agregados biogênicos - aqueles em que é possível a visualização de formas arredondadas, providas do trato intestinal dos indivíduos da macrofauna do solo, principalmente Oligochaeta (minhocas) ou aqueles em que é possível visualizar a presença e atividade de raízes; e agregados fisiogênicos - definidos por aqueles que apresentaram formas angulares resultantes da interação entre carbono, argila, cátions e ciclos de umedecimento e secagem do solo.

Após a identificação, foi determinado o percentual, contribuição relativa (massa) de cada tipo de agregado (fisiogênicos e biogênicos) de cada área amostral. Em sequência, os mesmos foram destorroados e passados por peneira de 2,0 mm de malha, obtendo-se assim a fração terra fina seca ao ar (TFSA) para as análises de matéria orgânica.

b) Carbono orgânico total

O carbono orgânico total (COT) do solo foi determinado via oxidação úmida da matéria orgânica com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) $0,167 \text{ mol L}^{-1}$, em meio sulfúrico, e quantificado por titulação usando solução de sulfato ferroso amoniacal ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ como titulante e ferroin como indicador (YEOMANS & BREMNER, 1988).

c) Fracionamento químico da MOS

As substâncias húmicas foram separadas em três frações: fração ácidos fúlvicos (FAF), fração ácidos húmicos (FAH) e humina (HUM), sendo utilizada a técnica de solubilidade diferencial estabelecida pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas conforme técnica adaptada e apresentada por Benites et al. (2003). Para tal, foi pesado uma massa de TFSA igual a 1,0 g, submetendo ao contato com 20 mL de NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ por 24 horas.

A separação entre o extrato alcalino (EA = C-FAF + C-FAH) e o resíduo (C-HUM) foi feita por centrifugação a 5000 rpm por 20 minutos. Seguiu a mais uma lavagem com a mesma solução anterior, juntando-se o extrato com o anteriormente obtido, resultando em volume final de 40 mL. O resíduo foi retirado dos tubos da centrífuga, acondicionados em placa de Petri e seco a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ (até atingir massa constante). O pH do EA foi ajustado a 1,0 ($\pm 0,1$) com H_2SO_4 20%, seguido de decantação por 18 horas. O precipitado (C-FAH) foi separado da fração solúvel (C-FAF) por filtragem e ambos os volumes aferidos a 50 mL, com água destilada.

A quantificação do carbono orgânico nas frações C-FAF e C-FAH foi feita usando-se alíquotas de 5,0 mL de extrato, 1,0 mL de dicromato de potássio $0,042 \text{ mol L}^{-1}$ e 5,0 mL de H_2SO_4 concentrado, em bloco digestor a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ (30 min) e titulação com sulfato ferroso amoniacal $0,0125 \text{ mol.L}^{-1}$. No resíduo seco em estufa, foi determinado o C-HUM, adicionando-se 5,0 mL de dicromato de potássio $0,1667 \text{ mol.L}^{-1}$ e 10,0 mL de H_2SO_4 concentrado, em bloco digestor a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ (30 min) e titulação com sulfato ferroso amoniacal $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ e indicador ferroin (YEOMANS & BREMNER, 1988).

A partir dos resultados obtidos, foi calculado a porcentagem em que cada fração representa no COT, a saber:

- 1) Porcentagem da fração ácido fúlvico: $\%CAF = ((C-FAF/COT)*100)$;
- 2) Porcentagem da fração ácido húmico: $\%CAH = ((C-FAH/COT)*100)$;
- 3) Porcentagem da fração húmica: $\%CHUM = ((C-FHUM/COT)*100)$;
- 4) Porcentagem do somatório das substâncias húmicas: $\%CSH = (\%CAF + \%CAH + \%CHUM)$;
- 5) Porcentagem da fração de carbono não humificado: $\%CNH = (100 - \%CSH)$.

d) Fracionamento físico granulométrico da MOS

Para o fracionamento granulométrico da MOS, 20 g de TFSA e 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) foi agitado durante 15 horas em agitador horizontal (CAMBARDELLA & ELLIOTT, 1992). A seguir, a suspensão foi passada em peneira de 53 μm com auxílio de jato de água. O material retido na peneira, que consiste no carbono orgânico particulado (COP) associado à fração areia, foi seco em estufa a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, quantificado em relação a sua massa, moído em gral de porcelana e analisado em relação ao teor de COT segundo Yeomans & Bremner (1988). O material que passar pela peneira de 53 μm , que consiste no carbono orgânico associado aos minerais (COAM) das frações silte e argila, foi obtido por diferença entre o COT e COP.

e) Fracionamento físico densimétrico da MOS

As frações leves da MOS foram obtidas pelo procedimento proposto por Sohi et al. (2001). As frações leves foram extraídas do solo por meio de uma solução de NaI a uma densidade de $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,02$). Os métodos tradicionais de separação da fração leve, normalmente, utilizam soluções com densidade ajustada para $2,0 \text{ g cm}^{-3}$, porém neste estudo foi adotada uma densidade menor por dois motivos: i) permite o uso de soluções inorgânicas, que oferecem vantagens em termos de segurança e conveniência sobre as orgânicas; ii) evita a contaminação da fração leve com partículas minerais que apresentam densidade de $2,0 \text{ g cm}^{-3}$.

Para isto, foram pesados 5g de TFSA em frascos de centrífuga de 50 mL sendo adicionados 35 mL de NaI. Os frascos foram agitados manualmente por 30 segundos de maneira que as frações orgânicas menos densas fiquem na superfície da solução. A seguir, as amostras foram centrifugadas a 18.000 rpm por 15 minutos, em temperatura de $18 \text{ }^\circ\text{C}$, a fim de promover a sedimentação das partículas minerais do solo. A fração orgânica sobrenadante presente na solução (fração leve livre) foi succionada juntamente com a solução de NaI, e imediatamente separada por filtração a vácuo (Sistema Asséptico Sterifil, 47 mm – Millipore) com filtros de fibra de vidro (47 mm de diâmetro; 2 microns – Whatman tipo GF/A), previamente pesados.

As frações coletadas foram lavadas com água destilada, visando eliminar o excesso de NaI presente na fração e no filtro. A fração orgânica, juntamente com o filtro, foi posteriormente seca a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, pesada e macerada em almofariz. A determinação do carbono orgânico da fração leve livre (CFLL) da MOS também foi realizada segundo Yeomans & Bremner (1988).

3.4.6. Análises estatísticas

Os resultados referentes aos sistemas de manejo foram analisados quanto à normalidade dos resíduos e homocedasticidade dos dados pelos testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente, e quando não atendidos os pressupostos dos testes mencionados acima, os mesmos foram transformados pelo teste de Box Cox.

Posteriormente, os resultados de estabilidade e atributos químicos foram analisados como delineamento inteiramente casualizado (DIC). Já os resultados envolvendo os diferentes tipos morfológicos de agregados foram analisados como DIC em esquema de parcelas subdivididas (3 sistemas de manejo e 2 vias de formação), sendo submetidos à análise de variância com aplicação do teste F e os valores médios comparados entre si pelo Teste de Tukey.

A comparação dos sistemas de manejo, em relação a área de referência foi realizada pelo Teste de Dunnett como análise complementar para as variáveis relacionadas às vias de formação dos agregados. Todos os testes foram realizados a 5% de probabilidade de erro utilizando o programa R 3.3.1.

Também foi realizada a análise de componentes principais (ACP), sendo utilizada para reduzir as dimensões dos dados e, conseqüentemente, facilitar a análise por meio do gráfico do círculo de correlações (HERLIHY & MCCARTHY, 2006), fornecendo com isso uma melhor interpretação do padrão dos sistemas de manejo em função dos atributos avaliados por meio do programa PAST, e análise de correlação de Pearson pelo programa Excel.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. Carbono e nitrogênio total, estabilidade e atributos químicos dos agregados de 4,0 mm

Em síntese, o carbono total (CT) e diâmetro médio ponderado (DMP) foram os atributos que apresentaram maior variabilidade entre os sistemas de manejo (Tabela 2). Nos agregados da camada de 0,00-0,05 m foram verificados os maiores teores de CT nos sistemas SPD18 e SPD6 quando comparados aos agregados do SPC20. Para o nitrogênio total (NT) não foram observadas diferenças entre os sistemas de manejo para nenhuma camada avaliada (Tabela 2).

Tabela 2. Carbono total, nitrogênio total e diâmetro médio ponderado dos agregados de 4,0 mm em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no

Sistemas	0,00-0,05 m			
	CT	NT	DMP	
	g kg ⁻¹		VU	VS
SPC20	12,23 b	0,96 ^{ns}	1,23 c	2,40 b
SPD6	13,67 a	1,01 ^{ns}	3,79 a	2,94 ab
SPD18	14,85 a	1,08 ^{ns}	3,35 b	3,28 a
CV.%	6,6	9,2	11,43	17,4
AC	29,73	1,49	3,90	3,21
Sistemas	0,05-0,10 m			
	CT	NT	DMP	
	g kg ⁻¹		VU	VS
SPC20	11,45 ^{ns}	0,91 ^{ns}	1,23 b	1,80 c
SPD6	12,55 ^{ns}	0,86 ^{ns}	2,90 a	2,43 b
SPD18	12,36 ^{ns}	0,85 ^{ns}	2,30 a	3,01 a
CV.%	8,6	11,4	21,8	13,2
AC	24,18	1,33	3,96	4,10

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo (Teste de Tukey a 5% de probabilidade) e ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; CT: Carbono total; NT: Nitrogênio total; DMP: Diâmetro médio ponderado; VU: Via úmida; VS: Via seca; e CV.%: Coeficiente de variação.

Na comparação entre os sistemas, em SPD18 e SPD6 foram observados os maiores valores de diâmetro médio ponderado (DMP) em ambos os métodos de determinação, via úmida (DMPVU) e via seca (DMPVS) para as duas camadas (Tabela 2).

De maneira geral, o intenso revolvimento da camada superficial do solo em áreas de plantio convencional, prejudica o equilíbrio do solo por romper os agregados e expor a matéria orgânica protegida ao processo de oxidação. O revolvimento também é indiretamente responsável pela aceleração dos processos erosivos, visto que, ao promover a destruição dos agregados, como consequência ocorre a redução da infiltração de água, favorecendo assim a erosão hídrica (SKARABOTO et al., 2018).

Agregados estáveis contribuem para a melhoria das propriedades físicas do solo, tais como porosidade, aeração, condutividade hidráulica e resistência à erosão. Já os agregados não estáveis, quando em superfície, tendem a desaparecer e dispersar-se quando expostos ao impacto das gotas de chuva (ASSIS & BAHIA, 1998). Diante disto, a adoção de sistemas de manejo que promovam incremento ou manutenção do carbono orgânico ao ambiente edáfico

pode favorecer o aumento da estabilidade dos agregados, refletindo na melhoria da qualidade estrutural do solo (COUTINHO et al., 2010), principalmente nas camadas superficialmente manejadas.

Diversos estudos no Cerrado mineiro vêm demonstrando que o SPD pode alterar a qualidade do solo (COUTINHO et al., 2010; ANGELINI et al., 2012; PEREIRA et al., 2012; TORRES et al., 2015 a,b; TORRES et al., 2019), à medida que os cultivos se sucedem, em virtude da contínua adição de matéria orgânica decorrente da adição dos resíduos vegetais, da ação benéfica das raízes das plantas e da proteção oferecida à superfície do solo (ANDRADE et al., 2018).

Os resultados de estabilidade dos agregados corroboram aos observados por Portella et al. (2012) em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto e plantio convencional implantados por mais de 20 anos. Os autores justificaram tais resultados ao aumento da mobilização do solo resultando em diminuição da sua estabilidade. Avaliando a qualidade física de um Latossolo Vermelho-Amarelo do semiárido mineiro cultivado nos sistemas de plantio direto (SPD) e convencional (SPC) com diferentes coberturas vegetais, Sales et al. (2016), verificaram que o SPD manteve a agregação do solo semelhante à mata nativa, enquanto que o SPC reduziu a agregação e o aporte de carbono no solo.

Ao avaliar os impactos de diferentes sistemas de uso e manejo do solo, bem como do tempo de adoção dos mesmos, sobre a agregação de um Latossolo Amarelo Distrófico do Cerrado piauiense, Silva et al. (2018) observaram que o maior tempo de adoção nos sistemas de plantio direto, seguido da pastagem e eucalipto favoreceram a agregação do solo, entretanto no plantio convencional houve redução da agregação.

Do exposto, é possível inferir sobre os resultados do presente estudo que a menor mobilização do solo associado aos maiores teores de CT nos SPDs na primeira camada, podem estar relacionados aos elevados valores de DMPVU e DMPVS verificados (Tabela 2). Visto que a formação de agregados estáveis está diretamente relacionada a estabilização do carbono no solo (TISDALL & OADES, 1982; OADES, 1984), com contribuição efetiva das frações mais humificadas da MOS.

Quanto à caracterização dos atributos químicos, em resumo, Ca^{2+} e P foram os mais influenciados pelos diferentes sistemas de manejo (Tabela 3). Na camada de 0,05-0,10 m foram verificados os maiores teores de Ca^{2+} em agregados do SPC20. Para o P foi observado padrão semelhante para as duas camadas avaliadas. Para os demais atributos químicos não foram verificadas diferenças estatísticas entre os sistemas de manejo do solo. Contudo, para os agregados da área SPC20 na camada de 0,05-0,10 m foram verificados valores elevados da soma de bases (S), influenciando assim na maior saturação por bases (V) (Tabela 3) para a mesma camada.

Tabela 3. Caracterização dos atributos químicos dos agregados de 4,0 mm em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no município de Uberaba-MG.

Sistemas	0,00-0,05 m								
	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	P	H+Al	S	T	V
	H_2O	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	mg dm^{-3}			$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$		%
SPC20	5,36 ^{ns}	1,16 ^{ns}	0,86 ^{ns}	58 ^{ns}	47 a	3,71 ^{ns}	2,20 ^{ns}	5,91 ^{ns}	34 ^{ns}
SPD6	5,61 ^{ns}	1,39 ^{ns}	0,90 ^{ns}	50 ^{ns}	14 b	3,35 ^{ns}	2,50 ^{ns}	5,86 ^{ns}	41 ^{ns}
SPD18	5,35 ^{ns}	1,30 ^{ns}	0,85 ^{ns}	47 ^{ns}	10 b	3,86 ^{ns}	2,23 ^{ns}	6,08 ^{ns}	36 ^{ns}

Continua...

Continuação da **Tabela 3.**

Sistemas	0,00-0,05 m								
	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	H+Al	S	T	V
	H ₂ O	cmol _c dm ⁻³		mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³		%	
CV.%	3,3	18,8	25,6	26,7	37,8	13,9	13,3	9,4	7,9
AC	5,34	0,40	0,54	111	5	7,57	1,20	8,77	14
Sistemas	0,05-0,10 m								
	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	H+Al	S	T	V
	H ₂ O	cmol _c dm ⁻³		mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³		%	
SPC20	5,38 ^{ns}	1,08 a	0,82 ^{ns}	55 ^{ns}	38 a	3,64 ^{ns}	2,07 a	5,72 ^{ns}	36 a
SPD6	5,23 ^{ns}	0,61 b	0,75 ^{ns}	37 ^{ns}	10 b	3,71 ^{ns}	1,50 b	5,22 ^{ns}	29
SPD18	5,10 ^{ns}	0,63 b	0,64 ^{ns}	37 ^{ns}	10 b	4,09 ^{ns}	1,39 b	5,48 ^{ns}	25 b
CV.%	4,7	34,2	31,8	26,1	38,0	13,7	14,5	8,9	17,3
AC	5,45	0,34	0,50	72	1,00	6,67	1,02	7,69	14

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo (Teste de Tukey, a 5% de probabilidade) e ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; e CV.%: Coeficiente de variação.

3.5.2. Vias de formação e matéria orgânica do solo dos agregados de 8,00 mm

a) Contribuição relativa

De modo geral, houve predominância de agregados fisiogênicos em comparação aos biogênicos em todos os sistemas de manejo e na AC para as duas camadas avaliadas (Figura 3). Esses resultados são corroborados pelos encontrados por Pulleman et al. (2005), Batista et al. (2013), Loss et al. (2014). Ao avaliar o efeito de culturas subsequentes em SPD na fauna edáfica e nas características químicas e físicas de agregados coletados em duas épocas do ano em áreas de Mata Atlântica, Batista (2015) verificou que os agregados fisiogênicos foram encontrados em maior proporção que os intermediários e biogênicos em todas as áreas nas duas épocas de amostragem. Os resultados verificados por Batista (2015), corroboram os observados neste estudo.

Entretanto, quando se analisa as áreas manejadas sob sistema plantio convencional e direto, observa-se que a proporção de agregados biogênicos aumenta com a diminuição da intensidade de manejo, reduzindo assim a diferença percentual entre as vias de formação (Figura 3). Vale ressaltar que a estabilidade total dos agregados de 4,0 mm (Tabela 2) apresentou padrão semelhante ao observado para as vias de formação, na qual quanto menor a intensidade de manejo do solo maior o grau de estabilidade dos mesmos. A gênese de agregados está diretamente relacionada ao sistema de manejo adotado, em virtude do manejo podem ocorrer modificações na agregação, por este ser um atributo sensível a alterações no ambiente edáfico e podendo resultar em mudanças nas vias de formação dos agregados (PULLEMAN et al., 2005), e como verificado no presente estudo na estabilidade dos agregados.

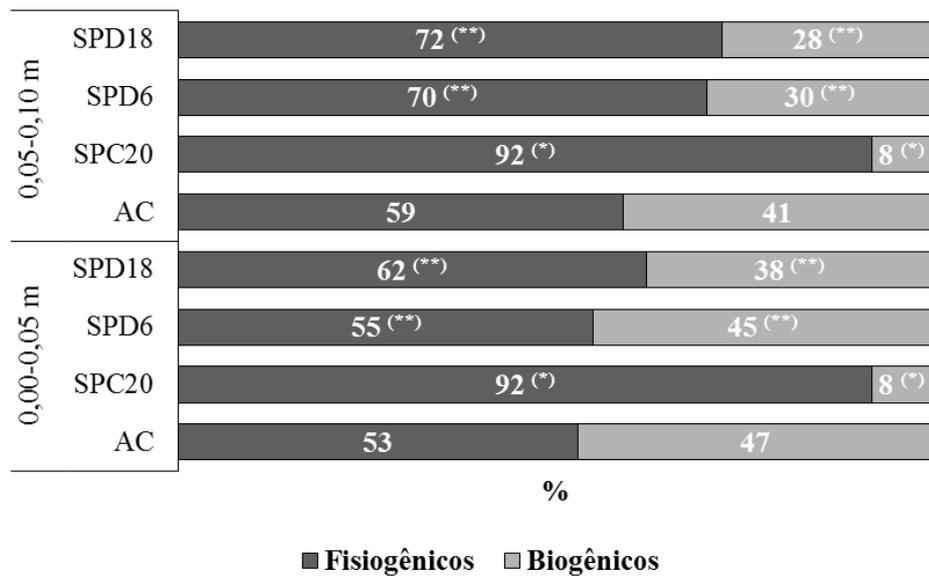


Figura 3. Distribuição, em porcentagem, de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG. Comparação dos sistemas de manejo em relação à área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, $p < 0,05$. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; e SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos.

