

UFRRJ

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

DISSERTAÇÃO

**Agregação como Indicadora de Qualidade do Solo
em Áreas Sob Diferentes Usos e Manejos**

Renato Siquini de Souza

2021



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

**AGREGAÇÃO COMO INDICADORA DE QUALIDADE DO SOLO EM
ÁREAS SOB DIFERENTES USOS E MANEJOS**

RENATO SINQUINI DE SOUZA

Sob a orientação do Professor

Marcos Gervasio Pereira

e

Coorientação do Professor

Jean Sérgio Rosset

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
Agosto de 2021

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

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

S719a	<p>Souza, Renato Siquini de, 1993- Agregação como indicadora de qualidade do solo em áreas sob diferentes usos e manejos/Renato Siquini de Souza. – Seropédica, 2021. 49 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, 2021.</p> <p>1. Morfologia dos agregados. 2. Sistema de Plantio Direto. 3. Fracionamento da matéria orgânica. 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

RENATO SINQUINI DE SOUZA

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: 31/08/2021.

Marcos Gervasio Pereira, Dr. UFRRJ
(Orientador)

Itaynara Batista, Dra. UFF

Thadeu Rodrigues de Melo, Dr. UEL

“Se quiser buscar realmente a verdade, é preciso que pelo menos uma vez na vida você duvide, o máximo que puder, de todas as coisas.”

René Descartes

A pessoa mais importante da minha vida, Regina que me ensinou e ajudou a seguir em frente. Meu sincero muito obrigado.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me proporcionado a oportunidade de vivenciar essa experiência e por ter conseguido executar o meu trabalho com êxito.

A minha mãe Regina Cabral pela amizade, companheirismo e amor. Além de ter sido meu principal alicerce, que foi base para meu crescimento e educação, serviu de sustento para que pudesse alcançar meus objetivos. Tenho orgulho de falar que tudo que conquistei foi graças a senhora.

Ao meu amigo e orientador Marcos Gervasio pela ajuda nos trabalhos de campo, no laboratório e na parte da redação e desenvolvimento deste trabalho, e principalmente pelas críticas construtivas.

Ao meu coorientador Jean Rosset e sua família que me cederam suas áreas de cultivo e realizaram a coleta das amostras.

A minha universidade UFRRJ por me acolher e me ensinar a profissão que amo.

Aos laboratórios LGCS, LISA e LIEA que forneceram o material e a estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Luiz Alberto, Otavio Queiroz e Carlos Roberto que me inspiraram e ajudaram a chegar aonde cheguei, e a minha companheira Marina Tavares pelo apoio, amor e compreensão.

A minha família que sempre me apoiou em minhas decisões além de me incentivar sempre, a crescer e correr atrás dos meus sonhos.

Agradeço a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-graduação que tornou todo meu esforço possível, e a CAPES por financiar minha bolsa de estudos.

A Fundação Agrisus pelo apoio financeiro para desenvolvimento do projeto de pesquisa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto de pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia–Ciência do Solo (PPGA-CS/UFRRJ) pelo apoio prestado. Agradeço aos secretários, discentes, docentes, colaboradores, orientadores e coordenadores do programa pelo apoio e por tudo que me ensinaram durante minha jornada.

E a todos que direta ou indiretamente me ajudaram em minha caminhada, o meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

Renato Siquini de Souza, filho de Carlos Joel de Souza e Regina Cabral Siquini, nasceu em 29 de setembro de 1993, na cidade de São José, estado do Santa Catarina. Mudou-se para um sítio em Seropédica ainda com 4 anos de idade, onde passou toda infância em contato com agricultura e pecuária. Após concluir o ensino fundamental, foi estudar no Colégio Estadual Presidente Dutra localizado em frente a UFRRJ para terminar o ensino médio. Em 2011, ingressou no curso de Agronomia da centenária Escola Nacional de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Durante o curso foi bolsista da EMBRAPA no ano de 2016. A partir de 2017, tornou-se bolsista no Laboratório de Gênese e Classificação do Solo (LGCS) sendo orientado pelo professor Marcos Gervasio Pereira até o final do curso de Agronomia. Durante toda graduação trabalhou na área de fertilidade do solo, manejo e qualidade do solo, com ênfase em sistema de produção orgânica. Em março de 2019, ingressou no Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo da UFRRJ.

RESUMO

SINQUINI, Renato de Souza. **Agregação como indicadora de qualidade do solo em áreas sob diferentes usos e manejos**. 49p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Práticas culturais inadequadas na agricultura como o preparo tradicional do solo promovem sua degradação, reduzindo a produtividade da área, sendo o sistema de preparo convencional (SPC) um exemplo destas práticas. O sistema plantio direto (SPD) proporciona a manutenção ou recuperação da qualidade do solo, criando um ambiente favorável ao crescimento vegetal. Diferentes técnicas e indicadores são utilizados na avaliação da qualidade do solo, considerando o manejo empregado e o tipo de solo estudado. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência de diferentes coberturas vegetais e sistemas de plantio, nas vias de formação dos agregados (biogênicos e fisiogênicos) e nos seus atributos químicos e físicos. O estudo foi desenvolvido no município de Guaíra, região oeste do estado do Paraná. Para o estudo foram selecionadas áreas de sistema de preparo convencional (SPC), sistema plantio direto com 6 anos (SPD₆) e 18 anos (SPD₁₈) de instalação, pastagem permanente (PP) com 45 anos de instalação e mata nativa (MN). Em cada área foram coletados 4 torrões (amostras indeformadas) nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m de profundidade, as amostras foram secas ao ar e os agregados foram separados através de leve pressão entre os dedos. Os agregados foram classificados segundo sua via de formação como biogênicos ou fisiogênicos, sendo realizada a caracterização dos atributos químicos, estabilidade dos agregados, fracionamento granulométrico e densimétrico dos agregados e abundância do carbono (¹³C). Na área de SPC observaram-se valores de pH inferiores nas duas classes de agregados, sendo que nos agregados biogênicos verificaram-se os menores teores de cálcio (Ca⁺²). Na área SPD₁₈ verificou-se que, para as diferentes vias de formação, ocorreu aumento no conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS), sendo os valores quantificados semelhantes aos observados na área MN, além de serem verificados incrementos nos teores de carbono orgânico total (COT) e nas frações lábeis e recalcitrantes da MOS quando comparado ao SPC. A análise multivariada evidenciou a separação dos sistemas avaliados em diferentes grupos, sendo observado o distanciamento da área de SPC das áreas de SPD e MN.

Palavras-chave: Morfologia dos agregados. Sistema de Plantio Direto. Fracionamento da matéria orgânica.

ABSTRACT

SINQUINI, Renato de Souza. **Soil aggregation as a quality indicator in areas under different forms of use and vegetation cover.** 49p. Dissertation (Masters in Agronomy, Soils Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Inadequate cultural practices in agriculture such as traditional soil preparation promote their degradation, reducing the productivity of the area, and the conventional planting system (CT) is an example of these practices. The no-tillage system (NT) provides maintenance or recovery of soil quality, creating an environment favorable to plant growth. Different techniques and indicators are used in the assessment of soil quality, considering the management used and the type of soil studied. The objective of this study was to evaluate the influence of different vegetation coverings and planting systems on the chemical, physical attributes and on the formation pathways of the aggregates (biogenic and physiogenic). The study was carried out in the municipality of Guará, Paraná. For the study, conventional tillage areas (SPC), no-tillage system with 6 years (SPD6) and 18 years (SPD18) of installation, permanent pasture (PP) with 45 years of installation and native forest (MN) were selected. In each area, 4 clods (undisturbed samples) were collected in the 0,00-0.05 and 0.05-0.10 m layers, the samples were air-dried and the aggregates were separated by light pressure between the fingers. The aggregates were screened and classified according to their formation pathway as biogenic or physiogenic, with the characterization of the chemical attributes, stability of the aggregates, granulometric and densimetric fractionation of the aggregates and abundance of ^{13}C being carried out. In the SPC area, lower pH values were observed in the two types of aggregates, whereas in the biogenic aggregates, the lowest (Ca^{+2}) levels were found. In the SPD area, after eighteen years of installation, it was found that for the different formation pathways, there was a greater contribution in the soil organic matter stock, the quantified values being similar to those observed in the MN area, in addition to increases in the stocks of total organic carbon and in labile and recalcitrant fractions of soil organic matter when purchased from SPC. The component analysis evidenced the separation of the evaluated systems in different groups, being observed the distance of the SPC area from the SPD and MN areas.