Ao avaliarem a proporção relativa das diferentes vias de formação de agregados em áreas com histórico de aplicações de dejetos líquidos suínos e cama sobreposta de suínos em SPD, Mergen Junior et al. (2019 b) verificaram que a adição de dejetos suínos em SPD aumentou a formação de agregados biogênicos. Para os autores, a manutenção dos resíduos orgânicos sobre a superfície do solo, a ausência de revolvimento do mesmo e a adição dos dejetos de suínos proporcionaram condições físicas e químicas favoráveis à fauna do solo, que são os principais responsáveis na formação de agregados biogênicos (CÉCILLON et al., 2009; BATISTA et al., 2013; MERGEN JUNIOR et al., 2019 b).

Ao contrário do observado no presente estudo, Schultz et al. (2019) estudando a influência da vegetação arbórea e de gramíneas nas vias de formação de agregados em Argissolo Vermelho-Amarelo verificaram predomínio de agregados biogênicos em relação aos fisiogênicos na área de vegetação arbórea. Os autores concluíram que o maior aporte de matéria orgânica associado ao sombreamento das árvores beneficiou a atuação da fauna do solo, a qual influencia diretamente na formação e estabilização da agregação do solo, favorecendo a via de formação dos agregados biogênicos.

No que tange as vias de formação, é possível inferir que o manejo do solo possui ação determinante na gênese dos diferentes tipos de agregados, e que sistemas conservacionistas tendem a favorecer a via de formação biogênica, reduzindo a proporção relativa entre agregados fisiogênicos e biogênicos. Quanto à área de Cerrado, foram verificadas as menores diferenças percentuais entre as vias de formação para as duas camadas avaliadas. Em áreas sob vegetação nativa, devido a estabilidade do ambiente em questão, pressupõem-se maior ação dos agentes biológicos (macrofauna e flora) responsáveis pela formação dos agregados de origem biogênica.

Na comparação dos sistemas de manejo em relação a área de referência, verificou-se que tanto para os agregados fisiogênicos quanto para os biogênicos as médias dos sistemas

SPD6 e SPD18 foram iguais à AC (Figura 3). Reforçando a hipótese de que sistemas conservacionistas influenciam nas vias de formação dos agregados, e quando manejados corretamente, tendem a alcançar proporções relativas de agregados semelhantes às encontradas em ambientes mais estáveis e equilibrados.

b) Carbono orgânico total

Para os teores de carbono orgânico total (COT) foi verificada uma maior variabilidade entre os sistemas de manejo em comparação as vias de formação dos agregados, em especial na camada de 0,00-0,05 m (Figuras 4 e 5). Na comparação entre os sistemas de manejo, somente nos agregados biogênicos das áreas de sistema plantio direto (SPD18 e SPD6, respectivamente) foram quantificados os maiores teores de COT em relação aos agregados biogênicos do sistema plantio convencional (SPC20) na camada de 0,00-0,05 m (SPD18>SPD6>SPC20) (Figura 4). Entre os tipos de agregados, não foram verificadas diferenças para o COT em nenhuma camada avaliada (Figuras 4 e 5).

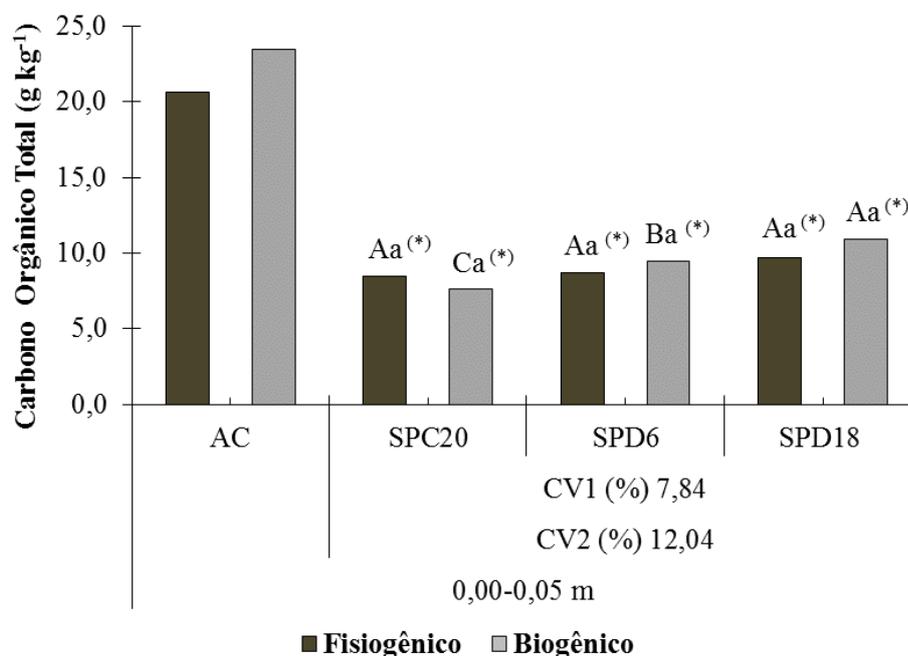


Figura 4. Carbono orgânico total de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo no bioma Cerrado, Uberaba-MG, na camada 0,00-0,05 m. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema de manejo (Teste de Tukey, $p < 0,05$). Comparação dos sistemas de manejo em relação à área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, $p < 0,05$. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo.

Ao contrário do observado no estudo para COT, entre as vias de formação de agregados, diversos outros trabalhos têm evidenciado diferenças nos teores de carbono orgânico entre os tipos de agregados, em ênfase a agregação biogênica (PULLEMAN et al., 2005; SILVA NETO

et al., 2010; BATISTA et al., 2013; LOSS et al., 2014; BATISTA, 2015; SILVA NETO et al., 2016; LOSS et al., 2017; FERNANDES et al., 2017; VENTURA et al., 2018; MERGEN JUNIOR et al., 2019 a; SCHULTZ et al., 2019). De acordo com os estudos de Bossuyt et al. (2005) o conteúdo de COT em agregados biogênicos foi 22% maior que o observado em agregados fisiogênicos. O enriquecimento de carbono em estruturas biogênicas indica seletiva alimentação do material orgânico por organismos edáficos, elevando as concentrações de carbono nesses agregados (PULLEMAN et al., 2005; BATISTA, 2015).

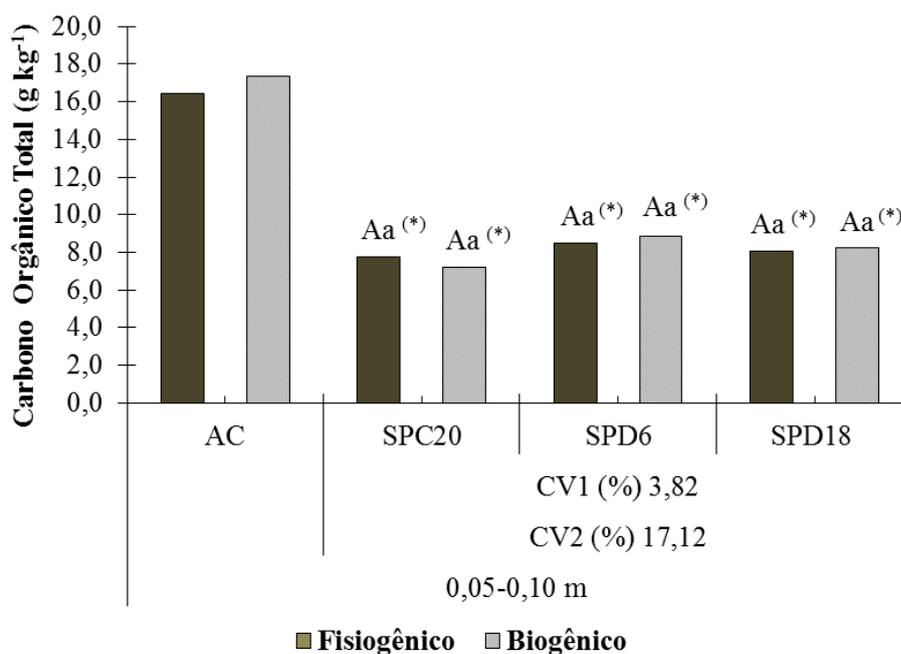


Figura 5. Carbono orgânico total de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo no bioma Cerrado, Uberaba-MG, na camada 0,05-0,10 m. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema de manejo (Teste de Tukey, $p < 0,05$). Comparação dos sistemas de manejo em relação à área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, $p < 0,05$. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; e CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo.

Os maiores teores de COT nos agregados biogênicos nas áreas sob sistema plantio direto na primeira camada na comparação entre os sistemas indicam maior acúmulo e manutenção do carbono do solo em estruturas biogênicas. Ao ser manejado corretamente, o SPD pode beneficiar as entradas e a preservação do carbono no ambiente edáfico quando comparado ao SPC, que expõem mais a MOS aos processos microbianos e reações enzimáticas. Para Loss et al. (2009), as práticas conservacionistas adotadas no SPD também contribuem para a manutenção da umidade do solo e evitar a exposição direta da luz solar a superfície do mesmo, diminuindo assim a temperatura do ambiente edáfico e consequentemente as taxas de mineralização da MOS.

Os resultados encontrados evidenciam a participação significativa da agregação biogênica na preservação do COT em áreas agricultáveis submetidas a diferentes sistemas de manejo. De acordo com Silva Neto et al. (2010) os agregados biogênicos contribuem mais efetivamente na proteção da MOS, reduzindo suas taxas de decomposição e elevando o potencial de sequestro de carbono pelo solo. Visto que, a agregação do solo é considerada o principal núcleo de todos os mecanismos de sequestro de carbono no solo (BLANCO-CANQUI & LAL, 2004; CÉCILLON et al., 2009).

Quando se analisa o COT dos sistemas de manejo em comparação a área de referência, observa-se que os sistemas estudados apresentaram médias diferentes e inferiores independentemente do tipo de agregado (Figuras 4 e 5). Batista (2015) verificou padrão similar na comparação de seus tratamentos à área de vegetação nativa. A autora justificou tais resultados de COT as características ainda herdadas pelas áreas experimentais, antes manejadas sob sistema não conservacionista por mais de 20 anos. Fato esse que pode auxiliar a justificar os resultados encontrados no estudo para o COT na camada de 0,05-0,10 m (Figura 5).

c) Carbono orgânico das frações húmicas da MOS

Os teores de carbono orgânico das frações húmicas da MOS são apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6. De maneira similar ao observado para o COT, as maiores variações dessas frações foram verificadas na camada de 0,00-0,05 m, principalmente para o carbono orgânico das frações ácido húmico (C-FAH) e humina (C-FHUM).

Não foram observadas diferenças na comparação entre os sistemas de manejo ou entre as vias de formação para o carbono orgânico da fração ácido fúlvico (C-FAF) nas duas camadas avaliadas (Tabela 4). A ausência de significância de C-FAF observada pode estar relacionada a essa fração ser muito solúvel e de maior labilidade, assim sua dinâmica de formação e decomposição é mais acelerada em relação as outras frações húmicas da MOS (FONTANA et al., 2006).

Tabela 4. Carbono orgânico da fração ácido fúlvico (C-FAF) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Sistemas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPC20	1,23 ^{NS ns (*)}	1,43 ^{NS ns (*)}	1,37 ^{NS ns (*)}	1,30 ^{NS ns (*)}
SPD6	1,49 ^{NS ns (*)}	1,51 ^{NS ns (*)}	1,60 ^{NS ns (*)}	1,61 ^{NS ns (*)}
SPD18	1,60 ^{NS ns (*)}	1,71 ^{NS ns (*)}	1,70 ^{NS ns (*)}	1,43 ^{NS ns (*)}
CV1 %	18,8		16,3	
CV2 %	23,9		23,7	
AC	4,28	4,59	3,39	3,73

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (Teste de Tukey, a 5% de probabilidade) e ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade. Comparação dos sistemas de manejo em relação a área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, p<0,05. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo.

Para o C-FAH foram verificadas diferenças entre os sistemas de manejo na primeira camada, na qual nos agregados biogênicos dos sistemas SPD18 e SPD6 foram quantificados

maiores teores dessa fração quando comparados aos agregados biogênicos do SPC20 (Tabela 5). Tais resultados indicam que os agregados biogênicos desses sistemas estão acumulando mais carbono em estruturas orgânicas mais recalcitrantes do que os agregados biogênicos do SPC20. Segundo Loss et al. (2014) tais resultados também demonstram o efeito negativo da aração e gradagem em SPCs, que destrói os agregados, individualizando as partículas minerais e expondo a matéria orgânica antes quimicamente protegida dentro dos mesmos aos processos de mineralização. Esses processos reduzem o conteúdo de carbono orgânico total e das substâncias húmicas.

Ainda referente aos resultados de C-FAH, as maiores concentrações dessa fração em agregados biogênicos das áreas de SPD podem ser explicadas pelas condições ambientais favoráveis a atividade biológica, aumentando a intensidade do processo de humificação, contribuindo assim para a formação de substâncias húmicas com maior grau de condensação, como os ácidos húmicos, nesses agregados (STEVENSON, 1994).

Tabela 5. Carbono orgânico da fração ácido húmico (C-FAH) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Sistemas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPC20	1,90 ^{NS ns (*)}	1,63 ^{B ns (*)}	1,27 ^{NS ns (**)}	1,47 ^{NS ns (*)}
SPD6	2,13 ^{NS ns (**)}	2,43 ^{A ns (*)}	2,05 ^{NS ns (**)}	2,04 ^{NS ns (*)}
SPD18	2,48 ^{NS ns (**)}	2,49 ^{A ns (*)}	1,95 ^{NS ns (**)}	2,16 ^{NS ns (*)}
CV1 %	16,5		18,4	
CV2 %	20,5		28,8	
AC	2,71	3,81	1,97	2,97

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (Teste de Tukey, a 5% de probabilidade) e ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade. Comparação dos sistemas de manejo em relação a área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, p<0,05. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo.

Em relação ao C-FHUM, foram observadas diferenças entre as vias de formação nos sistemas com menor intensidade de manejo (Tabela 6). Nos agregados biogênicos do sistema SPD18 foram quantificados teores mais levados de C-FHUM quando comparados aos agregados da via fisiogênica para as duas camadas avaliadas, enquanto para o sistema SPD6 foi observado padrão similar somente na primeira camada. Esses resultados corroboram aos encontrados por Loss et al. (2014), Mergen Junior et al. (2014), Fernandes et al. (2017) e Ventura et al. (2018) na comparação entre as vias de formação.

Em estudos em fragmentos da Mata Atlântica em diferentes estágios de regeneração Fernandes et al. (2017) observaram que os agregados biogênicos apresentaram maiores teores de C-FHUM em comparação aos agregados fisiogênicos e intermediários. Os autores justificaram tais dados a presença da macrofauna edáfica, em especial as minhocas, visto que elas têm ação direta sobre a ciclagem biogeoquímica no solo (JOUQUET et al., 2006) afetando positivamente a ecologia do processo de humificação (FERNANDES et al., 2017). Fato este também observado no estudo pela maior concentração de C-FHUM em agregados formados pelos agentes biológicos do solo em áreas de SPD.

Tabela 6. Carbono orgânico da fração humina (C-FHUM) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Sistemas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPC20	3,53 ^{NS ns (*)}	4,33 ^{NS ns (*)}	3,22 ^{NS ns (*)}	3,80 ^{NS ns (*)}
SPD6	3,57 ^{NS b (*)}	4,57 ^{NS a (*)}	3,10 ^{NS ns (*)}	3,80 ^{NS ns (*)}
SPD18	4,02 ^{NS b (*)}	5,36 ^{NS a (*)}	3,33 ^{NS b (*)}	4,44 ^{NS a (*)}
CV1 %	17,0		15,2	
CV2 %	16,2		25,7	
AC	9,94	10,66	6,94	7,65

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (Scott-Knott, a 5% de probabilidade) e ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade. Comparação dos sistemas de manejo em relação a área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, p<0,05. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo.

Quando os teores de carbono orgânico das frações húmicas dos sistemas de manejo foram comparados com a área de referência, SPD6 e SPD18 (0,00-0,05 m) e SPC20, SPD6 e SPD18 (0,05-0,10 m) não apresentaram diferenças entre as médias para a fração C-FAH em agregados fisiogênicos (Tabela 5). Com relação aos agregados biogênicos, foram observadas médias diferentes e inferiores dos sistemas de manejo à AC para a mesma fração. Na comparação entre os sistemas de manejo (Tabela 5), como mencionado anteriormente, nos agregados biogênicos dos sistemas SPD18 e SPD6 foram quantificados maiores valores médios e diferenças nos agregados do SPC20 para C-FAH na camada de 0,00-0,05 m.

Em todos os sistemas foram verificadas médias inferiores em relação à AC para C-FAF e C-FHUM independentemente do tipo de agregado nas duas camadas avaliadas (Tabelas 4 e 6). A partir do exposto é possível inferir que para C-FAH a agregação biogênica foi mais eficiente para detectar variações significativas nos teores de carbono dessa fração, tanto na comparação entre os sistemas de manejo como na comparação dos sistemas a área de Cerrado.

Em termos de porcentagem das frações húmicas da MOS, o %CHUM representa a maior parte do COT nos diferentes tipos de agregados em todas as áreas avaliadas (Figuras 6 e 7), variando de 41 a 57% do COT. Este efeito pode estar relacionado com a acumulação de compostos orgânicos com elevada estabilidade química e peso molecular resultantes da decomposição e humificação da MOS (STEVENSON, 1994).

As frações %CAF e %CAH apresentaram as menores proporções relativas ao COT nas diferentes vias de formação em todas as áreas. Essas frações são menos estáveis quando comparadas a fração humina, sendo submetidas à processos de polimerização e mineralização, tendo sua composição consequentemente diminuída (LEITE et al., 2003).

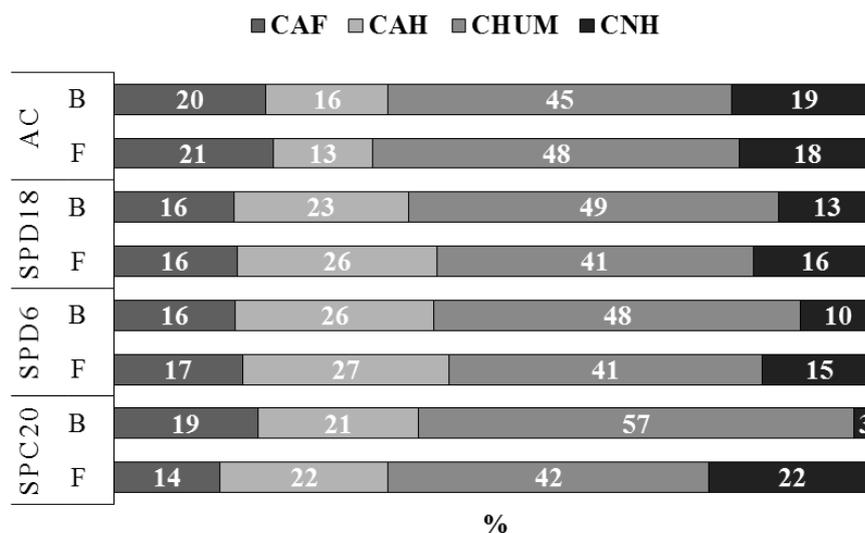


Figura 6. Distribuição, em porcentagem, de carbono das frações húmicas em agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo no bioma Cerrado, Uberaba-MG, na camada 0,00-0,05 m. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; %CAF: Porcentagem de carbono da fração ácido fúlvico; %CAH: Porcentagem de carbono da fração ácido húmico; %CHUM: Carbono da fração humina; %CNH: Porcentagem de carbono não humificado; F: Fisiogênicos; e B: Biogênicos.