Keywords: Morphology of the aggregates. No-till system. Fractionation of organic matter.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Sistemas de Manejo do Solo.....	3
2.2 O Sistema Plantio Direto e Seus Benefícios.....	4
2.3 Formação de Agregados do Solo e Interações com a MOS	6
2.4 Agregados Biogênicos e Fisiogênicos.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1. Área de Estudo e Amostragem.....	9
3.2 Triagem dos Agregados	12
3.3 Caracterização Morfológica dos Agregados	12
3.4 Textura do Solo	13
3.5 Fertilidade do Solo	13
3.6 Carbono Orgânico Total e Fracionamento Físico da MOS.....	14
3.7 Abundância do ¹³ C	15
3.8 Estabilidade dos Agregados	15
3.9 Análise Estatística	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1 Atributos Físicos.....	17
4.1.1 Morfologia dos Agregados.....	18
4.1.2 Estabilidade dos Agregados	19
4.4 Atributos Químicos	21
4.5 Fracionamento Granulométrico da Matéria Orgânica.....	27
4.6 Fracionamento Densimétrico da Matéria Orgânica.....	30
4.7 Abundância do ¹³ C	33
4.8 Análise de Agrupamentos.....	35
5. CONCLUSÕES	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
7. ANEXOS	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Histórico e descrição das áreas de estudo.	11
Tabela 2. Composição granulométrica (areia, silte e argila) nas áreas submetidas a diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal nas camadas de 0,00 – 0,05 e 0,05 - 0,10 m..	17
Tabela 3. Proporção (%) dos agregados formados pelas vias biogênica e fisiogênica nas camadas de 0,00 – 0,05 e 0,05 - 0,10 m de profundidade.	18
Tabela 4. Diâmetro médio ponderado (DMP) determinado pelo método do tamisamento via úmida para as vias biogênica e fisiogênica nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05 – 0,10 m utilizando agregados de 4 mm.	20
Tabela 5. Atributos de fertilidade do solo nos agregados biogênicos e fisiogênicos nas diferentes áreas estudadas para a camada de 0,00-0,05 m.	23
Tabela 6. Atributos de fertilidade do solo nos agregados biogênicos e fisiogênicos nas diferentes áreas estudadas para a camada de 0,05-0,10 m.	24
Tabela 7. Soma de bases, Valor T e V% nos agregados biogênicos e fisiogênicos nas diferentes áreas estudadas para as camadas de 0,05-0,10 m e 0,05-0,10m.	25
Tabela 8. Teor de carbono orgânico total e das frações granulométricas da matéria orgânica do solo nos agregados biogênicos e fisiogênicos das diferentes áreas estudadas na camada de 0,00-0,05 m.	28
Tabela 9. Teor de carbono orgânico total e das frações granulométricas da matéria orgânica do solo nos agregados biogênicos e fisiogênicos das diferentes áreas estudadas na camada de 0,05-0,10 m.	29
Tabela 10. Massa de material orgânico obtido a partir do fracionamento densimétrico nos agregados biogênicos e fisiogênicos das diferentes áreas estudadas nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m.	31
Tabela 11. Carbono da Fração leve livre (C-FLL) e Fração leve livre intra-agregados (C-FLLI) em agregados biogênicos e fisiogênicos das diferentes áreas estudadas nas camadas de 0,00-0,05m e 0,05-0,10m.	33
Tabela 12. Abundância natural de ¹³ C (%) em agregados biogênicos e fisiogênicos, em diferentes sistemas de uso do solo em Guaíra, PR, nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m.	34

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1-** a. Localização das áreas de estudo no município de Guaíra-PR, Brasil. b. Mini trincheira em que foi realizada a coleta dos torrões nas diferentes áreas. c. SPC. d. PP. e. SPD₆ anos. f. SPD₁₈ anos. g. MN. Fonte: Elaborado pelo autor. Fotos: Jean Sérgio Rosset (2019). 10
- Figura 2-** Valores médios mensais de precipitação pluviométrica, temperaturas médias, máximas e mínimas e umidade relativa no período compreendido entre 1973 a 2011. Fonte: Estação Meteorológica – IAPAR – Unidade de Palotina. 11
- Figura 3-** Esquema da triagem dos agregados; **a.** Torrão; **b.** Peneiras; **c.** Lupa. 12
- Figura 4-** **a.** Agregado fisiogênico e **b.** Agregado biogênico. Fotos: Autor. 13
- Figura 5.** Diâmetro médio ponderado (DMP) via úmida e via seca nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05 – 0,10 m utilizando agregados de 4mm. DMP: Diâmetro Médio Ponderado; SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Valores que apresentaram mesma letra não diferem entre tratamentos para uma mesma profundidade (Bonferroni. $p < 0,05$). CV: Coeficiente de variação. 21
- Figura 6.** Análise de componentes principais dos atributos estudados na camada de 0,00-0,05 m. SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Bio. Agregados biogênicos. Fis. Agregados Fisiogênicos. 36
- Figura 7.** Análise de componentes principais dos atributos estudados na camada de 0,05-0,10 m. SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Bio. Agregados biogênicos. Fis. Agregados Fisiogênicos. 36
- Figura 8.** Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de SPC. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor. 48
- Figura 9.** Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de PP. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor. 48
- Figura 10** Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de SPD₆. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor. 48
- Figura 11.** Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de SPD₁₈. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor. 49
- Figura 12.** Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de MN. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor. 49

1. INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira está em destaque no cenário mundial, como grande exportadora em meio a um cenário de crescimento da população, na qual é previsto pela ONU (2019) um aumento de até 10% da população mundial até 2030. A produção de alimentos deverá acompanhar o aumento populacional de modo que ocorra o aproveitamento do recurso solo de forma sustentável, utilizando-se de formas de manejo adequadas para aumentar a produção minimizando a degradação do solo.

O Bioma Mata Atlântica tem extensão territorial inferior ao bioma Cerrado, se localiza desde o Sul do Brasil até a região Nordeste, tendo área de 1.110.182 km², alta densidade populacional humana e já foi submetida a grandes modificações devido ao avanço da agricultura, sendo o bioma mais ameaçado do Brasil, com apenas 16,6% de sua vegetação original preservada (IBGE, 2020). O manejo do solo adequado para cada bioma deve ser estudado de maneira regionalizada, a fim de se determinar a melhor utilização dos recursos naturais do solo de forma sustentável, já que a remoção da cobertura vegetal original e a implantação da agricultura, associados a práticas de manejo inadequadas, promovem perda da estabilidade do sistema edáfico (RICHARD et al., 2005). A intensificação do uso do solo com preparo incorreto pode ocasionar alteração negativa nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo devido ao tráfego de máquinas e implementos que contribuem para a compactação e rompimento dos agregados, a falta de cobertura da superfície do solo e baixa manutenção da matéria orgânica do solo (MARCOLAN & ANGHIONO 2006; ARAÚJO et al., 2000).

No estado do Paraná as safras de grãos apresentam altos índices de produtividade, mantendo o estado em destaque na produção com 48,5% da produção de trigo e 14,6% da produção nacional de grãos (IBGE, 2021). Em 2021, a estimativa de produção de soja foi de 132,9 milhões de toneladas segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) sendo o estado do Paraná o terceiro maior produtor da cultura. No entanto, é importante destacar que a manutenção e o aumento desta produtividade se dão através da utilização de novas tecnologias e com adoção de outras já desenvolvidas, com intuito de manter ou incrementar este nível de produção nestes solos, e reduzir a utilização de insumos necessários.

Para o meio rural, a conservação do solo é uma das principais preocupações devido ao aumento de áreas que se tornaram improdutivas devido à degradação decorrente de manejo não conservacionistas. O manejo conservacionista do solo pode contribuir para a redução de sua degradação, por fornecer proteção física da camada superficial evitando arraste de partículas, também por melhorar os atributos físicos e químicos do solo, aumentando a agregação e estabilidade da matéria orgânica do solo (MOS), permitindo que está se acumule nas camadas superficiais (PEREIRA et al., 2010).

A diversidade vegetal promove maior variedade do material orgânico aportado e, consequente, melhora a qualidade do solo ao longo dos anos de cultivo, com aumento da diversidade de fontes de alimentos para a fauna do solo, favorecendo assim, a diversidade de decompositores (HOOPER et al., 2000). Os organismos do solo como minhocas, cupins e formigas são conhecidos como engenheiros do ecossistema, que têm a capacidade de modificar a estrutura do solo, com a criação de canais, câmaras e agregados biogênicos, melhorando a porosidade, armazenamento de água e difusão de oxigênio (JOUQUET et al., 2008; FERREIRA et al., 2019). Portanto, a necessidade de se realizar estudos com objetivo de avaliar os sistemas de manejo e as mudanças que estes causam no solo inspiram muitos trabalhos recentes na literatura (PEREIRA et al., 2010; ROSSI et al., 2016; ASSUNÇÃO et

al. 2019; ROSSET et al. 2019; FALCÃO et al., 2020; FERREIRA et al., 2020; MARTINS et al., 2020; OZÓRIO et al. 2019; 2020; TROIAN et al., 2020; PINTO et al., 2021; MORAIS et al., 2021; SANTOS et al., 2021).

O conhecimento dos atributos edáficos como a classe textural presente nas áreas de estudo é de extrema importância, pois a textura influencia em um grupo de propriedades e características do solo de forma indireta ou direta, como a capacidade de troca catiônica (CTC), disponibilidade de nutrientes e susceptibilidade a erosão. Os Latossolos são solos bem desenvolvidos e profundos com alta capacidade de produção devido às boas condições e aos relevos mais suaves, sendo a classe de maior expressão no estado do Paraná (31%), ocorrendo em quase 62.000 km² (BHERING & SANTOS, 2008). Estes solos geralmente estão associados a uma boa permeabilidade e estrutura desenvolvida, apresentando elevada porosidade. No entanto Latossolos Vermelhos de textura muito argilosa são mais susceptíveis a compactação ou erosão devido a excessivo revolvimento ou tráfego intenso de maquinário pesado (SAVIOLI et al., 2021).

A agregação do solo afeta diretamente sua qualidade, pois influencia a infiltração e retenção de água, a aeração e a resistência à penetração de raízes (KÄMPF & CURI, 2012), correlacionando-se com a erodibilidade do solo. Os agregados, quanto à sua gênese podem ser classificados em biogênicos e fisiogênicos de acordo com seu padrão morfológico (BULLOCK et al., 1985). Portanto, quando ocorre modificação do manejo e plantas cultivadas, ocorre modificação de alguns agentes formadores de agregados, como a MOS e organismos edáficos (BATISTA et al., 2013b; LOSS et al., 2017; PINTO et al., 2018)

Os estudos sobre a influência dos diferentes sistemas de manejo na formação de agregados e em sua morfologia são incipientes e, em função disto, a hipótese deste trabalho é de que os agregados formados pelas diferentes vias podem ser utilizados como indicadores de qualidade de solo em sistemas submetidos a diferentes tipos de cobertura vegetal. O objetivo é avaliar a importância da agregação biogênica para a alteração dos atributos (atributos químicos e físicos do solo, nas vias de formação dos agregados e sua estabilidade, e nos atributos químicos e frações da matéria orgânica do solo) de um Latossolo Vermelho Eutroférico típico sob diferentes usos e manejos. E como objetivos específicos: realizar a identificação e separação de agregados (biogênicos e fisiogênicos); caracterizar os atributos químicos pH, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, H+Al, P, Na, K e carbono orgânico total (COT) dos agregados; avaliar a estabilidade dos agregados, através do peneiramento via úmida e via seca; realizar o fracionamento granulométrico e densimétrico dos agregados; e avaliar a abundância do ¹³C.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistemas de Manejo do Solo

O sistema de preparo convencional do solo pode ser dividido em três fases distintas: preparo primário (com aração e/ou escarificação), preparo secundário (gradagem e nivelamento) e por último os tratos culturais após o plantio. No Brasil o solo é comumente preparado utilizando implementos como arado, grade, escarificador e enxada rotativa, sendo este tipo de cultivo denominado sistema de preparo convencional (SPC).

No entanto, o monocultivo e práticas culturais inadequadas na agricultura, como o preparo convencional do solo, com contínuas mobilizações do terreno ou superlotação de áreas de pastejo, podem promover a sua degradação e dos demais recursos naturais e, conseqüentemente, a redução da produtividade local (MACEDO, 2009). Estima-se que no Brasil existem 138,7 milhões de hectares de pastagens nativas ou implantadas (IBGE, 2017), e o manejo animal extensivo geralmente não obedece ao ciclo de desenvolvimento das forrageiras, utilizando taxas de lotação que excedem a capacidade do pasto de se recuperar do pastejo e do pisoteio, causando acentuada degradação da pastagem (MARTINS et al., 2020; SANTOS et al., 2021). Em contrapartida, a pastagem quando manejada de forma adequada, pode melhorar a qualidade da estrutura do solo, pois o sistema radicular associado à ausência de revolvimento do solo ajuda na reestruturação da camada arável tornando o solo menos propenso a erosão e contribuindo para a formação de macroagregados estáveis (SALTON et al., 2008; ROSSET et al., 2019).

A agricultura conservacionista por sua vez é fundamentada nos pilares de 1) redução ou supressão de mobilização do solo, 2) diversificação de espécies como rotação ou consorciação de culturas e 3) cobertura permanente do solo utilizando resíduos orgânicos ou plantas de cobertura, sendo capaz sequestrar C atmosférico, mitigar a emissão de gases do efeito estufa (GEE), minimizando assim a poluição, contaminação e degradação dos ecossistemas e suas proximidades. A implantação de sistemas de manejo conservacionistas tem como intuito aprimorar a sustentabilidade da agricultura, além de garantir segurança e qualidade alimentar (HERNANI et al., 2002). Estima-se que a maior parte do estoque de C florestal se encontra armazenado no solo, com cerca de 45% e na biomassa viva com 44% (FAO, 2020), no entanto, a dinâmica da MOS é relativamente rápida devido a maior temperatura e precipitação ocorrida em regiões de clima tropical e subtropical (SANCHES et al., 2009).

Devido as condições edafoclimáticas das regiões de clima tropical e subtropical, a agricultura conservacionista utiliza um conjunto de práticas agrícolas ou preceitos ainda mais amplo e rigoroso para melhorar a qualidade do solo, compreendendo: 1) adequação à aptidão agrícola das terras – preservação de ecossistemas sensíveis; 2) respeito sobre a capacidade de uso do solo; 3) erradicação da queima de resíduos culturais; 4) redução ou supressão de mobilização de solo; 5) manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo; 6) diversidade de espécies, em rotação, consorciação e/ou sucessão de culturas; 7) diversidade de sistemas de produção; 8) adição de matéria orgânica ao solo, em quantidade, qualidade e frequência, compatíveis com a demanda biológica do sistema edáfico; 9) promoção de cobertura permanente do solo; 10) redução ou supressão do intervalo de tempo entre colheita e semeadura (processo plantar-colher); 11) manejo integrado de pragas; 12) controle do tráfego mecânico, animal e humano sobre o solo; 13) aplicação precisa de insumos agrícolas; e 14) implantação de práticas mecânicas ou hidráulicas, para manejo de enxurradas e controle de erosão (DENARDIN et al., 2012).

A MOS é um importante indicador de qualidade do solo, e sua velocidade de decomposição varia nos diferentes climas devido a influência da temperatura e umidade nesse atributo (TRUMBORE, 1993). É possível estimar a ciclagem da MOS e sua origem é através

da análise de ^{13}C . A principal fonte de carbono para as plantas é o dióxido de carbono (CO_2) que possui valor de ^{13}C de -7,7 % (DUCATTI, 2007), sendo as plantas divididas em três principais grupos de acordo com sua via fotossintética: C3, C4 e CAM. Cada ciclo fotossintético apresenta um valor de ^{13}C característico devido suas diferenças metabólicas na fixação do CO_2 atmosférico, sendo plantas de ciclo C3 com os menores valores de ^{13}C , variando entre -32 – -20%, plantas de ciclo C4 de -17 – -7% e CAM entre -28 – -10% (BOUTTON, 1991).

A conversão de áreas de mata nativa em áreas de cultivo resulta em mudanças na quantidade e qualidade da biomassa aportada no solo, como observado por Araújo et al. (2011) e Rosset et al. (2014) em seus estudos, onde os autores relataram aumentos nos estoques de C nas camadas superficiais em decorrência da conversão de áreas de mata nativa em pastagens de *B. brizantha*. A remoção da floresta prejudica a manutenção do carbono (C) em frações mais estáveis do solo (ROSSET et al., 2016), com conseqüente prejuízo aos demais atributos edáficos, como a porosidade de macroagregação (COUTINHO et al., 2020).

A aplicação da técnica da abundância natural de ^{13}C no solo permite avaliar a dinâmica do C na conversão de área de cobertura natural com predomínio de plantas C3 para área de cultivo de plantas do ciclo C4, além de determinar que tipo de cobertura vegetal está contribuindo com o C presente no solo e/ou nos agregados (COSTA JUNIOR et al., 2011; ASSUNÇÃO et al., 2019; LOSS et al., 2011).

Avaliando áreas de SPD, PD-ILP e Cerrado, Loss et al. (2014) observaram através do aumento dos valores de ^{13}C nas áreas cultivadas (-17,50 %) em comparação ao cerrado (-26,79%) que houve mudança na vegetação de cobertura, indicando presença de plantas do ciclo C3 onde predominava vegetação original e plantas do ciclo C4 nas áreas de SPD e SPD-ILP.