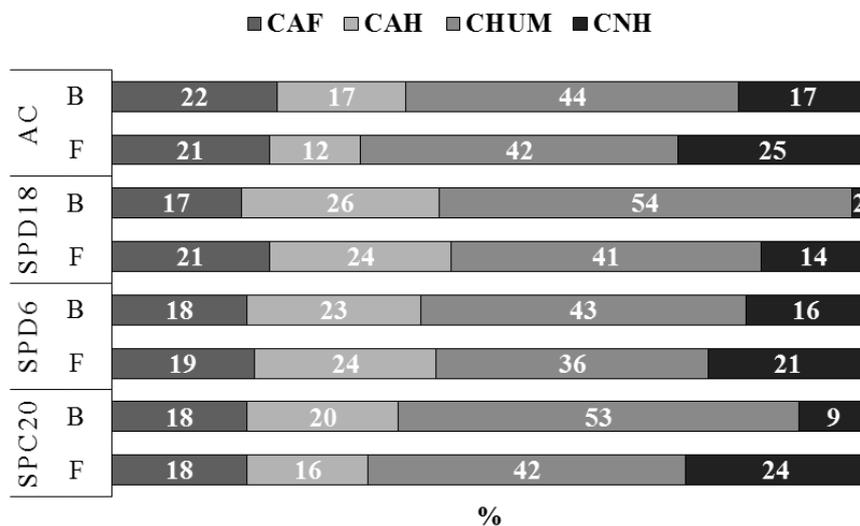


Figura 7. Distribuição, em porcentagem, de carbono das frações húmicas em agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo no bioma Cerrado, Uberaba-MG, na camada 0,05-0,10 m. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; %CAF: Porcentagem de carbono da fração ácido fúlvico; %CAH: Porcentagem de carbono da fração ácido húmico; %CHUM: Carbono da fração humina; %CNH: Porcentagem de carbono não humificado; F: Fisiogênicos; e B: Biogênicos.

Entretanto, quando se analisa a distribuição do carbono nas três frações húmicas da MOS e na fração não humificada (%CNH), verificou-se de modo geral, que os dois tipos de agregados apresentaram a maior parte do COT na fração humificada (%CSH), sendo que nos agregados biogênicos a %CSH foi em comparação aos fisiogênicos (Figuras 6 e 7). Estes resultados corroboram aos verificados por Mergen Junior et al. (2014), que ao quantificar os teores de carbono das substâncias húmicas em agregados biogênicos e fisiogênicos do solo sob áreas de SPD com aplicação de dejetos líquidos de suínos e cama sobreposta de suínos, os autores também encontraram maior quantidade de carbono das frações húmicas em agregados biogênicos. A partir do exposto, pode-se inferir que os agregados biogênicos são mais eficientes em termos de proteção das substâncias húmicas, estabilidade estrutural do solo e sequestro de carbono (SILVA NETO et al., 2016).

d) Carbono orgânico das frações particuladas, associadas aos minerais e leve-livre

Os teores de carbono orgânico das frações físicas da MOS apresentaram maior variabilidade entre as vias de formação dos agregados em comparação aos sistemas de manejo avaliados, principalmente para o carbono orgânico da fração leve-livre (CFL) nas duas camadas avaliadas (Tabela 7).

Tabela 7. Carbono orgânico particulado (COP) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Sistemas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPC20	1,40 Bb (*)	2,59 NS a (*)	1,38 NS b (**)	2,50 NS a (**)
SPD6	2,13 A ns (**)	2,62 NS ns (*)	1,85 NS ns (**)	2,14 NS ns (**)
SPD18	1,93 ABb (**)	2,98 NS a (*)	1,71 NS b (**)	2,58 NS a (**)
CV1 %	17,3		19,8	
CV2 %	21,3		21,6	
AC	3,44	6,58	1,57	2,55

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (Teste de Tukey, a 5% de probabilidade) e NS Não significativo a 5% de probabilidade. Comparação dos sistemas de manejo em relação a área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, p<0,05. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo.

Para o carbono orgânico particulado (COP), na comparação entre os sistemas de manejo, somente nos agregados fisiogênicos do SPD6 quantificaram-se os maiores teores de COP em relação aos agregados fisiogênicos do SPC20 na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 7). Os agregados fisiogênicos do SPD18 apresentaram médias semelhantes aos agregados dos sistemas SPC20 e SPD6. Tais resultados são um reflexo da deposição, acúmulo e manutenção da palhada na superfície do solo, associado a mínima perturbação do ambiente edáfico em um sistema em fase inicial de transição (5-10 anos de implantação).

Em áreas de pastagem e floresta secundária, Loss et al. (2014) observaram maiores teores de COP em agregados biogênicos e fisiogênicos em comparação aos mesmos tipos de agregados em áreas de SPD e SPC. Esse padrão evidencia a importância do elevado aporte de

MOS, seja via serapilheira ou sistema radicular, para essa fração. Batista et al. (2013) verificaram que os teores de COP, em sistema de integração lavoura-pecuária, foram mais sensíveis ao manejo do que os de COT, e que a fração particulada da matéria orgânica é potencial indicadora da qualidade da MOS em razão de alterações provenientes do manejo. De acordo com Bayer et al. (2004) o acúmulo de COP representa um benefício ambiental dependendo da continuidade do sistema de preparo mínimo do solo, como o SPD.

Entre as vias de formação foram verificadas diferenças, na qual nos agregados biogênicos dos sistemas SPC20 e SPD18 foram quantificados os maiores teores de COP quando comparados a agregação fisiogênica nas duas camadas avaliadas (Tabela 7). Os maiores teores de COP em agregados biogênicos indicam predominância de material de maior labilidade (maior disponibilidade) em comparação aos agregados fisiogênicos (LOSS et al., 2014), sendo que a incorporação e manutenção desse material é favorecida em agregados biogênicos em virtude da fauna do solo e do sistema radicular das plantas, principalmente em áreas de SPD (LOSS et al., 2014; MERGEN JUNIOR et al., 2019 a).

Outros autores observaram resultados semelhantes (PULLEMAN et al., 2005; LOSS et al., 2014; BATISTA, 2015; ROSSI et al., 2016; SCHULTZ et al., 2019), sendo o COP considerado uma das frações mais lábeis da matéria orgânica, altamente sensível ao revolvimento do solo e facilmente mineralizável, caso o manejo do solo não seja conservacionista (ROSSI et al., 2016). Os resultados verificados nesse estudo representam um indicativo de que a agregação biogênica pode proporcionar maior proteção dessa fração física da matéria orgânica, tanto em áreas manejadas sob sistema convencional ou conservacionista do solo.

Em relação ao carbono orgânico associado aos minerais (COAM), na comparação entre os sistemas, nos agregados biogênicos dos sistemas SPD6 e SPD18 foram quantificados os maiores teores dessa fração em relação aos agregados do SPC20 nas duas camadas avaliadas (Tabela 8). Estes dados podem estar relacionados com a capacidade que a agregação biogênica apresenta de proteção e estabilização das frações mais lábeis da MOS, como o COP, principalmente em sistemas conservacionistas. Visto que, sistemas de manejo com mínimo ou nenhum revolvimento do solo favorecem os mecanismos de estabilização da MOS (BATISTA et al., 2013), conseqüentemente, reduzindo a emissão de CO₂ para a atmosfera.

Tabela 8. Carbono orgânico associado aos minerais (COAM) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Sistemas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPC20	7,09 ^{NS a (*)}	4,50 ^{B b (*)}	6,06 ^{NS a (*)}	4,18 ^{C b (*)}
SPD6	6,58 ^{NS ns (*)}	7,11 ^{A ns (*)}	6,64 ^{NS ns (*)}	6,72 ^{A ns (*)}
SPD18	7,89 ^{NS ns (*)}	8,19 ^{A ns (*)}	6,28 ^{NS ns (*)}	5,69 ^{B ns (*)}
CV1 %	11,2		6,6	
CV2 %	14,8		12,8	

Continua...

Continuação da **Tabela 8.**

Sistemas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
AC	17,51	17,96	13,93	14,43

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (Teste de Tukey, a 5% de probabilidade) e ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade. Comparação dos sistemas de manejo em relação a área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, p<0,05. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo.

Na comparação entre as vias de formação, foi verificado que nos agregados fisiogênicos do sistema SPC20 foram observados teores mais elevados de COAM que nos agregados biogênicos nas duas camadas avaliadas (Tabela 8). Tais resultados não corroboram aos observados por Pulleman et al. (2005), Loss et al. (2014), Batista (2015), Rossi et al. (2016), Schultz et al. (2019), na qual os autores verificam que nos agregados biogênicos ocorreram maiores teores de COAM, quando comparados com os agregados fisiogênicos.

Entretanto, os maiores teores de COAM nos agregados fisiogênicos em SPC20 nas duas camadas na comparação entre as vias, podem ser decorrentes do próprio processo de formação das frações granulométricas da MOS, pois existe uma correlação negativa no decorrer da formação dessas frações. Ou seja, para que ocorra maiores teores de COAM é necessário que a taxa de decomposição do COP seja mais rápida, para posterior associação do carbono orgânico com os minerais do solo nas frações silte e principalmente argila (FIGUEIREDO et al., 2010). No entanto, vale ressaltar que nem sempre o COAM funciona como um bom indicador do efeito do sistema de manejo adotado sobre as propriedades do solo, uma vez que alterações no estoque desse compartimento da MOS levam muitos anos para serem detectados (CARMO et al., 2012), devido sua elevada estabilidade.

Para o CFLL foi verificado os maiores teores dessa fração em agregados biogênicos do SPC20 em comparação aos agregados biogênicos dos demais sistemas na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 9). Os resultados indicam que esses agregados foram enriquecidos com a fração leve-livre da MOS em SPC20, enquanto os agregados biogênicos dos outros sistemas (SPD6 e SPD18) tiveram menor enriquecimento dessa fração. Os dados sugerem que o CFLL estocado foi ciclado mais rapidamente nos agregados biogênicos do sistema convencional quando comparado aos agregados dos sistemas conservacionistas.

Tabela 9. Carbono orgânico da fração leve-livre (CFLL) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob diferentes sistemas de manejo em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Sistemas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPC20	0,52 ^{NS} b (**)	1,86 A a (**)	0,51 ^{NS} b (**)	0,77 ^{NS} a (**)
SPD6	0,45 ^{NS} b (**)	0,71 B a (*)	0,41 ^{NS} b (**)	0,65 ^{NS} a (**)
SPD18	0,45 ^{NS} b (**)	0,79 B a (*)	0,44 ^{NS} b (**)	0,68 ^{NS} a (**)
CV1 %	32,0		17,8	
CV2 %	29,8		30,6	

Continua...

Continuação da **Tabela 9.**

Sistemas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
AC	1,05	1,46	0,76	0,81

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre os sistemas de manejo para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem entre os tipos de agregados para o mesmo sistema avaliado (Teste de Tukey, a 5% de probabilidade) e ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade. Comparação dos sistemas de manejo em relação a área de referência (*) Significativo e (**) Não significativo pelo Teste de Dunnett, p<0,05. AC: Área de Cerrado; SPC20: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; CV1: Coeficiente de variação entre os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre os sistemas de manejo.

Em relação as vias de formação, foi observado que os agregados biogênicos dos três sistemas de manejo apresentaram teores de CFLL mais elevados que os agregados formados pela via fisiogênica nas duas camadas avaliadas (Tabela 8), apresentando padrão semelhante ao verificado para o COP. Elevados teores de COP em agregados biogênicos podem favorecer a formação de agregados menores (microagregados) e como consequência, a estabilização do carbono recentemente incorporado (PULLEMAN & MARINISSEN, 2004; SIX et al., 2004; LOSS et al., 2014), podendo então o CFLL ter função semelhante ao COP no decorrer desse processo. Para Brussaard et al. (2007) agregados biogênicos parecem ser importantes subunidades para a formação de microagregados e, conseqüentemente para a estabilização da MOS e armazenamento de nutrientes.

De forma geral, pode-se inferir então que a atividade biológica (raízes e macrofauna) aumentou os teores de carbono nas frações mais lábeis da MOS, visto que a fração leve-livre da MOS possui composição compatível àquela de materiais vegetais com alto grau de labilidade cuja estabilização está diretamente relacionada à recalcitrância intrínseca da molécula orgânica (CONCEIÇÃO et al., 2008).

Dentre as frações mais lábeis da MOS, COP e CFLL destacam-se como potenciais indicadores da qualidade da MOS em função de serem mais sensíveis as alterações provenientes do sistema de manejo do solo. Tais resultados podem estar relacionados com a potencial atuação dos agregados no sequestro de carbono, onde o tipo de carbono estocado pelos agregados biogênicos é geralmente mais lábil quando comparado ao carbono mais recalcitrante estocado em agregados formados pela via fisiogênica (PINTO et al., 2019).

Quando os teores de carbono orgânico das frações físicas dos sistemas de manejo foram comparados com a área de referência, não foram verificadas diferenças entre as médias para COP e CFLL, e que para COAM todos os sistemas apresentaram médias diferentes e inferiores em relação a AC independentemente do tipo de agregado avaliado (Tabelas 7, 8 e 9).

Os agregados fisiogênicos sob SPD6 e SPD18 (0,00-0,05 m) e SPC20, SPD6 e SPD18 (0,05-0,10 m) apresentaram médias semelhantes à AC para COP e CFLL (Tabelas 7 e 9). Já para os agregados biogênicos no SPC20, SPD6 e SPD18 (0,00-0,05 m) para COP, e SPC20 (0,00-0,10 m) e SPD6 e SPD18 (0,05-0,10 m) para CFLL apresentaram médias iguais à AC (Tabelas 7 e 9).

3.5.3. Análises de componentes principais

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada a partir das interpretações feitas na distribuição da proporção relativa, do conteúdo de COT, e das frações químicas e físicas da MOS nas vias de formação dos agregados dos diferentes sistemas de manejo do solo,

na ausência da área de Cerrado (Figuras 8 e 9). Para essa análise, os atributos avaliados são representados por setas, que indicam a direção do gradiente máximo, em que o comprimento da seta é proporcional à correlação do atributo com os eixos e à sua importância na explicação da variância projetada em cada eixo (THEODORO et al., 2003).

Verificou-se que as distribuições dos atributos apresentaram variância acumulada para os eixos 1 e 2 de 61,03% para a camada de 0,00-0,05 m e 53,07% para 0,05-0,10 m (Figuras 8 e 9). Através das análises das Figuras 8 e 9, observou-se a formação de três grupos, sendo as áreas SPD6 e SPD18 separadas da área SPC20, ao longo do eixo 1, que melhor explica a dissimilaridade entre os sistemas de uso do solo (43,08% e 35,85%, respectivamente). Enquanto o eixo 2, com menos relevância, separou a área SPD6 da área SPD18 (17,95% e 17,22%, respectivamente).

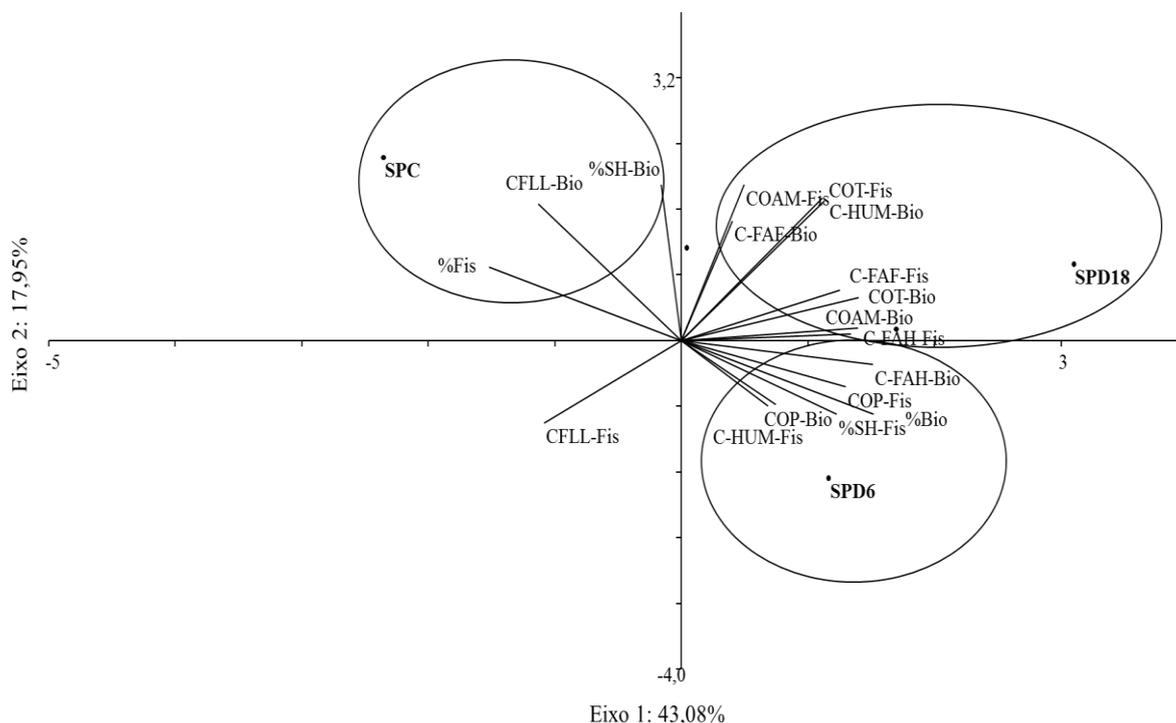


Figura 8. Análise de componentes principais (ACP) integrando a proporção relativa, o conteúdo de carbono orgânico total e as frações químicas e físicas da MOS de agregados fisiogênicos (Fis) e biogênicos (Bio), nos diferentes sistemas de manejo, à camada de 0,00-0,05 m, no bioma Cerrado, Uberaba-MG. AC: Área de Cerrado; SPC: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; %Fis: Proporção de agregados fisiogênicos; %Bio: Proporção de agregados biogênicos; COT: Carbono orgânico total; C-FAF: Carbono orgânico da fração ácido fúlvico; C-FAH: Carbono orgânico da fração ácido húmico; C-HUM: Carbono orgânico da fração húmica; %SH: Porcentagem de substâncias húmicas; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; e C-FLL: Carbono orgânico da fração leve-livre.