2.2 O Sistema Plantio Direto e Seus Benefícios

O termo “sistema plantio direto” (SPD) surgiu em 1980 no Brasil, mais precisamente na região sul a partir da adaptação do plantio direto (PD) ou semeadura direta. O SPD foi importado da Inglaterra e EUA em 1969 como método alternativo de preparo reduzido de solo com objetivo de controle de erosão hídrica, sendo necessário adequar esse sistema para as condições edafoclimáticas das regiões subtropicais e tropicais do Brasil (CERETTA et al., 2007; ANGHINONI, 2007). Inicialmente o SPD passou por um período de baixa taxa de adoção dos produtores devido as dificuldades relacionadas a adaptação do novo sistema, no entanto, a partir da década de 90 houve grande expansão na adoção. Segundo a Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto (FEBRAPDP) existem 32 milhões de hectares sob SPD no Brasil em 2021.

O SPD contempla parte dos preceitos da agricultura conservacionista, preconizando a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo, reduzir mobilizações do solo, promover rotação, sucessão e/ou consorciação de culturas aumentando a biodiversidade, implementar processo colher-semear, manter o solo permanentemente coberto e adição de material orgânico de qualidade suprindo a demanda biológica do solo, criando ambiente favorável ao crescimento vegetal e manutenção ou recuperação da qualidade do solo (ALVARENGA et al., 2001; DENARDIN et al., 2012).

No SPD a manutenção dos resíduos culturais sobre o solo tem a finalidade promover o controle de plantas daninhas, proteção contra o impacto das gotas de chuva, da erosão superficial hídrica e eólica, e da ação direta dos raios solares, diminuindo o espectro diário de temperatura do solo, favorecendo o desenvolvimento radicular e de outros organismos (HECKLER et al., 1998). O manejo dos resíduos culturais, em superfície ou incorporado ao solo, resulta em diferentes velocidades de decomposição da MOS, devido a maior ou menor

ação dos organismos decompositores (TORRES et al., 2005), sendo o manejo e a qualidade do material aportado, influenciadores da qualidade do solo (JAKELAITIS et al., 2008; PORTO et al., 2009). A redução da mobilização do solo na linha de cultivo tem como objetivo impedir a rápida ciclagem de nutrientes e decomposição da MOS, além de potencializar a infiltração de água no solo e a difusão de gases para as raízes das plantas (BRONICK & LAL, 2005; BEUTLER et al., 2005).

A rotação de culturas por sua vez tem a capacidade de aumentar a estabilidade da produção de grãos devido a melhoria na qualidade do solo através do aumento da biodiversidade, produção de cobertura vegetal, diversificação e escalonamento na época de semeadura (FRANCHINI et al., 2011). No entanto, mesmo com tráfego de maquinário reduzido, as operações de semeadura e colheita realizadas com tratores e colhedoras são frequentemente utilizadas, e seus rodados possuem grande potencial de compactação da superfície do solo (SCHULER & WOOD, 1992). A rotação de culturas contribui para a melhoria da qualidade física do solo diversificando as plantas de coberturas e os sistemas radiculares em SPD como observado por Boddey et al. (2010) e Franchini et al. (2011), sendo estes efeitos ainda mais efetivos nos primeiros 0,20 m de profundidade. Portanto, a rotação de culturas e os demais preceitos da agricultura conservacionista se destacam entre os princípios básicos para o sucesso das tecnologias como SPD, que por sua vez contribui para sustentabilidade da agricultura.

O SPD pode melhorar a estabilidade dos agregados, sendo esta mais expressiva em solos de textura arenosa (FALCÃO et al., 2020), pois ocorre um aumento e maior estabilização da matéria orgânica, principal agente cimentante em solos com baixo teor de argila (COSTA et al., 2003; ROSSI et al., 2016), porém também com benefícios comprovados em solos com alto teor de argila (ROSSET et al., 2019). O SPD com integração lavoura-pecuária (ILP) utilizando gramíneas, que possuem sistema radicular bem desenvolvido, pode aumentar os índices de agregação do solo, COT e de N nos agregados da camada de 0-0,5 m, quando comparado com SPD sem braquiária (LOSS et al., 2011). Loss et al. (2014) concluíram que áreas de SPD foram capazes de recuperar o conteúdo de C nas frações físicas e químicas da MOS em agregados biogênicos e fisiogênicos, igualando aos níveis encontrados em área de referência. Em estudos realizados por Conceição et al. (2013) e Devine et al. (2014) os autores verificaram maior estabilidade de agregados em áreas de SPD, quando comparados com SPC, em função da utilização de arados de disco e tráfego de maquinário pesado.

Ao analisar o SPD, é importante levar em consideração o tempo de adoção do sistema, visto que, atributos físicos, acúmulo de MOS, ciclagem de nutrientes e atividade biológica necessitam de tempo para que esses processos se desenvolvam podendo chegar a valores próximos de áreas de mata nativa quando manejados adequadamente (SÁ et al., 2004; GUARESCHI et al., 2012; ROSSET et al., 2014; 2016; 2019).

O SPD pode ser dividido em quatro fases de acordo com o tempo de implementação, fase inicial (0-5 anos) com menor teor de MOS, elevada exigência em nitrogênio (N), menor acúmulo de palhada e reestabelecimento da biota do solo; fase de transição (5-10 anos) com início do acúmulo de MOS juntamente com o aumento da palhada em superfície e reagregação do solo; fase de consolidação (10-20 anos) com elevada quantidade de resíduos em superfície e elevada MOS, aumento da disponibilidade de água e ciclagem de nutrientes; e por último a fase de manutenção (>20 anos) que apresenta fluxo contínuo de carbono e nitrogênio no solo com maior retenção de água e redução na utilização de adubos nitrogenados e fósforo (P); sendo possível observar que à medida que ocorre o aumento do tempo de implantação, tem-se a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (ANGHINONI, 2007).

2.3 Formação de Agregados do Solo e Interações com a MOS

Em meio natural, a organização das partículas sólidas do solo em estruturas compostas é chamada de agregação, sendo este processo associado a interações entre atributos mineralógicos, químicos e biológicos (LEPSCH, 2011). Estas unidades estruturais possuem tamanhos e formas diversas devido à complexidade das interações que as formam, podendo ser classificadas segundo a evolução do tamanho da estrutura e também através da gênese dos agregados (PULLEMAN et al., 2005; TISDALL & OADES, 1982).

A classificação dos agregados de acordo com o tamanho, estabelece microagregados com dimensões de 0,05-0,25 mm, mesoagregados 0,25-2,00 mm e macroagregados maiores que 2,00 mm (COSTA JUNIOR et al., 2012). A MOS atua de forma mais significativa na formação de macroagregados (OADES, 1984; TISDALL & OADES, 1982; BRONICK e LAL, 2005). A classificação segundo a gênese dos agregados é realizada por meio da observação de padrões morfológicos das estruturas, que possibilitam identificar as vias de formação dos agregados (BULLOCK et al., 1985; PULLEMAN et al., 2005). Segundo Costa Junior et al. (2012) os microagregados possuem maior capacidade de proteção da MOS, sendo esta estrutura menos sensível a alterações no manejo, observando-se diferenças apenas nos macroagregados e mesoagregados, nos quais ou autores constataram reduções nos teores de C em sistemas de manejo inadequados, como o SPC e pastagens mal manejadas.

A formação de agregados depende da aproximação das partículas do solo, que ocorre com auxílio de fatores ambientais como ciclos de umedecimento e secagem, atividade biológica, e também por meio da ação física de raízes das plantas (PORTUGAL et al., 2010), paralelamente a ação da fração argila, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, exsudatos orgânicos de plantas e de fungos micorrízicos arbusculares, e substâncias orgânicas humificadas que são consideradas agentes cimentantes, ou seja, tem a capacidade de estabilizar a união tanto das partículas unitárias quanto das partículas secundárias (agregados) do solo (LEPSCH, 2011).

Dentre os atributos físicos que afetam diretamente a qualidade do solo destaca-se a estabilidade de agregados, pois esta influência na infiltração, na retenção de água, na aeração e na resistência à penetração de raízes, correlacionando-se de negativamente com a erodibilidade do solo, pois com redução da estabilidade do solo ocorre aumento da erosão do solo (KÄMPF & CURI, 2012; JOUQUET et al., 2008). A agregação também pode favorecer a maior disponibilidade de nutrientes e maior proteção da MOS quando oclusa em agregados mais estáveis diminuindo a ação dos microrganismos decompositores, e contribuindo para o acúmulo de compostos orgânicos no solo, sequestro de C e, conseqüentemente, redução da taxa de emissão de GEE, principalmente em solos não revolvidos (SILVA NETO et al., 2010; PULLEMAN & MARINISSEN, 2004; DENARDIN et al., 2012).

Estudos verificaram maior estabilidade de agregados em áreas de SPD, quando comparados a áreas de SPC (PINHEIRO et al., 2004; LOSS et al., 2011; CONCEIÇÃO et al., 2013; DEVINE et al., 2014). A maior estabilidade dos agregados em SPD está relacionada ao não revolvimento do solo e a cobertura permanente que contribui na formação de agregados ao longo do tempo de cultivo (ROSSET et al., 2019; FERREIRA et al., 2020), fornecendo fitomassa que se decompõe acumulando matéria orgânica, e o conseqüente aumento da atividade microbiana, juntamente com a atividade mecânica das raízes que atuam melhorando a estabilidade dos agregados.