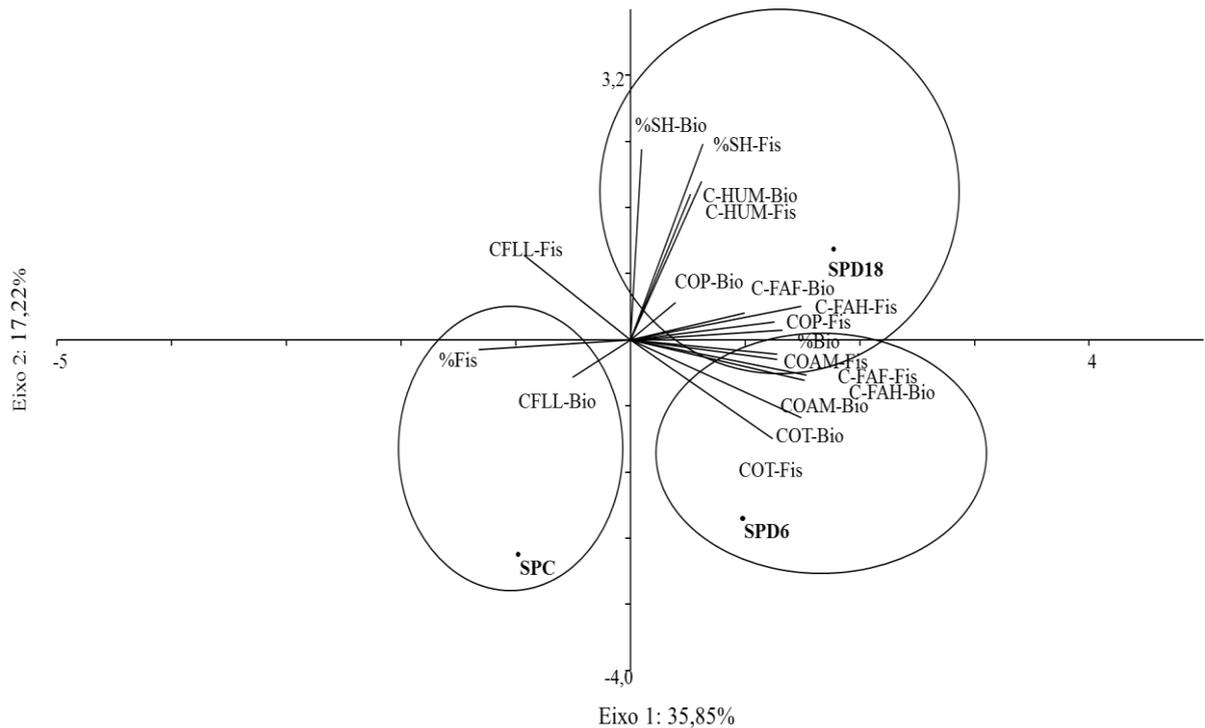


Figura 9. Análise de componentes principais (ACP) integrando a proporção relativa, o conteúdo de carbono orgânico total e as frações químicas e físicas da MOS de agregados fisiogênicos (Fis) e biogênicos (Bio), nos diferentes sistemas de manejo, à camada de 0,05-0,10 m, no bioma Cerrado, Uberaba-MG. AC: Área de Cerrado; SPC: Sistema plantio convencional com 20 anos de instalação; SPD6: Sistema plantio direto há 6 anos instalado; SPD18: Sistema plantio direto implantado há 18 anos; %Fis: Proporção de agregados fisiogênicos; %Bio: Proporção de agregados biogênicos; COT: Carbono orgânico total; C-FAF: Carbono orgânico da fração ácido fúlvico; C-FAH: Carbono orgânico da fração ácido húmico; C-HUM: Carbono orgânico da fração humina; %SH: Porcentagem de substâncias húmicas; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; e C-FLL: Carbono orgânico da fração leve-livre.

A maioria das variáveis correlacionaram-se positivamente ($> 0,8$) ao eixo 1 e estiveram mais associadas as áreas SPD6 e SPD18. Ou seja, o conteúdo de carbono orgânico e a maior parte das frações físicas e húmicas da MOS nos diferentes tipos de agregados, bem como, a proporção de agregados biogênicos estão relacionados às áreas de manejo conservacionista do solo. Tal padrão pode estar associado ao maior aporte de resíduos vegetais na superfície do solo, que combinado ao não revolvimento dessa camada, favorecem menor taxa de decomposição e melhor ambiente a fauna edáfica. Dessa maneira, são observados maiores teores de matéria orgânica na camada de 0,00-0,10 m, e conseqüentemente, de carbono orgânico total e das frações que o compõem, bem como, favorece condições ideais aos agentes biológicos responsáveis pela formação dos agregados biogênicos, como pode ser verificado nas Figuras 8 e 9 e nos testes estatísticos aplicados.

Verificou-se que a área SPC20 apresentou-se próximo dos autovetores %Fis e distante dos demais sistemas de manejo avaliados (Figuras 8 e 9), tendência que pode ser explicada pelas características inerentes do sistema plantio convencional, que pode favorecer a formação de agregados da via fisiogênica em detrimento a biogênica, aumentando a proporção relativa de agregados fisiogênicos. Percebe-se ainda que essa área apresentou-se próxima aos

autovetores %SH-Bio (Figura 8) e CFLL-Bio (Figuras 8 e 9). O sistema de preparo convencional do solo acelera a decomposição da matéria orgânica, rompe os agregados e reduz sua estabilidade nas camadas superficiais (SALES et al., 2006). Tais resultados sugerem que as principais frações de carbono orgânico que favorecem ou permanecem nos agregados dessa área, uma parte encontra-se estabilizada nas substâncias húmicas, e a outra dependente da recalcitrância da molécula orgânica (fração leve livre da MOS).

3.6. CONCLUSÕES

O menor revolvimento do solo em sistemas agrícolas conservacionistas (sistema plantio direto) favorece a estabilização dos agregados e a agregação biogênica. Entretanto, áreas nativas de Cerrado ainda se mostram superiores às áreas manejadas, o que pode ser reflexo da maior o que pode ser decorrente do menor impacto que essa área é submetida. Nas áreas manejadas verifica-se o favorecimento da agregação biogênica alterando a dinâmica da matéria orgânica do solo, promovendo a proteção e estabilização, e conseqüentemente o acúmulo de suas diferentes frações.

Foi observada uma maior participação das frações mais lábeis da MOS nos agregados biogênicos, o que pode contribuir para o aumento da disponibilidade de nutrientes às culturas e a formação de microagregados. Adicionalmente, os agregados biogênicos se mostram mais eficientes em termos de redução das taxas de decomposição da MOS e elevação do potencial de sequestro de carbono pelo solo.

Com o emprego da ACP, os diferentes sistemas de manejo puderam ser separados, sendo observada nítida distinção entre os sistemas conservacionistas do convencional.

3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, A. T.; TORRES, J. L. R.; PAES, J. M. V.; TEIXEIRA, C. M.; CONDE, A. B. T. Desafios do Sistema de plantio direto no Cerrado. **Infor. Agrop.**, v. 39, p. 19-26, 2018.
- ANGELINI, G. A. R.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; TORRES, J. L. R.; SAGGIN JÚNIOR, O. J. Colonização micorrízica, densidade de esporos e diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em solo de Cerrado sob plantio direto e convencional. **Rev. Semina**, v. 33, n. 1, p. 115-130, 2012.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, cap. 6, p. 873-928, 2007.
- ASSIS, R. L., BAHIA, V. G. 1998. Práticas mecânicas e culturais de recuperação de características físicas dos solos degradados pelo cultivo. **Informe Agropecuário**. v. 19, p. 71-78, 1998.
- ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Agregação de um Nitossolo Vermelho Distroférico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 58-66, 2010.
- AZIZ, I.; MAHMOOD, T.; ISLAM, K. R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 131, n. 7, p. 28-35, 2013.
- BATISTA, I. **Relação entre macrofauna, agregação e atributos edáficos em sequência de culturas sob plantio direto**. 2015. 94p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. 2015.
- BATISTA, I.; PEREIRA, M. G.; CORREIA, M. E. F.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; ROWS, J. R. C. Teores e estoque de carbono em frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo sob integração lavoura-pecuária no bioma Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, suplemento 1, p. 3377-3388, 2013.
- BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no cerrado, MS. **Semina. Ciências agrárias**, v. 33, p. 1-10, 2013.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 677-683, 2004.
- BELL, L. W.; MOORE, A. D. Integrated crop-livestock systems in Australian agriculture: trends, drivers and implications. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 111, n. 7, p. 1-12, 2012.
- BENBI, D. K.; BRAR, K.; TOOR, A. S.; SINGH, P. Total and labile pools of soil organic carbon in cultivated and undisturbed soils in northern India. **Geoderma**, Amsterdam, v. 237-238, n. 1, p. 149-158, 2015.

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

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. **Rev. Plant. Sci.**, v. 23, p. 481-504, 2007.

BOCHNER, J. K.; FERNANDES, M. F.; PEREIRA, M. G.; BALIEIRO, F. C.; SANTANA, I. K. S. Matéria orgânica e agregação de um Planossolo sob diferentes coberturas florestais. **Cerne**, v. 14, n. 1, p. 46-53, 2008.

BORGES, C. S.; RIBEIRO, B. T.; WEDLING, B.; CABRAL, D. A. Agregação do solo, carbono orgânico e emissão de CO₂ em áreas sob diferentes usos no Cerrado, região do Triângulo Mineiro. **Rev. Ambient. Água**, v. 10, n. 3, p. 660-675, 2015.

BOSSUYT, H.; SIX, J.; HENDRIX, P. F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. **Soil Biology & Biochemistry**, v.37, p.251-258, 2005.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

BRUSSAARD, L.; PULLEMAN, M. M.; OUE'DRAOGO, E.; MANDO, A.; SIX, J. Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. **Pedobiologia**, v. 50, p. 447-462, 2007.

BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description.** Albrighton, England: Waine Research Publications. 152 p. 1985.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, v. 56, p. 449-457, 1993.

CARMO, F. F.; FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; VIVALDI, L. J.; ARAÚJO, L. G. Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio direto com gramíneas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 420-431, 2012.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. **Plantio direto no sul do Brasil: fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista.** 1ª ed. Londrina: IAPAR, 2012. 76p.

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

CÉCILLON, L.; MELLO, N.A.; DANIELI, S.; BRUN, J. Soil macroaggregate dynamics in a mountain spatial climate gradient. **Biogeochemistry** 97, 31-43, 2009.

CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 5, p. 333-370, 2007.

CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; FABBRIS, C.; WEIRICH, S. W.; SILVA, R. F.; SILVA, V.R.; BASSO, C.J. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 39, p. 615-625, 2015.

CLIMATE-DATA. **Climate's data 2019 available**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/location/15882/>>. Acesso em fevereiro de 2019.

CONCEIÇÃO, P. C; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 541-549, 2008.

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

COUTINHO, F. S.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; TORRES, J. L. R. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. **Comunicata scientiae**, v. 1, n. 2, p. 100-105, 2010.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; LEMAINSKI, J. Converter plantio direto em sistema plantio direto – um modelo à sustentabilidade agrícola. **In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE**, 12. 2018, Passo Fundo: Projeto Passo Fundo, 2019. Solos e Nutrição Vegetal, p. 568-572.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; DENARDIN, N. D.; WIETHÖLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. p. 39, 2012.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (eds). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Soil Science Society of America. Madison, Special Publication, n. 35, p. 3-22. 1994.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (eds). **Methods for assessing soil quality**. Soil Science Society of America. Madison, Special Publication, n. 49, p. 25-37, 1996.

FERNANDES, J. C. F.; PEREIRA, M. G.; SILVA NETO, E. C.; CORREA NETO, T. A. Characterization of biogenic, intermediate and physicogenic soil aggregates of areas in the Brazilian Atlantic Forest. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 59-67. 2017.

FERREIRA, C. R.; SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil Till. Res.**, 198, 2020.

FIGUEIREDO, C. C.; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C. Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 907-916, 2010.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; CUNHA, T. J. F.; SALTON, J. C. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 5, p. 847-853, 2006.

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

HERLIHY, M.; MCCARTHY, J. Association of soil test phosphorus with phosphorus fractions and adsorption characteristics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 75, n.03, p.79-90, 2006.

JOUQUET, P., ZANGERLE, A., RUMPEL, C., BRUNET, D., BOTTINELLI, N., TRAN DUC, T. Relevance and limitations of biogenic and physicogenic classification: a comparison of approaches for differentiating the origin of soil aggregates. **Eur. J. Soil Sci.**, v. 60, p. 1117-1125, 2009.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L.; MACHADO, P. L. O. A.; GALVÃO, J. C. C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 821-832, 2003.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo. Oficina de Textos, 456p, 2011.

LIANG, A.; ZHANG, Y.; ZHANG, X.; YANG, X.; MCLAUGHLIN, N.; CHEN, X.; GUO, Y.; JIA, S.; ZHANG, S.; WANG, L.; TANG, J. 2018. Investigations of relationships among aggregate pore structure, microbial biomass, and soil organic carbon in a Mollisol using combined nondestructive measurements and phospholipid fatty acid analysis. **Soil Till. Res.**, v. 185, p. 94-101, 2018.

LIMA, A. C. R.; BRUSSAARD, L.; TOTOLA, M. R.; HOOGMOEDD, W. B.; GOEDE, R. G. M. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 64, p. 194-200, 2013.

LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; DOS SANTOS, E.; MERGEN, C. A.; BENEDET, L.; PEREIRA, M. G.; PICCOLO, M. C.; BRUNETTO, G.; LOVATO, P. E.; COMIN, J. J. Carbon, nitrogen and natural abundance of ¹³C and ¹⁵N in biogenic and physicogenic aggregates in a soil with 10 years of pig manure application. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 52-58, 2017.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; GIACOMO, S. G.; PERIN, A. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 46, n. 5, p. 68-76, 2011.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J. Frações granulométricas e oxidáveis de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso do solo, no Paraná, Brasil. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 43-54, 2014 a.

LOSS, A.; PERERIA, M. G.; COSTA, E. L.; BEUTLER, S. J. Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ¹³C and ¹⁵N abundance in biogenic and physico-genic aggregates in areas under different land use systems. *Soil Research*, v. 52, p. 685-697, 2014.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. *Ciência Rural*, v. 39, p. 1067-1072, 2009.

MELLO, N. A.; CÉCILLON, L.; BRUN, J. J. Formação e propriedades de Macroagregados de um solo alpino sob três tipos de vegetação nativa. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA: NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS AMBIENTAIS, 27. 2008. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBS, 2008. CD-ROM.

MELO, T. R.; PEREIRA, M. G.; BARBOSA, G. M. C.; SILVA NETO, E. C., ANDRELLO, A. C.; FILHO, J. T. Biogenic aggregation intensifies soil improvement caused by manures. *Soil Till. Res.*, v. 190, p. 186-193, 2019.

MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E.; FERREIRA, G. W.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E.; BRUNETTO, G. Atributos químicos em agregados biogênicos e fisiogênicos de solo submetido à aplicação com dejetos suínos. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, Recife, v. 14, n. 1, e5620, 2019 a.

MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E.; GIUMBELLI, L. D.; PINHO, D.; ABREU, L.; LOURENZI, C. R.; COMIN, J. J.; BRUNETTO, G. Caracterização física de agregados do solo submetido a 10 anos de aplicação de dejetos suínos. **Revista de Ciências Agrícolas**, v. 36, n. 1, p. 79-92, 2019 b.

MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; COMIN, J. J.; FREO, V. A.; PEREIRA, M. G.; BRUNETTO, G. Carbono das substâncias húmicas em agregados biogênicos e fisiogênicos sob aplicação continuada de dejetos suínos. In: Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo, 10., 2014, Pelotas-RS. **Anais...** Pelotas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2014.

MOTTER, P.; ALMEIDA, H. G. **Plantio direto**: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira. Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, p. 144, 2015.

MOURA, O. V. T., ROSSI, C. Q., SANTOS, O. A. Q., PEREIRA, M. G., PINTO, L. A. S. R.; ARAÚJO, E. S. Fósforo em agregados biogênicos e fisiogênicos sob diferentes sistemas de manejo agroecológico. **Revista Agrarian**, v. 12, p. 466-478, 2019.

MURPHY, C. A.; FOSTER, B. L.; RAMSPOTT, M. E.; PRICE, K. P. Effects of cultivation history and current grassland management on soil quality in northeastern Kansas. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 61, p. 75-89, 2006.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbono, orgânico carbono and organic matter. p. 961-1010. In: BLACK, C. A. (ed). **Methods of soil analysis**. Part 3. Chemical methods. Soil Science of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 1996.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability, mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 76, n. 1-3, p. 319-337, 1984.

OPARA-NADI, O. A. "Conservation tillage for increased crop production," In: FAO, **Soil Tillage in Africa: Needs and Challenges**. Roma: FAO Soils Bulletin, 69, cap. 8. p. 83-94, 1993.

PEREIRA JUNIOR, E. B.; HAFLE, O. M.; GOMES, E. M.; ANDRADE, M. E. L.; SANTOS, L. G.; DELFINO, F. I. Avaliação dos atributos físicos do solo submetido à práticas de manejo, em Agroecossistemas do semi-árido. **Revista Acta Tecnológica**, v. 5, p. 43-51, 2010.

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

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J., TORRES, J. L. R. Granulometric and humic fractions carbon stocks of soil organic matter under no-tillage. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 15, p. 1-13, 2012.

PINTO, L. A. S. R.; MENDONÇA, O. V. T.; ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; BARROS, F. C. Evolución y acumulación de C-CO₂ en agregados biogénicos y fisiogénicos presentes en diferentes tipos de manejos agroecológicos. **Rev. Acta Agron.**, v. 67, p. 494-500, 2018.

PORTELLA, C. M. R.; GUIMARÃES, M. F.; FELLER, C.; FONSECA, I. C. B.; TAVARES FILHO, J. Soil aggregation under different management systems. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 36, p. 1868-1877, 2012.

PULLEMAN, M. M.; MARINISSEN, J. C. Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. **Geoderma**, v. 120, p. 273-282, 2004.

PULLEMAN, M. M.; SIX, J.; MARINISSEN, J. C. Y.; JONGMANS, A. G.; Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 1-15, 2005.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V.; **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG, CFSEMG/UFV, 359p, 1999.

RIBEIRO, L. S.; OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S.; SILVA, C. V.; SILVA, G. B.; AZEVEDO, J. R. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo coeso sob sistema de manejo convencional e de plantio direto. **Pesq. Agropec. Bras.** Brasília. v. 51, n. 9, p. 1699-1702, 2016.

RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. III Caracterização morfológica do solo. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**. Visoça, MG: SBCS, 2012.

ROSSET, J. S. **Caracterização da matéria orgânica, atributos químicos e físicos do solo sob diferentes sistemas de manejo na região oeste do Paraná**. 2015. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Candido Rondon, 2015.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Estoque de carbono e atributos físicos de um Latossolo em cronosequência sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 252-258, 2015.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; MOURA, O. V. T.; ALMEIDA, A. P. C. Vias de formação, estabilidade e características químicas de agregados em solos sob sistemas de manejo agroecológico. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1677-1685, 2016.

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latosso sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**. v. 47, n. 3, p. 429-438. 2016.

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

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

SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C.; MARCHAO, R. L.; MADARI, B. E.; BENEDITO, L. E. C.; BUSATO, J. G.; SOUZA, D. M. Methods of soil carbon determination in Brazilian savannah soil. **Scientia Agrícola**, Brasília, v. 71, n. 4, p. 302-308, 2014.

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**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1332-1338, 2011.

SCHULTZ, N.; PINTO, L. A. S. R.; LIMA, S. S.; ZIVIANI, M. M.; ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G. Agregação do solo e atributos químicos em áreas com diferentes coberturas vegetais. In: **Características do Solo e sua Interação com as Plantas** 2 ed.: Atena Editora, v. 2, p. 1-12, 2019.

SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; FERNANDES, J. C. F.; CORRÊA NETO, T. A. Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation types in Atlantic Forest from Southeastern Brazil. **Semina: Ciência agrárias**. Londrina, v. 37, n. 6, p. 3927-3940, 2016.

SILVA NETO, L. F.; SILVA, I. F.; INDA, A. V.; NASCIMENTO, P. C.; BORTOLO, L. Atributos físicos e químicos de agregados pedogênicos e de coprólitos de minhocas em diferentes classes de solos da Paraíba. **Ciência Agrotécnica**, v. 34, n. 6, p. 1365-1371, 2010.

SILVA, R. F.; SANTOS, G. G.; NÓBREGA, J. C. A.; SANTOS, D. P.; JÚNIOR, J. P. S.; FILHO, J. F. J.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS, B. O. Soil use and management systems, time since adoption, and their impacts over aggregation. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, v. 13, n. 3, e5544, 2018.