A modificação da estrutura do solo pela macrofauna, principalmente através de minhocas (*Oligochaeta*), promove aumento da fertilidade do solo, formando estruturas denominadas de coprólitos, que possuem maiores teores de P, potássio (K) e valores de pH superiores aos encontrados no solo (LANGEBACH et al., 2002), devido a seletividade das minhocas em materiais orgânicos com maior teor de nutrientes, e a passagem deste material

pelo seu trato intestinal favorecer a mineralização da MOS através de microrganismos ali presentes (HAYNES et al., 2003). Ao avaliarem agregados pedogênicos e coprólitos em diferentes classes de solos Silva Neto et al. (2010) observaram que os coprólitos indicaram melhor qualidade dos atributos químicos, além de maior estabilidade dos agregados avaliada através do diâmetro médio ponderado.

Andrade et al. (2021) constataram que o raleamento da vegetação em área de floresta tropical no estado do Ceará foi capaz de aumentar a biomassa de raízes e o tamanho dos agregados em superfície, além do aumento no estoque de C em subsuperfície, indicando que o manejo utilizado contribuiu para um aumento da estabilidade de macroagregados estáveis em água.

Um dos componentes que pode atuar na agregação do solo é a glomalina, uma glicoproteína associada a presença de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (WRIGHT et al., 1996). A glomalina é recalcitrante no solo, com tempo de permanência mínima de aproximadamente 6 anos (RILLIG et al., 2001). A deposição desta biomolécula no solo é resultante de exsudatos dos FMA e decomposição das hifas de fungos (DRIVER et al., 2005). A glomalina pode contribuir como agente cimentante dos agregados, além da redução na biodisponibilidade de metais pesados e tóxicos em solos poluídos (VODNIK et al., 2008; WRIGHT et al., 2007).

2.4 Agregados Biogênicos e Fisiogênicos

Os agregados do solo podem ser classificados por meio de padrões morfológicos (SILVA NETO et al., 2016; PINTO et al., 2018) ou vias de formação, sendo essas classificadas como fisiogênica ou biogênica, padrões estabelecidos por Bullock et al. (1985) e adaptado por Pulleman et al (2005). Os agregados fisiogênicos são formados a partir de ações químicas e físicas, sendo identificados por apresentarem formas angulares ou prismáticas, com muitas arestas decorrentes dos constantes ciclos de umedecimento e secagem que aproximam as partículas unitárias, e pela ação dos agentes cimentantes do solo. Os agregados biogênicos estão relacionados as vias biológicas de formação, como exemplo a ação de “engenheiros do ecossistema” como minhocas, formigas e cupins, e auxílio de exsudatos de raízes, dando a esses agregados formas arredondadas (JOUQUET et al., 2008; LOSS et al., 2014).

Os agregados formados pelas diferentes vias de formação podem apresentar modificações nos atributos químicos como nos teores de COT (PULLEMAN et al., 2005; LOSS et al., 2014; LOSS et al., 2017; PINTO et al., 2018; SCHULTZ et al., 2019; FERREIRA et al., 2020; PINTO et al., 2021), pH, P, Ca²⁺ e Al (SILVA NETO et al., 2010; SILVA NETO et al., 2016; MOURA et al., 2019), assim como em atributos físicos como porosidade e diâmetro médio ponderado (BATISTA et al., 2013b; ROSSI et al., 2016; MELO et al., 2019).

Em estudo realizado em duas áreas manejadas sob SPD em diferentes tempos de implantação e com diferentes tipos de cobertura, objetivando avaliar as alterações causadas pelas plantas de cobertura e diferentes sistemas de manejo na gênese dos agregados e na matéria orgânica, Pinto et al. (2021) verificaram maior proporção de agregados biogênicos comparado a fisiogênicos em áreas de SPD com 6 anos e 18 anos e cobertura de braquiária, associando a maior quantidade de agregados biogênicos com a ação do sistema radicular das plantas de cobertura, principalmente da braquiária que possui raízes muito desenvolvidas.

Corroborando com resultados observados por Rodriguez et al. (2021) em estudo realizado na Amazônia em duas paisagens diferentes, na qual a cobertura vegetal se encontra em processo de transição de floresta primária para pastagem, onde observaram maior quantidade de macroagregados formados através da ação da rizosfera em áreas de pastagem

tradicional sob braquiária, e agregados formados pela atividade biológica (macrofauna do solo) em áreas de sistema silvipastoril.

Em um trabalho realizado sob diferentes sistemas de manejo agroecológicos no município de Seropédica, Moura et al. (2019) observaram que os agregados biogênicos em área de SPD apresentaram maiores valores de P orgânico extraído em solução alcalina em comparação aos agregados fisiogênicos, demonstrando que os agregados formados a partir de diferentes vias podem funcionar como indicadores de qualidade do solo.

Ao avaliar as influências físicas e biológicas na gênese de agregados em área de produção sob sistema de integração lavoura-pecuária, Batista et al. (2013a) relataram que os agregados biogênicos apresentaram correlação positiva com os teores de COT. E de acordo com análise de agrupamento, observaram que agregados fisiogênicos e intermediários localizaram-se mais próximos, enquanto os agregados biogênicos se distanciam dos outros grupos, indicando que a via de formação pode influenciar em características químicas do solo.

Analisando a influência da aplicação de esterco de diferentes fontes em agregados biogênicos e fisiogênicos de um Latossolo Vermelho Distroférico típico sob SPD no estado do Paraná, Melo et al. (2019) verificaram que a aplicação de estrume provoca melhoria na estrutura e fertilidade de agregados biogênicos, e que a qualidade do material utilizado pode aumentar a formação de agregados biogênicos. Utilizando microtomografia computadorizada, os autores constataram que a aplicação de esterco de galinha aumentou a quantidade de poros presentes nos agregados biogênicos, sendo esta característica importante, pois os poros auxiliam na drenagem da água e difusão de gases.

Ao avaliar o efeito da aplicação de diferentes tipos e doses de esterco suíno ao solo no Sul do estado de Santa Catarina, Loss et al. (2017) observaram que nos agregados biogênicos foram quantificados maiores teores de COT e N total em todas as doses avaliadas.

Ao avaliar a influência da aveia preta em promover melhorias na estrutura do solo e em seus atributos químicos, Lima et al. (2020) concluíram que o cultivo de aveia preta pode aumentar a formação de agregados biogênicos, indicando maior biogênese devido ao aumento da atividade biológica, desenvolvimento do sistema radicular e a constante renovação do sistema radicular, com aumento da adição de matéria orgânica em subsuperfície.

Com objetivo de avaliar as frações granulométricas do carbono em classes de agregados sob aplicação de diferentes doses de dejetos e cama sobreposta de suínos no município de Braço do Norte, Santa Catarina, Ventura et al. (2020) verificaram que agregados biogênicos apresentaram os maiores teores de COT e N total comparado a fisiogênicos em todos os tratamentos, com exceção a testemunha. Os autores associam este resultado a aplicação de dejetos suínos como fonte de C e N que aumentaram a matéria seca das plantas de cobertura (34% para aveia e 90% para milho), com isso, houve promoção de maior densidade de raízes e exsudatos radiculares que estimulam a atividade biológica do solo, formando maior proporção de agregados biogênicos.

A partir do exposto, é possível intentar a importância de continuar avaliando as diferenças entre as vias de formação, suas interações com os atributos do solo e a utilização da gênese dos agregados como indicador de qualidade na avaliação de sistemas de manejo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo e Amostragem

O estudo foi realizado no município de Guaíra, localizado no oeste do estado do Paraná, Brasil (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2014), é subtropical úmido (Cfa) e a vegetação nativa da área é classificada como Floresta Estacional Semidecidual Aluvial, sendo a precipitação média mensal, umidade relativa do ar e temperaturas máximas, média e mínimas mensais apresentadas na Figura 2.

De acordo com o levantamento detalhado de solos do estado do Paraná (BHERING et al., 2007), as áreas do estudo se encontram sob Latossolo Vermelho Eutroférico típico, textura muito argilosa (SANTOS et al., 2018). Para o estudo foram selecionadas áreas de sistema de preparo convencional (SPC) onde é cultivado feijão (*Phaseolus vulgaris*) sucedida com aveia (*Avena sativa*), sistema plantio direto (SPD) com 6 anos (fase de transição) e 18 anos (fase de consolidação) conduzidas com sucessão de soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*) nas safras de verão e segunda safra, respectivamente, pastagem permanente (PP) com 45 anos de instalação com cobertura de coast-Cross (*Cynodon dactylon*), lotação de animais de 3,5 UA ha⁻¹ e ausência de sinais visíveis de degradação, sendo áreas de cultivo sucessão do SPC, e mata nativa (MN), totalizando cinco diferentes áreas amostrais, analisadas em delineamento inteiramente casualizado (DIC).