SIQUEIRA-NETO, M.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; CARDOSO, A. N.; DOUZET, J. M.; FELLER, C.; PICCOLO, M. de C.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. **Soil and Tillage Research**, v. 110, p. 187-195, 2010.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research**, v. 79, p. 7-31, 2004.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; MORAES, J. C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of tillage. **Agronomie**, v. 22, p. 755-775, 2002.

SKARABOTO, F. F.; LOPES, R. A. P.; PEREIRA, G. S.; SILVA, R. V. Influência do tipo de preparo nas propriedades físicas do solo e da cultura da mandioca (euphorbiaceae). **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, [S.l.], v. 34, n. esp., p. 269-281, 2018.

SOHI, S. P.; MAHIEU, N.; ARAH, J. R. M.; POWLSON, D. S.; MADARI, B.; GAUNT, J. L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Science Society. American Journal**, v. 65, p. 1121-1128, 2001.

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

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 573p, 2017.

THEODORO, V. C. A.; ALVARENGA, M. I. N.; GUIMARÃES, R. J.; SOUZA, C. A. S. Alterações químicas em solo submetido a diferentes formas de manejo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 06, p. 1039-1047, 2003.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates. **Journal of Soil Science**, San Francisco, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TORRES, J. L. R.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L. Atributos indicadores da qualidade do solo numa área sob plantio direto há doze anos. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 2, p. 123-133, 2015 b.

TORRES, J. L. R.; MAZETTO JÚNIOR, J. C.; SILVA JÚNIOR, J.; VIEIRA, D. M. S.; SOUZA, Z. M.; ASSIS, R. L.; E. M. LEMES, E. M. Soil physical attributes and organic matter accumulation under no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Research**, v. 57, p. 712-718, 2019.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L.; SOUZA, Z. M. Atributos físicos de um latossolo vermelho cultivado com plantas de cobertura, em semeadura direta. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 39, p. 428-437, 2015 a.

UN – POPULATION DIVISION (2019). **World Population Prospects 2019: Highlights**. Disponível em: <<https://population.un.org/wpp/Publications/>>. Acesso em agosto de 2019.

VELOSO, F. R. **Plantas de cobertura para o Cerrado mineiro e sistemas de cultivo sobre as características agronômicas da soja.** 2018. 28 p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, 2018.

VENTURA, B. S. **Aplicações sucessivas de dejetos suínos alteram a dinâmica de carbono, nitrogênio e frações da matéria orgânica dos agregados do solo.** Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

VENTURA, B. S.; LOSS, A.; GIUMBELLI, L. D.; FERREIRA, G. W.; BUENO, A. C.; LOURENZI, C. R.; COMIN, J. J.; BRUNETTO, G. Carbon, nitrogen and humic substances in biogenic and physcogenic aggregates of a soil with a 10-year history of successive applications of swine waste. **Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 21, p. 329-343, 2018.

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

4. CAPÍTULO II

FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DE AGREGADOS FISIOGÊNICOS E BIOGÊNICOS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO COM DIFERENTES TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO E COBERTURAS VEGETAIS DO SOLO NO CERRADO MINEIRO

4.1. RESUMO

O estudo das frações da matéria orgânica do solo (MOS) encontradas em agregados de diferentes tipos morfológicos, pode ser uma prática essencial na avaliação da qualidade dos sistemas conservacionistas. Sendo assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar i) a contribuição de diferentes plantas de coberturas utilizadas em sistema plantio direto (SPD) na agregação biogênica; e ii) a influência da formação dos agregados na compartimentalização da matéria orgânica do solo. Foram avaliadas duas áreas manejadas sob SPD com diferentes tempos de implantação (6 e 18 anos, SPD6 e SPD18, respectivamente) e coberturas vegetais, perfazendo um total de seis áreas amostrais: SPD6, milheto (SPD6MI); SPD6, braquiária (SPD6BR); SPD6, crotalária (SPD6CR); SPD18, milheto (SPD18MI); SPD18, braquiária (SPD18BR); SPD18, e crotalária (SPD18CR). Em cada área amostral foram coletadas cinco pseudorepeticções (torrões) nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m de profundidade. Após a coleta as amostras foram secas ao ar e posteriormente submetidas a peneiramento utilizando um conjunto de peneiras de 9,7 e 8,0 mm de malha, sendo selecionados somente os agregados retidos nesse intervalo. Nesses, quantificou-se o percentual de cada tipo de agregado a partir da identificação e separação dos mesmos em fisiogênicos (formados por processos físicos e químicos) e biogênicos (formados pelos agentes biológicos). Em sequência, foram realizadas as análises de carbono orgânico total (COT), e os fracionamentos da MOS: químico (carbono orgânico da fração ácido fúlvico, C-FAF; carbono orgânico da fração ácido húmico, C-FAH; e carbono orgânico da fração humina, C-FHUM), físico granulométrico (carbono orgânico particulado, COP; e carbono orgânico associado aos minerais, COAM) e físico densimétrico (carbono da fração leve-livre, CFLL). Os agregados fisiogênicos foram quantificados em maior proporção em comparação os biogênicos nas áreas de SPD6MI, SPD6CR, SPD18MI e SPD18CR nas duas camadas, sendo exceção as áreas de SPD6BR e SPD18BR na camada de 0,00-0,05 m, onde observou-se padrão inverso. Entre as vias de formação, nos agregados biogênicos foram verificados os maiores teores de COT, C-FAH, C-FHUM, COP, COAM e CFLL. O uso de gramíneas, em especial as braquiárias, como plantas de cobertura em sistema plantio direto após 6 e 18 anos de adoção favorece a formação de agregados da via biogênica e os mesmos alteram a compartimentalização da MOS, sendo mais influenciados e beneficiados pelos mecanismos de estabilização das diferentes frações do material orgânico.

Palavras-chave: Vias de formação dos agregados. Compartimentalização da matéria orgânica do solo. Plantas de cobertura.

4.2. ABSTRACT

The study of soil organic matter fractions (SOM) found in aggregates from different morphological types can be an essential practice in the evaluation of quality in conservationist systems. Therefore, the objective of the present study was to evaluate i) the contribution of different cover crops used in no-tillage system (NTS) in biogenic aggregation; and ii) the influence of aggregate formation on the compartmentalization of soil organic matter. Two managed areas were evaluated under NTS with different implementation times (6 and 18 years, NTS6 and NTS18, respectively) and vegetal cover were evaluated, configuring six sample areas: NTS6, pearl millet (NTS6MI); NTS6, brachiaria grass (NTS6BR); NTS6, sunn hemp (NTS6SH); NTS18, pearl millet (NTS18MI); NTS18, brachiaria grass (NTS18BR); and NTS18, sunn hemp (NTS18SH). In each sample area were collected five pseudo replications in layers of 0.00-0.05 and 0.05-0.10 m depth. After collection, the samples were air-dried and later submitted to screening using a set of 9.7 and 8.0 mm mesh sieves, and only the aggregates retained in this interval were selected. The percentage of each type of aggregate was quantified from their identification and separation into physiocogenic (formed by physical and chemical processes) and biogenic (formed by biological agents). Subsequently, total organic carbon (TOC) analyses were performed, and MOS fractionations: chemical (fulvic acid fraction, C-FAF, humic acid, C-FAH, and humane, C-FHUM), physical particle size (particulate organic carbon, POC, and associated with minerals, OCAM) and physical densimetric (free light fraction carbon FLFC). In general, the physiogenic aggregates were quantified in greater proportion than the biogenic ones in the areas NTS6MI, NTS6SH, NTS18MI and NTS18SH in the two layers evaluated, except for the areas NTS6BR and NTS18BR in the 0.00-0.05 m layer, where the opposite pattern was observed. Between the formation pathways, on biogenic aggregates were verified the higher levels of TOC, C-FAH, C-FHUM, POC, OCAM and FLFC. The use of grass, specially the brachiaria, as covering plants in no-tillage system after 6 and 18 years of adoption favors the aggregates formation in the biogenic pathway and the same can alter the compartmentalization of the SOM, being more influenced and benefited by the stabilization mechanisms of the different fractions of organic material.

Key words: Aggregation formation pathways. Compartmentalization of soil organic matter. Cover plants.

4.3. INTRODUÇÃO

A melhoria na qualidade do solo aliada a diminuição dos custos de produção, são características atreladas a agricultura conservacionista. A utilização de sistemas conservacionistas de manejo do solo, visa aumentar a sustentabilidade da agricultura nos aspectos socioeconômicos; gerar competitividade para o agronegócio; garantir segurança e qualidade alimentar; e preservar o ambiente edáfico. No Brasil, um dos sistemas mais amplamente adotados é o sistema plantio direto (SPD), principalmente em áreas de extensa e intensa produção agrícola, como no Cerrado.

A eficácia do SPD está relacionada, dentre outros fatores, com a quantidade e qualidade dos resíduos produzidos pelas plantas de cobertura e com a persistência destes sobre o solo (ANDRADE et al., 2018). No Cerrado, a rápida decomposição dos resíduos vegetais dificulta a manutenção da cobertura na camada superficial do solo (TORRES & PEREIRA, 2013). Nesse sentido, tem-se procurado utilizar plantas de cobertura com alta produção de fitomassa e baixa taxa de decomposição para compor esquemas de rotações ou sucessões de culturas, para que a mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) e a ciclagem de nutrientes seja mais lenta (BOER et al., 2008; TORRES et al., 2008).

As Poáceas (gramíneas), adaptadas às condições edafo-ambientais do Cerrado, apresentam um sistema radicular fasciculado e elevada produção de fitomassa seca, adicionando carbono ao solo mediante rizo-deposição e morte das raízes e adição de palhada, colaborando assim para que haja aumento nos teores de MOS, contribuindo então para a formação dos agregados. As Fabáceas (leguminosas), elevam os teores de nitrogênio no solo, pois realizam associações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio (FBN), possibilitando uma maior produção de fitomassa para as culturas subsequentes. Porém, são menos eficientes no processo de formação de agregados quando comparadas as gramíneas. Em síntese, a estruturação do sistema de manejo com diversidade de espécies vegetais pode contribuir para a melhoria da qualidade edáfica, e que para as condições edafo-ambientais do Cerrado, espécies de gramíneas de verão e leguminosas fixadoras de N, são vitais para viabilizar o SPD.

Outro fator importante quanto à análise do SPD, além do emprego de diferentes coberturas vegetais, é avaliar a resposta ao longo do tempo de instalação do sistema. Estudos têm evidenciado que o SPD pode alterar os atributos edáficos, à medida que os cultivos se sucedem, em virtude do contínuo aporte de material orgânico sobre a superfície do solo, oriundos dos resíduos vegetais; da ação benéfica do sistema radicular das plantas instaladas (plantas de cobertura ou culturas de interesse econômico); e da proteção oferecida à superfície do solo (ANDRADE et al., 2018). Por este fato, é interessante destacar a importância do tempo de implantação do SPD para que se processem alterações tais como no acúmulo de matéria orgânica, melhoria da agregação, ciclagem de nutrientes e aumento da atividade biológica (ROSSET, 2015).

Para avaliar tais fatores envolvidos no sucesso do SPD em áreas de Cerrado, alguns atributos edáficos têm sido utilizados como indicadores de qualidade do solo. Dentre eles, têm-se as mudanças na formação de agregados e na dinâmica da MOS. Os mecanismos de formação dos agregados envolvem processos físicos e químicos (agregados fisiogênicos), e biológicos (agregados biogênicos) (LOSS et al., 2014), e a diferenciação entre os tipos morfológicos de agregados é realizada de acordo com sua gênese ou vias de formação (BULLOCK et al., 1985; PULLEMAN et al., 2005; BATISTA et al., 2013).

A MOS pode ser considerada como o componente mais complexo, dinâmico, heterogêneo e reativo do solo. Em função de sua heterogeneidade, possui agrupamentos de compostos orgânicos com diferentes graus de complexidade, diversidade estrutural (PEREIRA

et al., 2012) e labilidade. Com o propósito de avaliação dos diversos compartimentos, inúmeras técnicas de fracionamentos físicos (CAMBARDELLA & ELLIOTT, 1992; SOHI et al., 2001) e químico (BENITES et al., 2003) têm sido utilizadas para separar, isolar e extrair as frações da MOS e quantificar o carbono orgânico presentes nos agregados do solo.

A partir do exposto, o objetivo do presente estudo foi avaliar i) a contribuição de diferentes plantas de coberturas utilizadas em sistema plantio direto (SPD) na agregação biogênica; e ii) a influência da formação dos agregados na compartimentalização da matéria orgânica do solo.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1. Localização, clima e solo da área de estudo

A localização, clima e o solo da área de estudo estão apresentados no subitem 3.4.1. do Capítulo I.

4.4.2. Histórico da área experimental

Para este estudo, avaliaram-se duas áreas manejadas sob sistema plantio direto com diferentes tempos de implantação: área de sistema de plantio direto implantado há 6 anos (SPD6), em fase de transição; área de sistema de plantio direto implantado há 18 anos (SPD18), em fase de consolidação. Nas áreas sob SPD foram selecionadas três subáreas com diferentes plantas de coberturas, a saber: milheto cv. ADR500 (*Pennisetum glaucum* L.) (MI), braquiária (*Urochloa brizantha* cv. Marandú) (BR) e crotalária (*Crotalaria spectabilis*) (CR) amostradas em janeiro de 2019.

O manejo das plantas de cobertura é conduzido de forma semelhante, sendo diferente apenas o tempo de instalação. Perfazendo o total de seis áreas amostrais analisadas em delineamento inteiramente casualizado (DIC), descritas como: SPD6, milheto (SPD6MI); SPD6, braquiária (SPD6BR); SPD6, crotalária (SPD6CR); SPD18, milheto (SPD18MI); SPD18, braquiária (SPD18BR); e SPD18, crotalária (SPD18CR). Em todas as áreas manejadas, a cultura anual que antecedeu o momento da coleta das amostras foi a soja (*Glycine max* L.), mas milho e feijão também são culturas anuais rotacionadas nas áreas. O histórico da área experimental e as práticas de preparo e adubação do solo encontra-se apresentadas no subitem 3.4.2. do Capítulo I.

4.4.3. Amostragem e separação dos agregados

Em cada área amostral foram coletadas cinco pseudorepetições (torrões) nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m de profundidade, totalizando 60 unidades amostrais. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e posteriormente submetidas a peneiramento, sendo utilizado um conjunto de peneiras de 9,7 e 8,0 mm de malha, sendo selecionados somente os agregados retidos neste intervalo.

4.4.4. Análises realizadas

a) Identificação das vias de formação dos agregados

A identificação das vias de formação dos agregados está disposta na letra **a)** do subitem 3.4.5. do Capítulo I, identificando-se duas classes (fisiogênicos e biogênicos) mediante método adaptado por Pulleman et al. (2005), a partir dos padrões morfológicos estabelecidos por Bullock et al. (1985).

b) Carbono orgânico total

O método de carbono orgânico total encontra-se disponível na letra **b)** do subitem 3.4.5. do Capítulo I, segundo Yeomans & Bremner (1988).

c) Fracionamento químico da MOS

O método do fracionamento químico da matéria orgânica do solo está apresentado na letra **c)** do subitem 3.4.5. do Capítulo I, de acordo com Benites et al. (2003).

d) Fracionamento físico granulométrico da MOS

O método do fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica do solo encontra-se disponível na letra **d)** do subitem 3.4.5. do Capítulo I, conforme Cambardella & Elliott (1992).

e) Fracionamento físico densimétrico da MOS

O método do fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo está apresentado na letra **e)** do subitem 3.4.5. do Capítulo I, segundo Sohi et al. (2001).

4.4.5. Análises estatísticas

Os resultados foram analisados quanto à normalidade dos resíduos e homocedasticidade dos dados pelos testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente, e quando não atendidos os pressupostos dos testes mencionados acima, os mesmos foram transformados pelo teste de Box Cox. Posteriormente, os resultados foram analisados como DIC em esquema de parcelas subdivididas (6 áreas amostrais e 2 vias de formação), sendo submetidos à análise de variância com aplicação do teste F e os valores médios comparados entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o programa R 3.3.1.

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1. Contribuição relativa

Os agregados fisiogênicos estiveram presentes em maior proporção que os biogênicos nas áreas de SPD6MI, SPD6CR, SPD18MI e SPD18CR nas duas camadas avaliadas, sendo exceção as áreas SPD6BR e SPD18BR na camada de 0,00-0,05 m, onde observou-se padrão inverso (Tabela 10).

Tabela 10. Distribuição, em porcentagem, de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos e coberturas vegetais em duas profundidades no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Áreas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	%		%	
SPD6MI	67	33	58	42
SPD6BR	41	59	53	47
SPD6CR	59	41	74	26
SPD18MI	82	19	70	30
SPD18BR	48	52	62	38
SPD18CR	80	20	83	17

SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária.

Outros autores verificam resultados similares para a agregação fisiogênica podendo ser citados: Pulleman et al. (2005) avaliando o impacto da atividade de minhocas na formação de agregados em distintos sistemas de cultivo à longo prazo na Holanda; Batista et al. (2013), estudando a influência física e biológica na gênese de agregados dos solos do Cerrado em áreas de produção sob sistema integração lavoura-pecuária; Loss et al. (2014), no estado do Paraná, em áreas sob SPD, SPC, pastagem e floresta secundária; Batista (2015), ao avaliar o efeito de culturas subsequentes em SPD na fauna edáfica e nas características químicas e físicas de agregados da Mata Atlântica, SP; Silva Neto et al. (2016), analisando a formação de agregados em áreas com diferentes tipos coberturas vegetais na Floresta Atlântica, RJ e Fernandes et al. (2017), avaliando as vias de formação de agregados em fragmentos da Mata Atlântica em diferentes estágios de regeneração, RJ.

Ao avaliar a proporção de formação de agregados pelas diferentes vias em áreas de SPD com diferentes tempos de instalação e floresta em duas estações do ano em Guaira, PR, Ferreira et al. (2020) observaram que a proporção de agregados fisiogênicos foi superior a de intermediários e biogênicos em após 23 anos de SPD (fase de manutenção) em ambas as estações, com padrão inverso para a área de floresta. Os autores justificaram tais resultados em razão da falta de mobilização do solo e aos efeitos cumulativos da pressão de máquinas agrícolas sobre a superfície do solo. As máquinas utilizadas no SPD são mais pesadas, o que pode promover modificações no ambiente edáfico, principalmente na estrutura do solo, favorecendo a compactação nas camadas superficiais, tendo sido este apontado como um dos principais efeitos negativos observados em áreas de SPD (ANDRADE et al., 2018).

Entre as áreas dos sistemas de SPD6 e SPD18, é possível observar uma redução na proporção de agregados biogênicos no decorrer do tempo de instalação para as duas camadas avaliadas (Tabela 10). Para Ferreira et al. (2020), a redução na proporção de agregados

biogênicos ao longo do tempo em áreas de SPD é um indicativo de que algumas práticas adotadas no sistema podem estar afetando negativamente a qualidade estrutural do solo ou causando a diminuição da atividade da macrofauna edáfica, pela compactação, comum em áreas manejadas sob SPD. Já que a agregação biogênica é considerada como um potencial indicador de qualidade edáfica, justamente por conta de sua formação e sua maior sensibilidade aos diferentes sistemas de uso e manejo do solo (PULLEMAN et al., 2005; SILVA NETO et al., 2010; LOSS et al., 2014, 2017; SILVA NETO et al., 2016; MELO et al., 2019; FERREIRA et al., 2020).