Todas as áreas de SPD foram convertidas a partir do SPC. Na de PP são realizadas práticas de renovação da pastagem a cada 5 anos, com aplicação de calcário e revolvimento do solo para posterior instalação do cultivo. Já para SPC nos últimos 5 anos, para o cultivo do feijão, é realizada adubação de base com aplicação de 270 kg ha⁻¹ de 10-15-15 de N, P₂O₅ e K₂O. A aveia é cultivada no inverno sem aplicação de adubo mineral, com objetivo de produção de palhada, sendo nesta área, ao final da colheita do feijão realizadas uma operação de revolvimento do solo com grade aradora e uma com a grade niveladora para implementação da cultura de aveia subsequente.

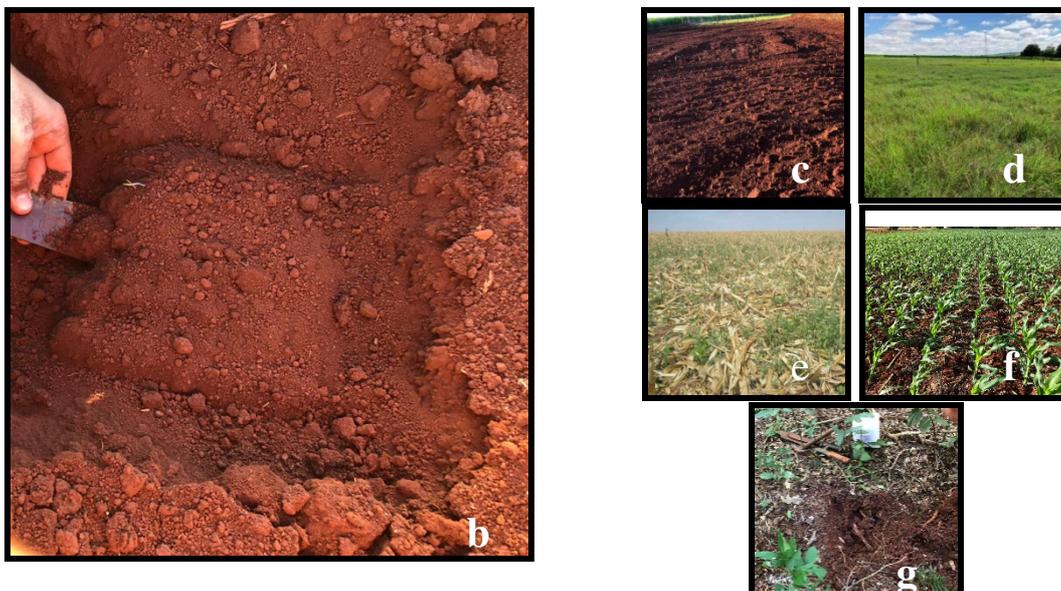
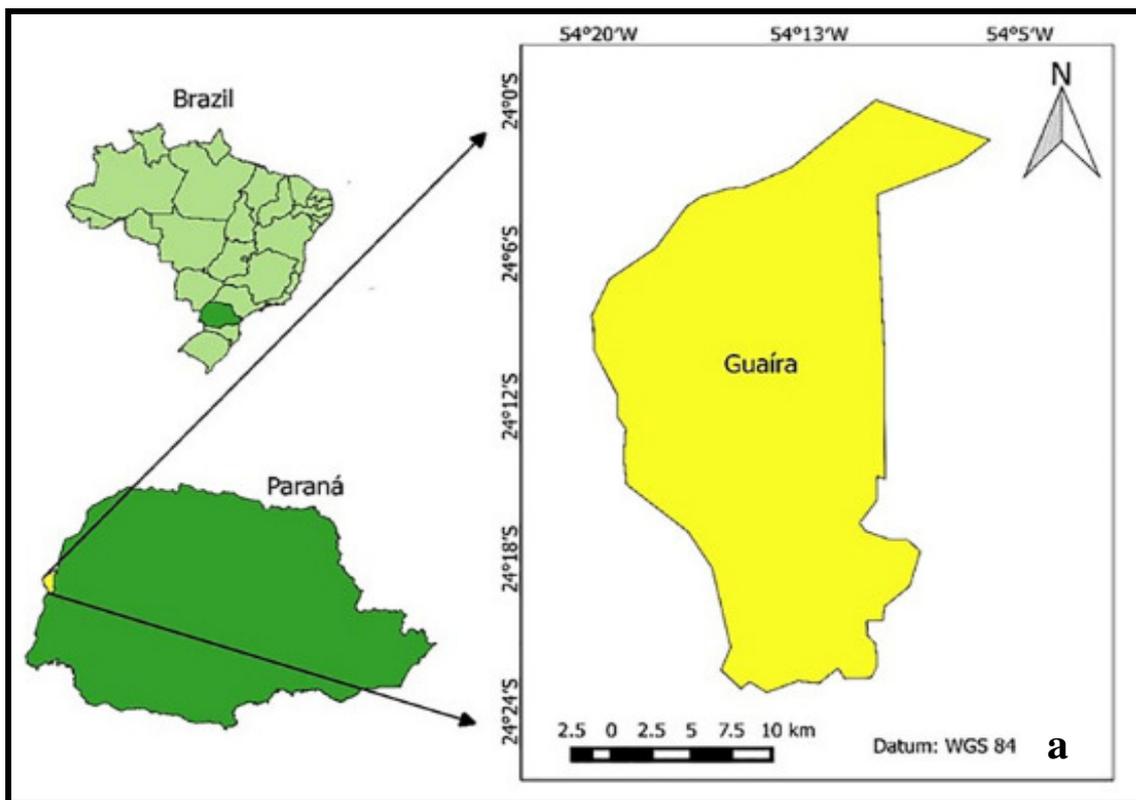


Figura 1- a. Localização das áreas de estudo no município de Guaíra-PR, Brasil. b. Mini trincheira em que foi realizada a coleta dos torrões nas diferentes áreas. c. SPC. d. PP. e. SPD₆ anos. f. SPD₁₈ anos. g. MN. Fonte: Elaborado pelo autor. Fotos: Jean Sérgio Rosset (2019).

Enquanto nas áreas de SPD, as adubações realizadas anualmente na sucessão das culturas compreendem de 270 kg ha⁻¹ do formulado 02-20-18 de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, e inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* (inoculante líquido: 150 mL para cada 50 kg de sementes) para a cultura da soja, e adubações minerais com a quantidade de 270 kg ha⁻¹ do formulado 10-15-15 de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente para a cultura do

milho. Nas áreas de SPC e SPD a cada 5 anos é realizada a prática de calagem e gessagem, segundo recomendações baseadas em análises de solos periódicas.

Tabela 1. Histórico e descrição das áreas de estudo.

Sistema de manejo	Descrição
SPC	Área total de 2 ha; 302 m de altitude, localizada na latitude 24°11'027''S e longitude 54°12'449'' O; Sucessão de culturas feijão (verão) e aveia (inverno).
PP	Área total de 2 ha; 302 m de altitude; localizada entre a latitude 24°11'025'' S e longitude 54°12'449'' O; Área sob vegetação permanente com coast-cross (<i>Cynodon dactylon</i>).
SPD6	Área total de 9,7 ha; 298 m de altitude, localizada entre a latitude 24°09'027938''S e longitude 54°14'190'' O; Sucessão de culturas de soja (verão) e milho (segunda safra). Área em fase de transição do SPD.
SPD18	Área total de 17 ha; 298 m de altitude; localizada entre a latitude 24°09'938'' S e longitude 54°14'190'' O. Sucessão de culturas de soja (verão) e milho (segunda safra). Área em fase de consolidação do SPD.
MN	Área total de 2 ha; 295 m de altitude; localizada entre a latitude 24°11'029'' S e longitude 54°11'898'' O; Vegetação nativa (Mata Atlântica – Floresta Estacional Semidecidual), utilizada como referência.