Neste estudo, nas áreas de SPD6BR e SPD18BR na camada de 0,00-0,05 m, foi verificado que os agregados biogênicos (59 e 52%, respectivamente) encontraram-se em proporção superior aos fisiogênicos (41 e 48%, respectivamente) (Tabela 10). Esses resultados corroboram aqueles encontrados por Loss et al. (2017), Mergen et al. (2019 a), Melo et al. (2019) e Schultz et al. (2019), para a agregação biogênica. Em área de pastagem plantada, Pulleman et al. (2005) quantificaram uma proporção relativa de 47,6% de agregados biogênicos, 29,9% de intermediários e 22,5% de fisiogênicos. Loss et al. (2014), encontraram quantidades superiores de agregados biogênicos em área de pastagem quando comparada à áreas de SPD e floresta secundária, provavelmente por função do sistema radicular das gramíneas, em especial as forrageiras.

O sistema radicular das diferentes plantas de cobertura influencia diretamente na gênese dos diferentes tipos de agregados, sendo considerado, um dos principais agentes biológicos responsáveis pela formação de agregados biogênicos, assim como a macrofauna edáfica. Segundo Six et al. (2004), as raízes podem influenciar direta e indiretamente a estrutura do solo, a saber: diretamente por meio de excreções, em especial polissacarídeos; e indiretamente por meio da estimulação da biomassa microbiana, além de absorver água e promover o aumento da força de coesão devido ao secamento do solo.

As gramíneas forrageiras, em destaque as braquiárias, promovem uma maior adição de carbono ao solo via renovação do sistema radicular, propiciando melhores condições à fauna edáfica e a formação de agregados de origem biogênica (LOSS et al., 2014; MERGEN JUNIOR et al., 2019 a). Justificando assim os resultados encontrados nesse estudo nas áreas cobertas com braquiárias.

4.5.2. Carbono orgânico total

Os resultados de carbono orgânico total (COT) encontram-se apresentados nas Figuras 10 e 11. Na comparação entre as áreas para COT, na camada de 0,00-0,05 m, nos dois tipos de agregados do SPD18MI foram verificados os maiores teores de carbono (Figura 10). Para a camada de 0,05-0,10 m, em ambas as vias de formação foram observados teores mais elevados de COT nos agregados do SPD6CR (Figura 11). Verificou-se que os agregados nas áreas de SPD18MI e SPD6CR apresentaram maior enriquecimento nos teores de COT, com destaque para as gramíneas em SPD em fase de consolidação, e leguminosas no sistema em fase de transição, como culturas de coberturas.

Os maiores teores de COT nos agregados na área de SPD18MI na camada de 0,00-0,05 m (Figura 10), podem estar relacionados com a maior produção de fitomassa seca e baixa taxa de decomposição dos resíduos, verificadas para a cultura do milho. Em experimento conduzido em condições de campo no Município de Uberaba-MG, Torres et al. (2014) avaliaram a produção de fitomassa e a decomposição dos resíduos culturais de diferentes plantas de cobertura em SPD. Os autores observaram que os cultivares de milho apresentaram os maiores valores de produção de fitomassa seca e as menores taxas de decomposição de seus resíduos. Segundo os autores, tal fato é devido, à adaptação dessa cultura às condições

climáticas da região de estudo associada a sua relação C/N, estando acima de 25:1, proporcionando uma decomposição mais lenta (TORRES et al., 2005).

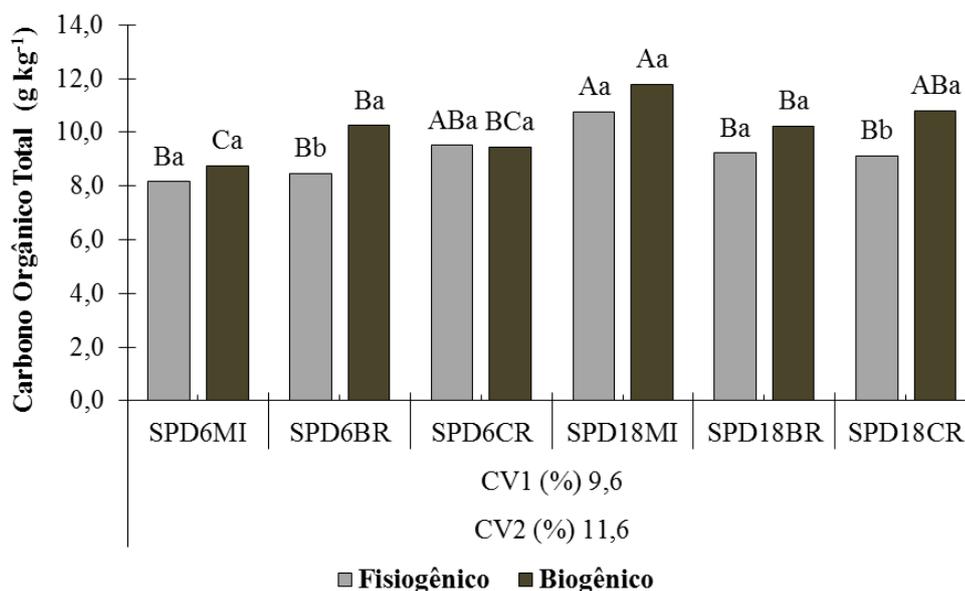


Figura 10. Carbono orgânico total (COT) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais na camada 0,00-0,05 m de profundidade no bioma Cerrado, Uberaba-MG. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais.

Em estudo avaliando os teores e estoques de COT no solo após diferentes períodos de cultivo em SPD (6, 9 e 10 anos), Rossetti & Centurion et al. (2015) verificaram aumento nos teores de carbono na camada superficial do solo em função do tempo de adoção da SPD. Ressaltando que em sistemas menos alterados pelo preparo do solo, como SPD, após a decomposição dos resíduos vegetais, os estoques de COT podem aumentar na camada mais superficial do solo. No Cerrado goiano, Loss et al. (2011) quantificaram os teores de COT em diferentes classes de tamanho de agregados em Latossolo Vermelho sob duas áreas de SPD à 17 anos instalados, uma com integração lavoura-pecuária (ILP) (SPD-ILP) e a outra sem a integração (SPD sem ILP), e uma área de Cerrado. Os autores observaram que entre as áreas cultivadas, no SPD-ILP foram quantificados os maiores teores de COT nas classes de agregados, com exceção da classe de 0,5-0,25 mm. Tais resultados ocorreram, provavelmente, em virtude do uso de braquiárias, que propiciam a deposição de resíduos orgânicos de maior relação C/N, acarretando uma decomposição mais lenta e favorecendo o acúmulo de COT nos agregados do solo.

Avaliando os teores de COT em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação na região Oeste do Paraná, Rosset et al. (2014) observaram tendência de aumento nos teores em função do tempo de instalação do SPD, especialmente após 6 (fase de transição) e 22 anos (fase de manutenção) de adoção para as camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, e redução dos teores em profundidade. Essa redução demonstra a contribuição das entradas de

carbono na camada mais superficial em relação às camadas mais profundas, fato comum em sistemas sem revolvimento intensivo do solo (ROSSET et al., 2014). Esse padrão corrobora aos resultados observados nos agregados na área de SPD18MI (Figura 10). No estado do Paraná, Ferreira et al. (2020) também verificaram tendência de aumento nos teores de COT nos diferentes tipos de agregados em função do tempo de adoção do SPD, variando de 16,39 a 20,22 g kg⁻¹ após 7 anos (fase de transição), 18,82 a 23,32 g kg⁻¹ após 14 anos (fase de consolidação) e 21,81 a 24,79 g kg⁻¹ após 23 anos (fase de manutenção).

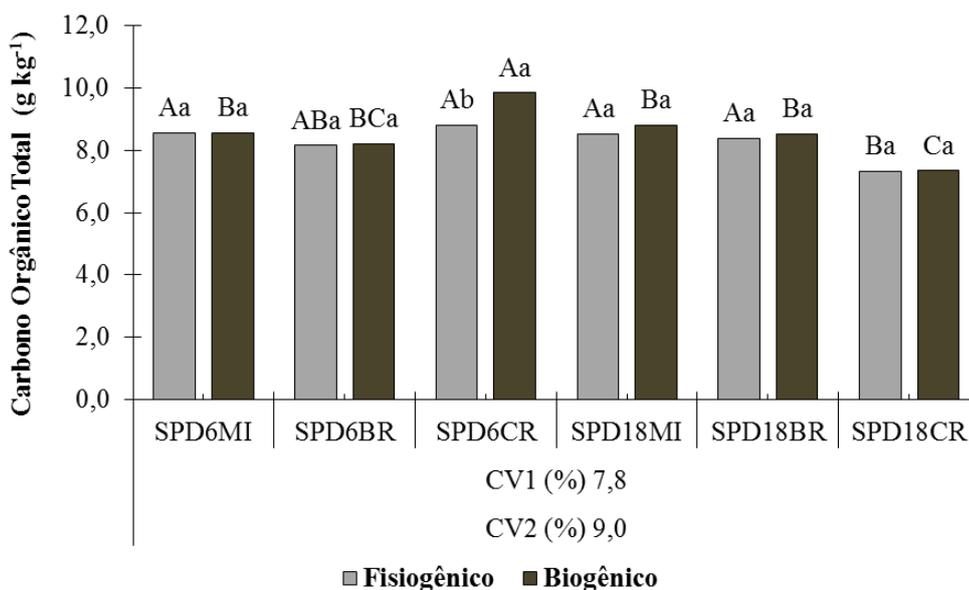


Figura 11. Carbono orgânico total (COT) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais na camada 0,05-0,10 m de profundidade no bioma Cerrado, Uberaba-MG. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais.

No Cerrado mineiro, Torres et al. (2019) avaliaram o acúmulo de MOS e os teores de COT em áreas de SPD com 5 e 17 anos (SPD5 e SPD17, respectivamente) e floresta. Os autores verificaram maior acúmulo de MOS na área sob SPD17 (fase de consolidação) em relação a de SPD5 (fase de transição) na camada de 0,00-0,40 m, e ausência de significância nos teores de COT entre SPD5 e SPD17 para as camadas avaliadas. Para os autores, o fato ocorre pela ação combinada entre a adição e manutenção dos resíduos culturais que permanecem na superfície do solo por longo período com a mínima perturbação do solo e a rotação de culturas, explicando assim os dados de acúmulo de MOS em SPD17. Nesse estudo, os fatores mencionados anteriormente auxiliam a justificar os resultados de COT nos agregados em SPD18MI na camada de 0,00-0,05 m (Figura 10).

Na camada de 0,05-0,10 m também foram verificados elevados teores de carbono nos agregados do SPD6CR (Figura 11). Torres et al. (2014) constataram que braquiária e crotalária apresentaram similaridade quanto aos valores de produção de fitomassa seca (2,4 e 2,1 Mg ha⁻¹, respectivamente), sendo quantificadas as maiores taxas de decomposição dos resíduos para

crotalária em comparação à braquiária (67,9 e 61,7%, nessa ordem). Em áreas de SPD sob diferentes coberturas vegetais, SPC e área de pousio no Cerrado mineiro, Pereira et al. (2012), verificaram que na camada de 0,00-0,05 m foram quantificados os maiores estoques de COT nas áreas de SPD com braquiária, pousio e SPD com crotalária, na devida ordem, e os menores estoques encontrados em SPC.

Quantificando os teores de COT em diferentes classes de tamanhos de agregados de um Latossolo Vermelho em áreas de SPD com diferentes plantas de cobertura (milho + braquiária e milho + crotalária) e vegetação de Cerrado, Coutinho et al. (2010) verificaram que na área de braquiária ocorreram os maiores teores de COT nas diferentes classes de agregados para as duas camadas avaliadas. As braquiárias (gramíneas) possuem um sistema radicular fasciculado, o que proporciona maior agregação das partículas e fornecimento de carbono, devido à rizodeposição e morte de suas raízes. Para os mesmos autores esses resultados demonstram que o sistema radicular da braquiária é mais eficiente em aumentar os teores de carbono dos agregados do solo quando comparado ao crotalária. Esses dados divergem dos encontrados no estudo para a camada de 0,05-0,10 m na área de SPD6CR (Figura 11).

Para o COT foram observadas diferenças entre as vias de formação de agregados, na qual nos agregados biogênicos nas áreas de SPD6BR, SPD18CR (0,00-0,05 m) e SPD6CR (0,05-0,10 m) foram quantificados os maiores teores de COT em comparação aos agregados da via fisiogênica (Figura 10 e 11). Esses resultados apresentaram padrão similar aos encontrados por Pulleman et al. (2005), Silva Neto et al. (2010), Batista et al. (2013); Loss et al. (2014), Batista (2015), Silva Neto et al. (2016); Loss et al. (2017), Fernandes et al. (2017), Ventura et al. (2018), Mergen Junior et al. (2019 b) e Schultz et al. (2019). Os agregados biogênicos podem ser formados tanto pela atividade de organismos da fauna edáfica, ninhos e galerias, quanto pela ação de raízes (Batista, 2015). Para Pulleman et al. (2005), o enriquecimento de carbono em estruturas biogênicas indica seletiva alimentação de material orgânico por organismos edáficos, elevando os teores de carbono nesses agregados.

Avaliando o efeito da agregação biogênica na dinâmica química e estrutural em Latossolo Vermelho no Município de Londrina-PR após nove contínuos anos de aplicação de dejetos líquidos de suínos ou esterco de galinha, Melo et al. (2019) verificaram que nos agregados biogênicos foram quantificados teores mais elevados de COT em comparação aos agregados fisiogênicos. Para os autores, quanto maior for a entrada de carbono, mais intensa será a formação de agregados biogênicos. Em área de floresta, Ferreira et al. (2020) quantificaram maiores teores de COT em agregados biogênicos em comparação aos agregados intermediários e fisiogênicos. Em áreas sob vegetação nativa, em virtude da estabilidade do ambiente em questão, pressupõe-se maior número e ação de microorganismos, plantas e animais edáficos responsáveis pela agregação biogênica. Tais resultados sugerem que esses agregados, além de indicar maior atividade biológica, também favorecem o acúmulo de carbono no solo.

4.5.3. Carbono orgânico das frações húmicas

Os dados referentes aos teores de carbono orgânico das frações húmicas da MOS são apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13. As maiores variações dos resultados de carbono orgânico das frações húmicas da MOS foram verificadas na camada de 0,00-0,05 m, principalmente para o carbono orgânico das frações ácido húmico (C-FAH) (Tabela 12) e humina (C-FHUM) (Tabela 13).

Quanto aos teores de carbono orgânico da fração ácido fúlvico (C-FAF), não foram observadas diferenças na comparação entre as áreas na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 11). Entretanto, na camada de 0,05-0,10 m nos agregados fisiogênicos do SPD18MI e biogênicos do SPD6CR foram verificados teores mais elevados de C-FAF (Tabela 11). O enriquecimento

dessa fração foi observado nos agregados fisiogênicos na área cobertas com milho com maior tempo de instalação do sistema, e nos biogênicos em crotalária com menor tempo.

Tabela 11. Carbono orgânico da fração ácido fúlvico (C-FAF) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Áreas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPD6MI	1,58 ^{NS ns}	1,58 ^{NS ns}	1,47 ^{AB^{ns}}	1,56 ^{AB^{ns}}
SPD6BR	1,41 ^{NS ns}	1,20 ^{NS ns}	1,53 ^{AB^{ns}}	1,19 ^{B^{ns}}
SPD6CR	1,48 ^{NS ns}	1,74 ^{NS ns}	1,79 ^{AB^{ns}}	2,09 ^{A^{ns}}
SPD18MI	1,67 ^{NS ns}	1,43 ^{NS ns}	2,02 ^{A^{ns}}	1,66 ^{AB^{ns}}
SPD18BR	1,80 ^{NS ns}	1,76 ^{NS ns}	1,84 ^{AB^{ns}}	1,44 ^{B^{ns}}
SPD18CR	1,33 ^{NS ns}	1,93 ^{NS ns}	1,22 ^{B^{ns}}	1,18 ^{B^{ns}}
CV1 %	26,2		20,5	
CV2 %	23,6		22,7	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais.

No Cerrado mineiro, Pereira et al. (2012) quantificaram maiores estoques de C-FAF em áreas com milho e braquiária como plantas de cobertura para cultura da soja nas camadas de 0,025-0,05 e 0,00-0,20 m, e para as demais profundidades somente na área de crotalária foram verificadas diferenças, com maiores valores para a área da soja. Os autores atribuíram os resultados encontrados a utilização de gramíneas (milheto e braquiária) como plantas de coberturas antes do plantio de leguminosas como cultura econômica (soja) que favorecem o aumento dos teores de carbono nessa fração, quando comparado a utilização de somente leguminosas (crotalária + soja). O sistema radicular do milho e da braquiária pode atingir maiores profundidades e com isso transportar o C-FAF (menor peso molecular e maior mobilidade, quando comparado ao C-FAH) para camadas mais subsuperficiais. Corroborando aos resultados de C-FAF desse estudo nos agregados fisiogênicos da área sob SPD18MI na camada de 0,05-0,10 (Figura 11).

Para a mesma comparação, foi verificado padrão similar nos resultados das variáveis C-FAF e COT nos agregados biogênicos do SPD6CR na camada de 0,05-0,10 m (Figura 11). As Fabáceas geralmente apresentam relação C/N abaixo de 25:1 e possuem decomposição mais acelerada (TORRES et al., 2005) e menor produção de fitomassa seca (TORRES et al., 2014). Na área de SPD após 22 anos de adoção (fase de manutenção), Rosset (2015) quantificou maiores estoques de C-FAF na camada de 0,20-0,40 m, sendo esses valores superiores aos observados nas demais áreas avaliadas em todas as camadas, com exceção da área de mata na camada de 0,00-0,05 m. Em agregados fisiogênicos, intermediários e biogênicos coletados na camada de 0,00-0,10 m, Ferreira et al. (2020) em áreas submetidas a diferentes formas de manejo e cobertura vegetal, não verificaram diferenças nos teores de C-FAF entre os tempos de adoção dos SPDs avaliados para as duas épocas de amostragem.

Para C-FAF não foram constatadas diferenças entre as vias de formação dos agregados independente da cobertura vegetal e do tempo de implantação do SPD nas duas camadas avaliadas (Tabela 11). Esse padrão pode estar relacionado as características químicas da fração

ácido fúlvico. Do ponto de vista químico, essa fração é mais solúvel e lábil, sendo assim sua dinâmica de formação e decomposição mais acelerada em comparação as frações ácido húmico e humina (FONTANA et al., 2006).

Na comparação entre as áreas, nos agregados fisiogênicos dos SPD6CR e SPD18BR, e biogênicos do SPD18MI foram quantificados os teores mais elevados de C-FAH na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 12). Na camada subjacente (0,05-0,10 m), foram verificados os maiores teores de C-FAH nos agregados fisiogênicos dos SPD6CR e SPD18MI (Tabela 12). De maneira geral, observa-se que nos agregados formados pela via fisiogênica da área de SPD6CR ocorreu maior homogeneidade nos resultados de C-FAH na camada de 0,00-0,10 m.

Tabela 12. Carbono orgânico da fração ácido húmico (C-FAH) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Áreas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPD6MI	2,00 B ^{ns}	1,92 B ^{ns}	1,35 B ^{ns}	1,76 ^{NS ns}
SPD6BR	1,88 B b	2,65 AB a	2,14 AB ^{ns}	1,76 ^{NS ns}
SPD6CR	3,04 A ^{ns}	2,73 AB ^{ns}	2,66 A ^{ns}	2,60 ^{NS ns}
SPD18MI	2,05 B b	3,05 A a	2,65 A ^{ns}	2,41 ^{NS ns}
SPD18BR	3,20 A ^{ns}	2,48 AB ^{ns}	1,79 AB ^{ns}	2,20 ^{NS ns}
SPD18CR	2,18 B ^{ns}	1,93 B ^{ns}	1,42 B ^{ns}	1,87 ^{NS ns}
CV1 %	22,3		24,2	
CV2 %	20,7		28,1	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais.

Para Ferreira et al. (2020), em sistemas conservacionistas, os mecanismos de estabilização da MOS envolvem processos físicos, químicos e biológicos em associação às condições edafo-ambientais da região (clima, sazonalidade e diversidade edáfica, por exemplo). Do ponto de vista químico, a estabilização da MOS ocorre a partir da formação de complexos organo-minerais, estruturas supramoleculares ou estruturas recalitrantes (Lal, 2018). No mesmo estudo, Ferreira et al. (2020) não observaram diferenças nos conteúdos de C-FAH entre os tempos de implantação dos SPDs avaliados para as duas épocas de amostragem.

Avaliando os teores de carbono das substâncias húmicas da MOS em áreas sob sistema braquiária/pecuária, milheto/sem pecuária e vegetação nativa do Cerrado, Loss et al. (2013 a) verificaram teores mais elevados de C-FAH em sistema braquiária/pecuária em comparação ao milheto/sem pecuária nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m. Os autores sugerem que esses resultados ocorreram devido ao uso da braquiária, que produz resíduos orgânicos com elevada relação C/N, tendo sua decomposição mais lenta e aumentando a produção de carbono nessa fração. Pereira et al. (2012) constataram maiores estoques de C-FAH na camada de 0,00-0,025 m nas áreas de milheto, crotalária e braquiária como coberturas vegetais, quando comparadas as áreas de SPC e pousio, independentemente da cultura econômica avaliada (soja e milho). Para os autores, os resultados indicam que o aumento nos estoques de carbono nessa fração depende das entradas de resíduos orgânicos originados das plantas de cobertura.

O aumento nos teores e estoques de C-FAH foi verificado por Rosset (2015), em área de SPD após 22 anos de instalação (fase de manutenção) em comparação aos demais sistemas avaliados. Na camada de 0,00-0,40 m o autor também quantificou valores de estoque de C-FAH em SPD22 semelhante à área de pastagem cultivada por 39 anos, com variação positiva em comparação à área de mata. Com relação aos resultados de C-FAH, a maior homogeneidade na distribuição desse atributo em profundidade para os agregados fisiogênicos na área sob SPD6CR (Tabela 12), evidencia a presença de carbono em frações menos solúveis e lábeis (comparada ao C-FAF), que se destaca em diversos processos do solo, como na agregação e ciclagem de nutrientes.

Para o C-FAH somente foram verificadas diferenças entre os tipos de agregados na primeira camada, sendo constatados os maiores teores nos biogênicos das áreas de SPD6BR e SPD18MI em comparação aos agregados da via fisiogênica (Tabela 12). Tais resultados indicam que os agregados biogênicos dessas áreas estão acumulando mais carbono em estruturas orgânicas mais recalcitrantes do que os agregados fisiogênicos. Diversos outros trabalhos têm evidenciado diferenças nos teores de C-FAH entre os tipos de agregados, em especial a agregação biogênica (LOSS et al., 2014; MERGEN JUNIOR et al., 2014; FERNANDES et al., 2017; VENTURA et al., 2018; MELO et al., 2019; FERREIRA et al., 2020), semelhantes as observadas nesse estudo.

Os maiores teores de C-FAH nos agregados biogênicos na camada de 0,00-0,05 m nas áreas de SPD6BR e SPD18MI em relação aos fisiogênicos (Tabela 12), podem ser explicados pelas melhores condições ambientais proporcionadas a atividade biológica, intensificando o processo de humificação e contribuindo assim para a formação de substâncias húmicas com maior grau de condensação, como os ácidos húmicos (STEVENSON, 1994). Além disso, para Loss et al. (2013 a), a formação das substâncias húmicas é mais intensa na superfície do solo, em virtude da incorporação do material vegetal e à ausência de revolvimento do mesmo. Para Ferreira et al. (2020), as frações ácido fúlvico e ácido húmico, são os compartimentos mais importantes das frações húmicas da MOS em termos de reatividade e ocorrência em ecossistemas, justamente pelo fato de apresentarem menor peso molecular e maior capacidade de troca catiônica (STEVENSON, 1994). Sendo assim, os elevados teores de C-FAH em agregados biogênicos demonstram a importância dos agregados de origem biológica na qualidade química do solo.

Quanto aos teores de C-FHUM, na comparação entre as áreas, nos agregados fisiogênicos do SPD18MI e biogênicos das áreas de SPD6BR, SPD6CR, SPD18MI, SPD18BR e SPD18CR foram quantificados maiores valores de carbono na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 13). Na camada de 0,05-0,10 m, nos agregados fisiogênicos do SPD18CR e biogênicos dos SPD6CR, SPD18BR e SPD18CR foram observados os maiores teores de C-FHUM (Tabela 13). De modo geral, na agregação biogênica nas áreas cobertas com braquiária e crotalária independentemente do período de adoção do sistema, observa-se maior enriquecimento de carbono nessa fração até 0,10 m de profundidade.

Os maiores teores de C-FHUM nos agregados biogênicos nas áreas de SPD6CR, SPD18BR e SPD18CR na camada 0,00-0,10 m (Tabela 13) são concordantes aos dados verificados por Pereira et al. (2012) nas camadas de 0,00-0,025 m para a área de soja e 0,10-0,20 m para a área de milho. Os autores também observaram ao comparar as coberturas vegetais à área de SPC, que na área de braquiárias foram quantificados maiores estoques de C-FHUM em comparação ao SPC, independentemente da cultura econômica avaliada (milho e soja). Esses resultados indicam que as braquiárias são mais eficientes em aumentar os estoques de C-FHUM em áreas de SPD em solos do Cerrado, através da adição de palhada com elevada relação C/N.

Maiores estoques de C-FHUM em sistema braquiária/pecuária na camada de 0,00-0,10 m em comparação à milheto/sem pecuária foram constatados por Loss et al. (2013 a). Segundo os autores, a taxa de decomposição mais lenta dos resíduos orgânicos do sistema braquiária/pecuária em relação à milheto/sem pecuária, é mais eficaz em promover a formação e estabilização do carbono na fração humina. Para os resultados de C-FHUM nos agregados biogênicos do SPD6CR, observa-se padrão semelhante entre as variáveis COT (Figura 11), C-FAF (Tabela 11), na camada de 0,05-0,10 m.

Tabela 13. Carbono orgânico da fração humina (C-FHUM) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Áreas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPD6MI	3,07 B ^{ns}	3,43 B ^{ns}	2,32 B ^{ns}	2,63 B ^{ns}
SPD6BR	3,84 AB b	4,99 A a	3,58 AB ^{ns}	4,09 AB ^{ns}
SPD6CR	3,82 AB b	5,28 A a	3,40 AB b	4,67 A a
SPD18MI	4,48 A b	5,50 A a	3,10 AB ^{ns}	4,16 AB ^{ns}
SPD18BR	4,02 AB b	5,18 A a	3,20 AB b	4,72 A a
SPD18CR	3,61 AB b	5,39 A a	3,68 A ^{ns}	4,43 A ^{ns}
CV1 %	12,9		25,8	
CV2 %	15,0		25,4	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais.

Tendência de aumento dos teores e estoques de C-FHUM em função do tempo de adoção do SPD, com o mesmo padrão do COT, porém de maneira mais lenta e gradual, especialmente em comparação entre as áreas de SPD após 22 anos (fase de manutenção) e 6 anos (fase de transição) de adoção foi verificado por Rosset (2015). Para as diferentes vias de formação dos agregados, Ferreira et al. (2020) quantificaram maiores teores de C-HUM em SPD após 23 anos (fase de manutenção) em comparação aos de 7 (fase de transição) e 14 anos (fase de consolidação) para as duas épocas de amostragem.

Na comparação entre as vias de formação, nos agregados biogênicos das áreas SPD6BR, SPD6CR, SPD18MI, SPD18BR, SPD18CR (0,00-0,05 m), SPD6CR e SPD18BR (0,05-0,10 m) foram quantificados teores mais elevados de C-FHUM em relação aos fisiogênicos (Tabela 14). Esses resultados corroboram aos encontrados por Loss et al. (2014), Mergen Junior et al. (2014), Fernandes et al. (2017), Ventura et al. (2018) e Melo et al. (2019).

A maior concentração de C-FHUM em agregados biogênicos pode ser atribuída a ação das raízes, e principalmente da fauna edáfica. Para Fernandes et al. (2017), a presença da macrofauna edáfica, em especial as minhocas, têm ação direta sobre a ciclagem biogeoquímica no solo (JOUQUET et al., 2006), afetando positivamente a ecologia do processo de humificação. Os maiores teores de C-FAH e C-FHUM nos agregados biogênicos verificados, podem estar relacionados ao favorecimento que essa classe apresenta durante a sua formação,

bem como, a capacidade que esses agregados também apresentam de proteção e estabilização das substâncias húmicas, favorecendo assim o acúmulo dessas frações. Silva Neto et al. (2016), sugerem que essa classe de agregados é mais eficiente em termos de estabilidade estrutural do solo e sequestro de carbono.

4.5.4. Carbono orgânico das frações particuladas, associadas aos minerais e leve livre

Os resultados de carbono orgânico das frações físicas da MOS são apresentados nas Tabelas 14, 15 e 16.

Os mecanismos de estabilização da MOS estão relacionados à sua composição e arranjo estrutural (recalcitrância da biomolécula), à sua proteção física por oclusão em agregados do solo e da estabilidade química devido à sua interação com componentes minerais do solo (matéria orgânica associado aos minerais ou fração pesada da MOS) (CONCEIÇÃO et al., 2008). Nesse sentido, a proteção física em agregados, a qual, juntamente com a recalcitrância da biomolécula (matéria orgânica particulada ou fração leve, dependendo do tipo de fracionamento físico da MOS utilizado) são mecanismos importantes de estabilização da matéria orgânica em solos brasileiros sob sistemas de manejo sem ou com o mínimo de revolvimento do solo.

Nos agregados fisiogênicos do SPD6CR e biogênicos do SPD18MI na camada de 0,00-0,05 foram observados teores mais elevados de COP na comparação entre as áreas (Tabela 14), contudo não foram verificadas diferenças na camada subjacente (Tabela 14). O enriquecimento dessa fração foi verificado nos agregados fisiogênicos na área coberta com crotalária com menor tempo de instalação do sistema, e nos biogênicos em milho com maior.

Tabela 14. Carbono orgânico particulado (COP) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Áreas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPD6MI	1,58 B ^{ns}	2,19 B ^{ns}	1,44 ^{NS ns}	1,94 ^{NS ns}
SPD6BR	1,90 AB b	2,73 AB a	2,04 ^{NS ns}	2,35 ^{NS ns}
SPD6CR	2,91 A ^{ns}	2,95 AB ^{ns}	2,05 ^{NS ns}	2,15 ^{NS ns}
SPD18MI	1,48 B b	3,60 A a	1,54 ^{NS b}	2,52 ^{NS a}
SPD18BR	2,34 AB ^{ns}	3,00 AB ^{ns}	1,79 ^{NS b}	2,95 ^{NS a}
SPD18CR	1,95 AB ^{ns}	2,33 B ^{ns}	1,82 ^{NS ns}	2,26 ^{NS ns}
CV1 %	25,0		28,1	
CV2 %	29,6		25,8	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais.

Na camada de 0,00-0,20 m, no Cerrado mineiro, Pereira et al. (2012) quantificaram os maiores estoques de COP em área de plantio de milho com crotalária e na área de pousio, e para a cultura da soja com milho e braquiária como plantas de cobertura. Tais resultados podem

ter ocorrido devido ao balanço na relação C/N final da mistura dos resíduos das plantas de cobertura com a cultura econômica, ocasionado o aumento dos estoques de COP em comparação à áreas somente cultivadas com gramíneas (milheto ou milho) e leguminosas (soja ou crotalária). Avaliando os teores de COP em diferentes tipos de agregados em Latossolo Vermelho Eutrófico, Batista (2015) observou que os agregados biogênicos apresentaram os maiores teores de carbono nessa fração nos tratamentos milho-milho, soja/milho-milho e soja/milho-crotalária, provavelmente devido à atuação das raízes de milho, principalmente nos primeiros centímetros de solo.

Para Pereira et al. (2012), o aumento nos teores de COP é geralmente verificado em áreas com leguminosas e gramíneas, uma vez que a fixação biológica de nitrogênio (FBN) realizada pelas leguminosas contribui para o crescimento e desenvolvimento das gramíneas, que por sua vez reage com maior produção de fitomassa e, conseqüentemente, quantidades maiores de matéria seca são introduzidas ao solo. Assim, parte desse material, no decorrer do processo de decomposição da MOS, será transformado em COP. Vale ressaltar ainda, que os resultados de COP nos agregados biogênicos do SPD18MI são concordantes aos dados de COT (Figura 11), em que foi verificado padrão similar entre as variáveis na camada de 0,00-0,05 m, provavelmente em função das características inerentes à cultura do milheto já discutidas anteriormente.

Avaliando a sazonalidade, Ferreira et al. (2020), na estação seca quantificaram teores mais elevados de COP em agregados fisiogênicos, intermediários e biogênicos em SPD após 23 anos de instalação (fase de manutenção) em comparação aos outros sistemas. Segundo os autores, tais resultados ocorreram pelo fato dos solos sob SPD permanecerem com o mínimo de perturbação e com fornecimento constante de resíduos orgânicos. Assim os agregados ficam mais preservados, possibilitando maior proteção do carbono nessa fração da MOS.

Reflexos do acúmulo de palhada na superfície do solo, associado a mínima perturbação do sistema proporcionaram maiores teores de COP em área de mata, seguida das áreas de SPD em fase de manutenção e pastagem para a camada de 0,00-0,10 m em estudos de Rosset (2015). Elevados teores de COP em área de SPD com ILP em comparação à área de SPD sem ILP na camada de 0,10-0,20 m, e teores similares entre essas áreas na camada de 0,20-0,40 m foram verificados por Loss et al. (2013 b). Esse atributo pode, portanto, ser considerado um bom indicador da qualidade do solo.

Na comparação entre os tipos de agregados, nos agregados biogênicos das áreas de SPD6BR e SPD18MI (0,00-0,05 m), SPD18MI e SPD18BR (0,05-0,10 m) foram quantificados os teores mais elevados de COP em relação aos agregados formados pela via fisiogênica (Tabela 14). Os resultados de COP assemelham-se aos observados por Pulleman et al. (2005), Loss et al. (2014), Batista (2015), Rossi et al. (2016) e Schultz et al. (2019). Os maiores teores de COP nos agregados biogênicos indicam predominância de material de maior labilidade (maior disponibilidade) em comparação aos agregados fisiogênicos (LOSS et al., 2014), sendo que a incorporação ou manutenção desse material é favorecida em agregados biogênicos em virtude da fauna do solo e das raízes dos vegetais (LOSS et al., 2014; MERGEN JUNIOR et al., 2019 a). Tais resultados indicam que os agregados biogênicos podem proporcionar maior proteção dessa fração física da MOS.

Em relação aos teores de carbono orgânico associado aos minerais (COAM), na comparação entre as áreas, nos agregados fisiogênicos do SPD18MI e biogênicos dos SPD18MI e SPD18CR foram observados os maiores teores dessa fração na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 15). Já para a camada subjacente, nos agregados biogênicos do SPD6CR foram verificados teores mais elevados de COAM (Tabela 15).

Nos estudos de Batista (2015) e Rosset (2015), não foram verificadas diferenças nos teores de COAM entre os sistemas avaliados. Ferreira et al. (2020), em seu estudo observaram

na estação chuvosa maiores teores de COAM nas áreas de floresta e SPD após 23 anos de adoção nos diferentes tipos de agregados. As condições climáticas favoráveis associada à elevada disponibilidade de fontes de alimentos encontradas em sistemas com maior tempo de adoção, contribuem para que o ambiente edáfico passa a abrigar comunidades mais complexas de indivíduos da fauna do solo, inclusive organismos decompositores (FERREIRA et al., 2020). Esses organismos convertem o COP em CO₂ e formas de carbono mais estável no solo.

Maiores estoques de COAM, na camada de 0,10-0,20 m, em áreas de plantio de milho e soja sobre resíduos de milho e braquiária, respectivamente foram observados por Pereira et al. (2012). Segundo os autores, tais resultados demonstram que a utilização de plantas de cobertura (gramíneas e leguminosas) antes do plantio de culturas de interesse econômico no Cerrado sob SPD, favorece o aumento dos estoques de COAM. Segundo Loss et al. (2013 b), gramíneas (milho e braquiária) em SPD ou SPD-ILP, combinadas com a ação dos óxidos de Fe e Al podem promover a formação de microagregados padrão verificado em maior intensidade no Cerrado. Nesse sentido, o aumento da proporção de microagregados também aumenta os teores de COAM neles contidos.

Tabela 15. Carbono orgânico associado aos minerais (COAM) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Áreas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPD6MI	6,58 B ^{ns}	6,56 B ^{ns}	6,75 ^{NS ns}	6,62 AB ^{ns}
SPD6BR	6,56 B ^{ns}	7,51 AB ^{ns}	6,10 ^{NS ns}	5,85 B ^{ns}
SPD6CR	6,59 B ^{ns}	7,25 AB ^{ns}	7,06 ^{NS ns}	7,68 A ^{ns}
SPD18MI	9,65 A ^{ns}	8,50 A ^{ns}	6,74 ^{NS ns}	6,44 AB ^{ns}
SPD18BR	6,87 B ^{ns}	7,22 AB ^{ns}	6,60 ^{NS ns}	5,55 B ^{ns}
SPD18CR	7,15 B b	8,85 A a	5,50 ^{NS ns}	5,07 B ^{ns}
CV1 %	12,0		12,0	
CV2 %	14,3		15,1	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais.

No que tange os resultados de COAM, os teores de carbono quantificados nos dois tipos de agregados na área de SPD18MI na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 15), evidenciam a presença de carbono em frações mais recalcitrantes em função do maior tempo de adoção do SPD associado a uma cobertura vegetal com menor velocidade de decomposição de seus resíduos. Já para os teores de COAM nos agregados biogênicos na área de SPD6CR, observou-se similaridade entre as variáveis COT (Figura 11), C-FAF (Tabela 11) e C-FHUM (Figura 13), na camada de 0,05-0,10 m.

Para COAM, somente foram verificadas diferenças entre as vias de formação na primeira camada, na qual nos agregados biogênicos da área de SPD18CR quantificaram-se os

maiores teores dessa fração quando comparados aos agregados fisiogênicos (Tabela 15). Esses resultados podem estar relacionados com a capacidade que a agregação biogênica apresenta de proteção e estabilização física das frações mais lábeis da MOS, como o COP. Os maiores teores de COAM em agregados biogênicos são concordantes aos dados de C-FHUM (Tabela 13) para o mesmo tipo de agregado, indicando que essa classe é mais favorecida no processo de formação das frações mais estáveis da MOS.