A coleta das amostras de solos foi realizada em abril de 2019. Em cada área, foram coletadas amostras em 5 pontos em formato de bloco, a partir da abertura de trincheiras com dimensões de 0,25 m x 0,25 m. A amostragem foi realizada nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m com auxílio de uma pá quadrada (Figura 1a)

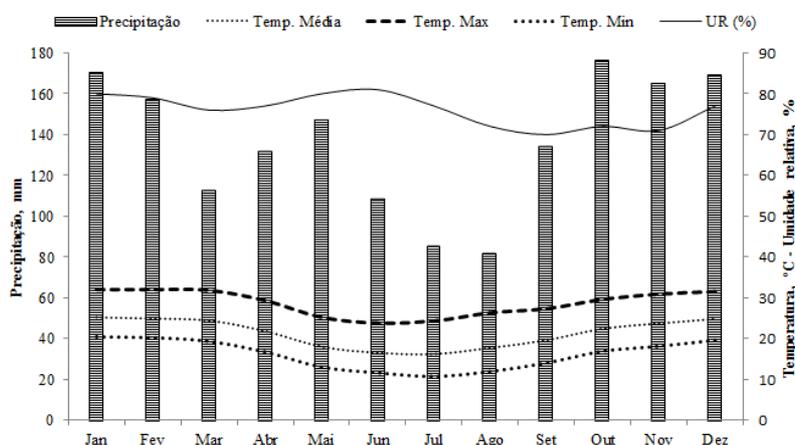


Figura 2- Valores médios mensais de precipitação pluviométrica, temperaturas médias, máximas e mínimas e umidade relativa no período compreendido entre 1973 a 2011. Fonte: Estação Meteorológica – IAPAR – Unidade de Palotina.

3.2 Triagem dos Agregados

Após a coleta, as amostras foram transportadas para laboratório, sendo secas ao ar. Posteriormente os torrões (Figura 3a) foram separados manualmente, utilizando-se baixa pressão, sendo o material passado por peneiras (Figura 3b) de 9,7, 8,0 e 4,0 mm de malha. Os agregados retidos nos intervalos 9,7-8,0 e 8,0-4,0 foram examinados com auxílio de estereomicroscópio bionocular (lupa) (Figura 3c), sendo separados de acordo com sua morfologia.

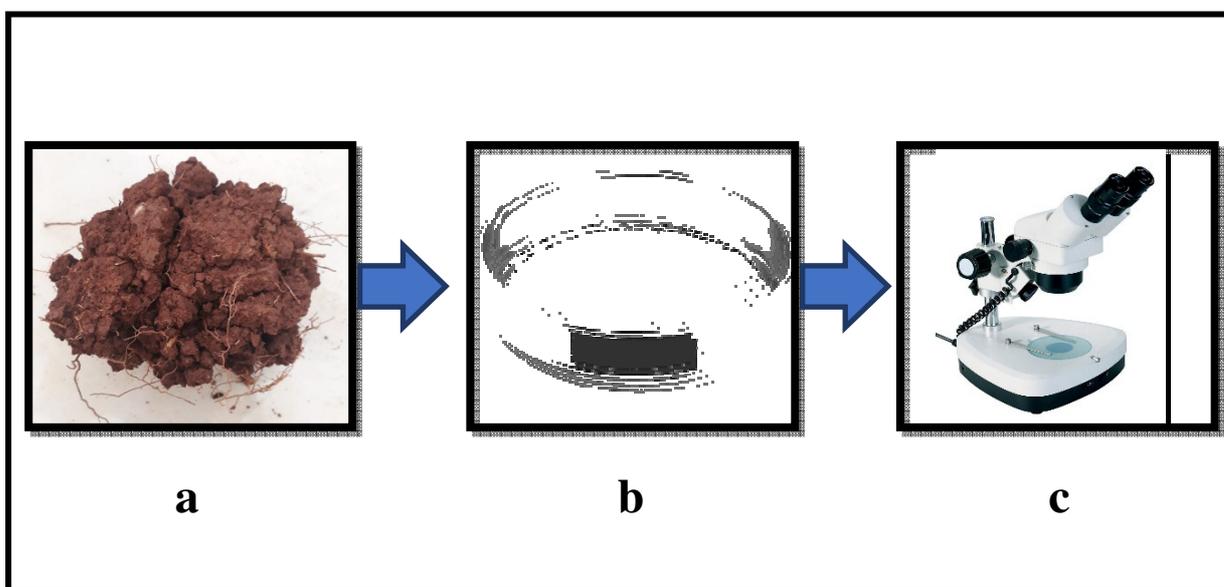


Figura 3- Esquema da triagem dos agregados; **a.** Torrão; **b.** Peneiras; **c.** Lupa.

3.3 Caracterização Morfológica dos Agregados

Após a separação dos agregados, foram utilizados apenas aqueles retidos no intervalo de peneiras 9,7-8,0 mm de malha devido ao tamanho auxiliar na visualização das características. Os agregados de 8,00 mm foram observados em lupa e classificados utilizando as classes morfológicas descritas por Pulleman et al (2005). Os agregados foram classificados como fisiogênicos quando apresentaram formas angulares com bordas bem definidas e cimentação aparente, proveniente da interação entre C, argila, cátions e ciclos de umedecimento e secagem do solo (Figura 4a); ou biogênicos, quando apresentaram formas arredondadas provenientes do trato intestinal da fauna do solo principalmente das minhocas (*Oligochaeta*) ou sistema radicular desenvolvido (Figura 4b). Foi calculado a percentagem relativa dos agregados originados das diferentes vias de formação em cada área amostral. Posteriormente uma parte dos agregados identificados foram utilizados para a análise física de estabilidade de agregados e parte dos agregados foram destorroados e peneirado em malha de 2,0 mm para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA) que foi utilizada na determinação dos atributos químicos.

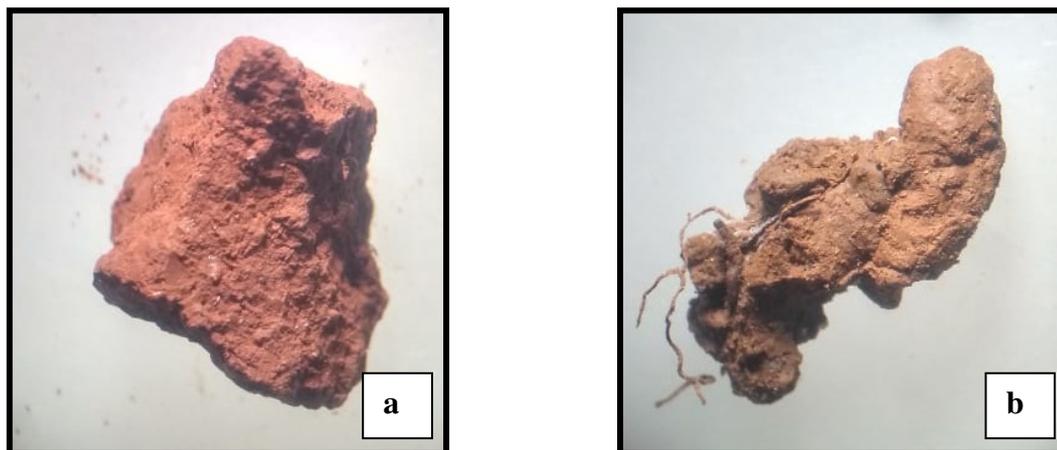


Figura 4- **a.** Agregado fisiogênico e **b.** Agregado biogênico. Fotos: Autor.

3.4 Textura do Solo

As frações granulométricas foram determinadas segundo o método da pipeta (TEIXEIRA et al., 2017) que se baseia na velocidade de sedimentação das partículas que compõem o solo em uma solução, sendo quantificadas as frações areia, silte e argila.

A dispersão das partículas foi feita utilizando dispersor químico hidróxido de sódio (NaOH) a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e transferido para um agitador horizontal a 160 rpm. As amostras foram submetidas à homogeneização por uma noite. Após a etapa de dispersão, as amostras foram passadas por uma peneira de $53 \mu\text{m}$ de malha (n° 270) para separar a fração areia, as frações silte e argila são transferidas para uma proveta de 1000 ml, onde será avolumado e agitado. O tempo de sedimentação está diretamente relacionado com a temperatura e a densidade da suspensão. Após o cálculo do tempo de sedimentação, a suspensão e homogeneizada manualmente com agitador de haste vertical durante 1 minuto. Decorrido o tempo de sedimentação, foi retirada uma alíquota de 10 mL a 5 cm de profundidade. A alíquota foi transferida para béquer, e transferida para estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas. O silte foi obtido por diferença através das seguintes equações:

- Teor de argila = [argila (g) - dispersante (g)] x 1.000
- Teor de areia total = areia fina (g) x 10
- Teor de silte = $100 - [\text{argila (g)} + \text{areia total (g)}]$

3.5 Fertilidade do Solo

Agregados de 8,00 mm fisiogênicos e biogênicos de cada amostra foram destorroados e peneirados em malha de 2 mm. Os valores de pH em água foram determinados utilizando suspensão de solo-líquido 1:2,5 m:v com 1 hora de contato após agitação do material. Os teores de Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} , extraídos com solução de cloreto de potássio (KCl) a 1 mol L^{-1} com proporção de 1:10 m:v, sendo $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ e Ca^{2+} determinados por complexometria e Mg^{2+} obtido por diferença. O Al^{3+} foi determinado a partir da titulação com hidróxido de sódio (NaOH) $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ e indicador azul de bromotimol.