Outros autores também verificaram que nos agregados biogênicos foram quantificados maiores teores de COAM, quando comparados aos fisiogênicos (PULLEMAN et al., 2005; LOSS et al., 2014; BATISTA, 2015; ROSSI et al., 2016; SCHULTZ et al., 2019; FERREIRA et al., 2020). Comparando as vias de formação, Ferreira et al. (2020) observaram diferenças nos teores de COAM somente na estação chuvosa, com maiores valores dessa fração nos agregados biogênicos. Os autores justificaram tais resultados ao aumento da atividade biológica durante essa época do ano. Entretanto, vale ressaltar que nem sempre o COAM funciona como um bom indicador na mensuração da qualidade edáfica, uma vez que alterações nos teores desse compartimento da MOS demoram muitos anos para serem observadas (CARMO et al., 2012), em virtude do elevado grau de estabilidade dessa fração física da MOS.

Para o carbono orgânico da fração leve-livre (CFLL), na comparação entre as áreas, na camada de 0,00-0,05 m não foram verificadas diferenças (Tabela 16). Já na camada subjacente (0,05-0,10 m), nos dois tipos de agregados do SPD18MI foram encontrados os maiores teores de CFLL (Tabela 16). Constatou-se que as ambas as vias de formação da área coberta por gramíneas em SPD em fase de consolidação, apresentaram maior enriquecimento nos valores de carbono nessa fração.

As frações lábeis da MOS são fundamentais para a ciclagem de carbono entre os compartimentos e de nutrientes em curto espaço de tempo, além da sua notável contribuição para a formação e estabilização dos agregados do solo (SANTOS et al., 2013).

Tabela 16. Carbono orgânico da fração leve-livre (CFLL) de agregados fisiogênicos e biogênicos em áreas sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes tempos de instalação e coberturas vegetais no bioma Cerrado, Uberaba-MG.

Áreas	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	Fisiogênicos	Biogênicos	Fisiogênicos	Biogênicos
	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
SPD6MI	0,56 ^{NS} b	0,80 ^{NS} a	0,46 AB b	0,75 B a
SPD6BR	0,46 ^{NS} b	0,68 ^{NS} a	0,46 AB b	0,65 BC a
SPD6CR	0,32 ^{NS} b	0,67 ^{NS} a	0,33 B b	0,57 BC a
SPD18MI	0,42 ^{NS} b	0,69 ^{NS} a	0,58 A b	1,01 A a
SPD18BR	0,44 ^{NS} b	0,88 ^{NS} a	0,23 C b	0,44 C a
SPD18CR	0,48 ^{NS} b	0,78 ^{NS} a	0,51 AB ^{NS}	0,59 BC ^{NS}
CV1 %	19,6		24,1	
CV2 %	28,5		23,1	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem as áreas amostrais para o mesmo tipo de agregado, mesma letra minúscula na linha não diferem os tipos de agregados para a mesma área amostral (Tukey, a 5% de probabilidade). SPD6MI: 6 anos + Milheto; SPD6BR: 6 anos + Braquiária; SPD6CR: 6 anos + Crotalária; SPD18MI: 18 anos + Milheto; SPD18BR: 18 anos + Braquiária; SPD18CR: 18 anos + Crotalária; CV1: Coeficiente de variação os tipos de agregados; e CV2: Coeficiente de variação entre as áreas amostrais.

Avaliando a distribuição e os teores da matéria orgânica leve (MOL) em agregados de em Latossolo Vermelho sob áreas de SPD à 17 anos instalado, com integração lavoura-pecuária (ILP) (SPD-ILP) e sem a integração (SPD sem ILP) e uma área de Cerrado, Loss et al. (2011) observaram na camada de 0,05-0,10 m a área de SPD-ILP valores semelhantes aos da área de Cerrado, e maiores valores que a área de SPD sem ILP. Os resultados mostraram que para a camada de 0,05-0,10 m, a ILP contribuiu com o aporte de resíduos das raízes em subsuperfície e a renovação do sistema radicular, assim, o aporte equiparou-se ao da serapilheira produzida na área de Cerrado, e foi mais eficiente que o da área em SPD sem ILP em aumentar os teores de MOL. Tais resultados assemelham-se aos observados no estudo para o CFLL em subsuperfície.

Na comparação entre as vias de formação, em quase todas as áreas, exceto SPD18CR, nos agregados biogênicos foram quantificados teores mais elevados de CFLL quando comparados aos fisiogênicos para as duas camadas (Tabela 16). Os resultados de CFLL nos agregados biogênicos corroboram aos dados de COP (Tabela 14), provavelmente em função da maior labilidade em ambas as frações. A similaridade das estruturas orgânicas presentes na matéria orgânica particulada e na fração leve da MOS foi comprovada por Conceição et al. (2007) com análise de microscopia óptica. Os autores demonstraram que ambas as frações são constituídas basicamente de fragmentos de raízes e organismos da fauna do solo, hifas e resíduos de plantas em decomposição. Nesse estudo, os resultados de CFLL e COP podem estar relacionados com o potencial emprego dos agregados no sequestro de carbono, na qual o tipo de carbono estocado pelos agregados biogênicos é mais solúvel em relação ao carbono mais recalcitrante estocado em agregados formados pela via fisiogênica (PINTO et al., 2019).

4.6. CONCLUSÕES

O uso de gramíneas, em especial as braquiárias, como plantas de cobertura em sistema plantio direto após 6 e 18 anos de adoção favorece a formação de agregados da via biogênica e os mesmos alteram a compartimentalização da MOS.

Nos agregados biogênicos foram quantificados os maiores teores de COT, C-FAH, C-FHUM, COP, COAM e CFLL, principalmente em áreas cobertas com milho e crotalaria em sistemas em fase de consolidação e transição, respectivamente. Os agregados biogênicos foram os mais influenciados e beneficiados pelos mecanismos de estabilização das diferentes frações do material orgânico.

4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. T.; TORRES, J. L. R.; PAES, J. M. V.; TEIXEIRA, C. M.; CONDE, A. B. T. Desafios do Sistema de plantio direto no Cerrado. **Infor. Agrop.**, v. 39, p. 19-26, 2018.

BATISTA, I. **Relação entre macrofauna, agregação e atributos edáficos em sequência de culturas sob plantio direto**. 2015. 94p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 2015.

BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. **Semina. Ciências Agrárias**. v. 33, p.1-10, 2013.

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

BOER, C. A.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAGA, A. J.; BRAZ, P.; BARROSO, A. L. L.; FILHO, A. C.; PIRES, F. R. Biomassa, decomposição e cobertura do solo ocasionada por resíduos culturais de três espécies vegetais na região Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 843-851, 2008.

BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Albrighton, England: Waine Research Publications. 152 p. 1985.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, v. 56, p. 449-457, 1993.

CÉCILLON, L.; MELLO, N. A.; DANIELI, S.; BRUN, J. Soil macroaggregate dynamics in a mountain spatial climate gradient. **Biogeochemistry** 97, 31-43, 2009.

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. Eficiência do politungstato de sódio no fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Voçosa-MG, vol. 31, p. 1301-1310, 2007.

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Voçosa-MG, vol. 32, núm. 2, pp. 541-549, 2008.

FERNANDES, J. C. F.; PEREIRA, M. G.; SILVA NETO, E. C. D. A.; CORREA NETO, T. A. Characterization of biogenic, intermediate and physicogenic soil aggregates of areas in the Brazilian Atlantic Forest. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 59-67. 2017.

FERREIRA, C. R.; SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil Till. Res.**, 198, 2020.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; CUNHA, T. J. F.; SALTON, J. C. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 5, p. 847-853, 2006.

LAL, R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Glob. Change Biol.**, v. 24, n. 8, p. 3285-3301, 2018.

LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; DOS SANTOS, E.; MERGEN, C. A.; BENEDET, L.; PEREIRA, M. G.; PICCOLO, M. C.; BRUNETTO, G.; LOVATO, P. E.; COMIN, J. J. Carbon, nitrogen and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in biogenic and physicogenic aggregates in a soil with 10 years of pig manure application. **Soil and Tillage Research**, 166, p. 52-58, 2017.

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

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; BEUTLER, S. J.; ANJOS, L. H. C. Oxidizable carbon and humic substances in rotation systems with brachiaria/ livestock and pearl millet/no livestock in the Brazilian Cerrado. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 217-231, 2013 a.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; COUTINHO, F. S.; ANJOS, L. H. C. Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v. 50, p. 685-693, 2013 b.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. L.; BEUTLER, S. J. Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ^{13}C and ^{15}N abundance in biogenic and physicogenic aggregates in areas under different land use systems. **Soil Research**, v. 52, p. 685-697, 2014.

MELO, T. R.; PEREIRA, M. G.; BARBOSA, G. M. C.; SILVA NETO, E. C.; ANDRELLO, A. C.; FILHO, J. T. Biogenic aggregation intensifies soil improvement caused by manures. **Soil Till. Res.**, v. 190, p. 186-193, 2019.

MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E.; FERREIRA, G. W.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E.; BRUNETTO, G. Atributos químicos em agregados biogênicos e fisiogênicos de solo submetido à aplicação com dejetos suínos. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, Recife, v. 14, n. 1, e5620, 2019 b.

MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; SANTOS JUNIOR, E.; GIUMBELLI, L. D.; PINHO, D.; ABREU, L.; LOURENZI, C. R.; COMIN, J. J.; BRUNETTO, G. Caracterização física de agregados do solo submetido a 10 anos de aplicação de dejetos suínos. **Revista de Ciências Agrícolas**, v. 36, n. 1, p. 79-92, 2019 a.

MERGEN JUNIOR, C. A.; LOSS, A.; COMIN, J. J.; FREO, V. A.; PEREIRA, M. G.; BRUNETTO, G. Carbono das substâncias húmicas em agregados biogênicos e fisiogênicos sob aplicação continuada de dejetos suínos. In: Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo, 10., 2014, Pelotas-RS. **Anais...** Pelotas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2014.

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J., TORRES, J. L. R. Granulometric and humic fractions carbon stocks of soil organic matter under no-tillage. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 15, p. 1-13, 2012.

PINTO, L. A. S. R.; MENDONÇA, O. V. T.; ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; BARROS, F. C. Evolución y acumulación de C-CO₂ en agregados biogénicos y fisiogénicos presentes en diferentes tipos de manejos agroecológicos. **Rev. Acta Agron.** 67: 494-500, 2018.

PULLEMAN, M. M.; SIX, J.; MARINISSEN, J. C. Y.; JONGMANS, A. G.; Earthworms and management affect organic matter incorporation and microaggregate formation in agricultural soils. **Applied Soil Ecology** Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 1-15, 2005.

ROSSET, J. S. **Caracterização da matéria orgânica, atributos químicos e físicos do solo sob diferentes sistemas de manejo na região oeste do Paraná.** 2015. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Candido Rondon, 2015.

ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M.; SEIDEL, E. P. Estoque de carbono, propriedades químicas e físicas do solo em sistemas de manejo com diferentes tempos de implantação na Região Oeste do Paraná, Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.35, n. 6, p. 3053-3072, 2014.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Estoque de carbono e atributos físicos de um Latossolo em cronosequência sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 252-258, 2015.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; MOURA, O. V. T.; ALMEIDA, A. P. C. Vias de formação, estabilidade e características químicas de agregados em solos sob sistemas de manejo agroecológico. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 51, n. 9, p.1677-1685, 2016.

SANTOS, D. C.; FARIAS, M. O.; LIMA, C. L. R.; KUNDE, R. J.; CLENIO NAILTO PILLON, C. N.; FLORES, C. A. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v. 43, p. 838-844, 2013.

SCHULTZ, N.; PINTO, L. A. S. R.; LIMA, S. S.; ZIVIANI, M. M; ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G. Agregação do solo e atributos químicos em áreas com diferentes coberturas vegetais In: **Características do Solo e sua Interação com as Plantas**, 2 ed.: Atena Editora, v 2, p. 1-12, 2019.

SILVA NETO, E. C; PEREIRA, M. G; FERNANDES, J. C. F; CORRÊA NETO, T. A. Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation types in Atlantic Forest from Southeastern Brazil. **Semina: Ciência agrárias**. Londrina, v. 37, n. 6, p. 3927-3940, 2016.

SILVA NETO, L. F; SILVA, I. F; INDA, A. V; NASCIMENTO, P. C; BORTOLO, L. Atributos físicos e químicos de agregados pedogênicos e de coprólitos de minhocas em diferentes classes de solos da Paraíba. **Ciência Agrotécnica**. v. 34, n. 6, p. 1365-1371, 2010.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research**, v. 79, p. 7-31, 2004.

SOHI, S. P.; MAHIEU, N.; ARAH, J. R. M.; POWLSON, D. S.; MADARI, B.; GAUNT, J. L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Science Society American Journal**, v. 65, p. 1121-1128, 2001.

TORRES, J. L. R.; CUNHA, M. A.; PEREIRA, M. G.; VIEIRA, D. M. S. Cultivo de feijão e milho em sucessão a plantas de cobertura. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 4, p. 117-125, 2014

TORRES, J. L. R.; MAZETTO JÚNIOR, J. C.; SILVA JÚNIOR, J.; VIEIRA, D. M. S.; SOUZA, Z. M.; ASSIS, R. L.; E. M. LEMES, E. M. Soil physical attributes and organic matter accumulation under no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Research**, v. 57, p.712-718, 2019.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Dificuldades e soluções da semeadura direta no Cerrado. **A Granja**, Porto Alegre, n. 770, p. 61-63, fev. 2013.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, n. 29, p. 609-618, 2005.

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**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 421-428, 2008.

VENTURA, B. S.; LOSS, A.; GIUMBELLI, L. D.; FERREIRA, G. W.; BUENO, A. C.; LOURENZI, C. R.; COMIN, J. J.; BRUNETTO, G. Carbon, nitrogen and humic substances in biogenic and physicogenic aggregates of a soil with a 10-year history of successive applications of swine waste. **Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v.21, p.329-343, 2018.

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

5. CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados de MOS nos tipos morfológicos de agregados foram influenciados pelos diferentes tempos de implantação dos SPDs e suas coberturas vegetais.

As frações químicas e físicas da matéria orgânica (lábeis e recalcitrantes) foram quantificadas em maiores concentrações, em geral, nos agregados biogênicos.

Foi evidenciado o favorecimento que a agregação biogênica promove nas diferentes frações da MOS no decorrer da sua gênese (ação cimentante). Ressalta-se ainda que a agregação biogênica também pode contribuir mais efetivamente na proteção física (por oclusão), na estabilização (mecanismos) e no acúmulo (sequestro de carbono) dessas frações.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fica evidente a importância da adoção de sistemas de manejo do solo dentro da ótica da agricultura conservacionista, como o sistema plantio direto em áreas de produção agrícola no bioma Cerrado. Esse sistema, quando manejado corretamente, promove melhorias na qualidade física, química e biológica do solo ao longo do tempo, sendo algumas destas observadas nesse estudo. Essas melhorias são decorrentes da adição e manutenção de cobertura vegetal sobre a camada superficial do solo e sua constante decomposição/mineralização, ocasionando ao longo do tempo, aumento dos teores e estoques de carbono orgânico e da formação e estabilidade dos agregados.

Sistemas de manejo que promovam, simultaneamente, a deposição contínua de resíduos orgânicos (plantas de coberturas e culturas econômicas), cobertura permanente da camada superficial e o não (ou mínimo) revolvimento do solo, proporcionam condições ambientais favoráveis aos agentes biológicos, responsáveis pela formação de agregados biogênicos. Conseqüentemente, reduzindo a diferença percentual entre agregados fisiogênicos e biogênicos nas camadas superficialmente manejadas, e favorecendo a uma distribuição próxima ou até mesmo semelhante a encontrada em ambientes sem ação antrópica.

Diferentes sistemas de manejo do solo, coberturas vegetais e tempos de adoção de sistemas plantio direto, afetaram a quantidade de matéria orgânica do solo presente nos agregados.

A partir das informações obtidas nesse estudo, são necessárias novas pesquisas sobre a composição dos resíduos vegetais adicionados, da origem do carbono armazenado nos agregados, das propriedades do solo (textura, p. ex.) e do tipo de sistema de manejo em outros biomas, assim como estudos sobre os fatores que influenciem na formação dos agregados e na proteção da matéria orgânica presente nos mesmos.

7. ANEXOS

7.1. Diferentes Sistemas de Manejo Estudados no Cerrado Mineiro, Uberaba

(A)



(B)



Figura 12. Área de cerrado, visão interna (A) e externa (B), Uberaba-MG. **Fotos:** José Luiz Rodrigues Torres, 2019.

(C)



(D)



Figura 13. Área de plantio convencional (SPC20) (C) e cobertura de milho utilizada como planta de cobertura nas áreas de plantio direto (D) SPD6 e SPD18. **Fotos:** José Luiz Rodrigues Torres, 2019.

(E)



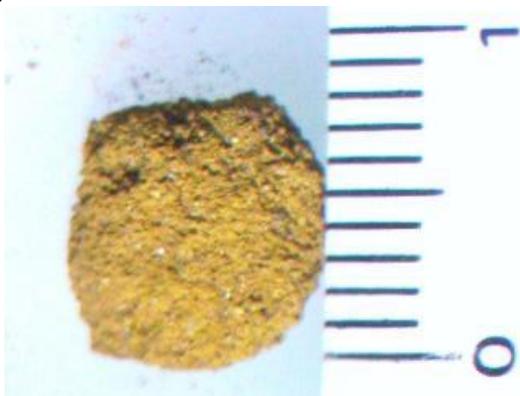
(F)



Figura 14. Plantas de cobertura braquiária (E) e crotalária (F) utilizadas nas áreas de SPD6 e SPD18. **Fotos:** José Luiz Rodrigues Torres, 2019.

7.2. Exemplos da Diferenciação dos Agregados de 8,0 mm Através de seus Padrões Morfológicos nos Sistemas de Manejo Estudados no Cerrado mineiro, Uberaba

(A)



(B)



Figura 15. Agregado fisiogênico sob AC (A) e Agregado biogênico sob AC (B). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.

(C)



(D)



Figura 16. Agregado fisiogênico sob SPC20 (C) e Agregado biogênico sob SPC20 (D). Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.

(E)



(F)



Figura 17. Agregado fisiogênico sob SPD6BR (E) e Agregado biogênico sob SPD6BR (F).
Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.

(G)



(H)



Figura 18. Agregado fisiogênico sob SPD6CR (G) e Agregado biogênico sob SPD6CR (H).
Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.

(I)



(J)



Figura 19. Agregado fisiogênico sob SPD6MI (I) e Agregado biogênico sob SPD6MI (J).
Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.

(L)



(M)

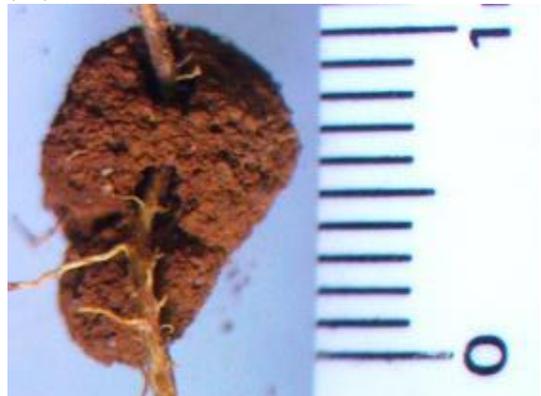


Figura 20. Agregado fisiogênico sob SPD18BR (L) e Agregado biogênico sob SPD18BR (M).
Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.

(N)



(O)



Figura 21. Agregado fisiogênico sob SPD18CR (N) e Agregado biogênico sob SPD18CR (O).
Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.

(P)



(Q)



Figura 22. Agregado fisiogênico sob SPD18MI (P) e Agregado biogênico sob SPD18MI (Q).
Fotos: Igor Sousa Morais, 2020.