Para a determinação de fósforo disponível (P), sódio e potássio trocáveis (Na^+ e K^+), foi utilizado como solução extratora ácido clorídrico (HCl) $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e ácido sulfúrico (H_2SO_4) $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ (Mehlich-1), sendo o P determinado por colorimetria através da redução do complexo fosfomolibdico com ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) utilizando sal de bismuto. Já o K^+ e Na^+ determinados por fotometria de chama. A acidez potencial do solo

(H+Al) foi extraída com solução de acetato de cálcio ($C_4H_6CaO_4$) 1 mol L^{-1} em proporção 1:15 m:v, sendo seu pH ajustado para 7,0 e determinada por titulação com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ e fenolftaleína como indicador. Com base nos resultados foi calculada a soma das bases trocáveis (S), a saturação por alumínio (m), a capacidade de troca catiônica do solo a pH 7,0 (T) e capacidade de troca catiônica efetiva (t) (TEIXEIRA et al., 2017).

3.6 Carbono Orgânico Total e Fracionamento Físico da MOS.

O carbono orgânico total (COT) do solo foi determinado por oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_2$) a $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ e ácido sulfúrico (H_2SO_4 concentrado), sendo aquecidas durante 30 minutos a 170° C e titulado com sulfato ferroso amoniacal ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ e ferroin como indicador (YEOMANS & BREMNER, 1988).

3.6.1 Fracionamento físico granulométrico da MOS

O fracionamento granulométrico foi realizado em 20 g de TFSA submetida a agitação horizontal em contato com solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) durante 15 h. Após agitação, utilizou-se uma peneira de $53 \mu\text{m}$ para fracionar as amostras, o que ficou retido na peneira foi transferido para placas de Petri e posteriormente secas a 60° C . Este material corresponde à fração areia, e com ela foi determinando os teores de carbono orgânico particulado (COp) através do método descrito para COT. O carbono associado às frações silte e argila (COam), referente ao material que passou pela peneira de $53 \mu\text{m}$ (CAMBARDELLA & ELLIOT 1992), foi calculado pela diferença entre o COT e o COp.

3.6.2 Fracionamento físico densimétrico da MOS

O fracionamento densimétrico da MOS foi obtido a partir da extração por meio de uma solução de NaI a uma densidade de $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,02$) (SOHI et al., 2001). Foi utilizado essa densidade para evitar a contaminação com partículas minerais que apresentam densidade de $2,0 \text{ g cm}^{-3}$ ou maiores.

Para esta etapa foi utilizado 5 g de TFSA preparada a partir de agregados com diâmetro de 8 mm, colocada em frascos de centrífuga de 50 mL e adicionado 35 mL de NaI. Os frascos foram agitados manualmente por 30 segundos e armazenados por 12 h, permitindo a separação das frações orgânicas de menor densidade. A fração orgânica sobrenadante presente na solução ou fração leve livre, foi succionada juntamente com a solução de NaI com auxílio de uma bomba de sucção, e o material separado por filtração (Sistema Asséptico Sterifil, 47 mm – Millipore) com filtros de fibra de vidro (47 mm de diâmetro; 2 microns – Whatman tipo GF/A), previamente pesados.

O material sólido restante no frasco foi novamente avolumado com 35 mL de NaI e submetido a um aparelho de ultrassom (modelo UP400S ultrassom Hielscher) sendo aplicado uma energia de 500 J mL^{-1} durante 3 minutos com temperatura mantida abaixo de 35° C com uso de bolsas de gelo, posteriormente os frascos foram armazenados durante 12 horas. A seguir, as amostras foram centrifugadas a 18.000 rpm por 15 minutos, em temperatura de 18° C , a fim de promover a sedimentação das partículas minerais do solo, sendo o material sobrenadante referente a fração leve livre intra-agregado succionado e novamente filtrado.

As frações coletadas nos filtros foram lavadas com água destilada eliminando assim o excesso de NaI. O filtro contendo o material foi seco em estufa a 60° C , pesado e macerado para posteriormente ser determinado o carbono orgânico da fração leve livre (CFLL) e

carbono orgânico da fração leve livre intra-agregado (CFLL-IA) utilizando mesma metodologia do COT (YEOMANS & BREMNER, 1988).

3.7 Abundância do ^{13}C

Para as determinações dos teores de ^{13}C , as amostras de agregados biogênicos e fisiogênicos foram secas ao ar, moídas e passadas em peneiras de 0,10 mm, sendo posteriormente pesado uma alíquota de aproximadamente 30 mg de solo, sendo a relação isotópica do C analisadas através do CO_2 obtido por combustão sob atmosfera de oxigênio a 900° . O gás resultante foi purificado e analisado em um espectrômetro de massas Delta Plus acoplado a um analisador automático de C, H e N (Carlo Erba EA – 1108 – Finnigan MAT, Bremen, Alemanha), na Embrapa Agrobiologia (Seropédica – RJ).

3.8 Estabilidade dos Agregados

A estabilidade dos agregados foi calculada utilizando o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados pelos métodos de determinação via úmida (VU) e via seca (VS) (TEIXEIRA et al., 2017). Sendo realizado tanto para agregados biogênicos quanto fisiogênicos de mesmo diâmetro.

Para a realização da análise foram utilizados 25 g de agregados retidos no intervalo de peneiras entre de 8,0 e 4,0 mm. O material contido nesse intervalo foi alocado na peneira superior de um conjunto de peneiras com diâmetro de malhas decrescentes 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,105 mm.

Para a avaliação da VU, os agregados foram colocados na peneira de 2,00 mm, sendo umedecidos com um pulverizador. Posteriormente o conjunto foi levado ao aparelho de Yooder (YOODER, 1936), sendo submetido ao peneiramento a 42 oscilações por minuto durante 15 minutos. Após essa etapa, o material que ficou retido em cada peneira foi transferido para placas de Petri previamente identificadas e pesadas, sendo secas em estufa a 105°C durante 24 horas e depois pesadas, a partir dos resultados de massa foram calculados o DMP dos agregados (TEIXEIRA et al., 2017).

Para a avaliação da estabilidade de agregados VS, foi utilizado o método de peneiramento a seco. Foi utilizado um conjunto de peneiras de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 mm de malha e de 20 cm de diâmetro; e um agitador eletromagnético de peneiras de velocidade controlada e movimentos vibratórios, durante 15 minutos, na graduação nº 5 do aparelho que corresponde a 50% de potência. A partir dos resultados encontrados foram calculados os valores de DMP, segundo equações propostas por Kemper & Chepil (1965).

O DMP foi calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{DMP (VU e VS)} = \sum_{X=1} x_i y_i$$

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 (x_i) e a massa total de agregados todas corrigidas quanto à umidade.

3.9 Análise Estatística

Os dados foram inicialmente testados quanto aos pressupostos da análise de variância de normalidade dos resíduos e de homocedasticidade. Nos casos em que os pressupostos não foram atendidos, as variáveis foram transformadas de acordo com Box-Cox (1964) e os

pressupostos foram novamente testados. Nos casos em que os pressupostos foram atendidos (variáveis transformadas ou não), prosseguiu-se com a análise de variância em esquema fatorial 5 x 2. Foi utilizado o teste de Bonferroni. ($p < 0,05$) para estabilidade dos agregados e Tukey para efeito significativo ($p \leq 0,05$) nos demais resultados. Em caso de ineficiência da transformação das variáveis, os tratamentos foram testados pelo teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis (KRUSKAL e WALLIS, 1952) e os agregados foram testados pelo teste não-paramétrico de Wilcoxon para duas amostras (TRIOLA, 2008). Todas as análises foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos Físicos

A textura do solo variou de muito argilosa a argila (Tabela 2) e, nas áreas de SPC e PP na camada de 0,00-0,05 m a textura é muito argilosa enquanto na camada 0,05- 0,10 m textura argila, e SPD 6 e 18 anos de implantação com textura muito argilosa na camada de 0,05-0,10 m e argilosa em superfície. De acordo com o manual de descrição e coleta de solo no campo (TEIXEIRA et al., 2017), a classe textural é definida em função dos teores de areia, silte e argila presente nas amostras de solo, podendo ser dividida em 13 classes.

Os elevados teores de argila encontrados são corroborados pelos valores quantificados nas mesmas áreas por Assunção et al. (2019). Dentre as partículas unitárias do solo, a argila é a que mais influencia positivamente na estabilidade de agregados devido à presença de cargas variáveis e permanentes, em menor proporção devido a mineralogia caulínica e oxídica deste solo, além da alta superfície específica. Já a areia é um fator de desestabilização dos agregados, assim o padrão frequentemente observado é da elevada estabilidade dos agregados em solos com alto teor de argila e baixa estabilidade em solos com elevados teores de areia (DUFRANC et al., 2004).

Os teores de silte nos Latossolos são baixos devido aos processos pedogenéticos em sua formação, com intenso intemperismo físico e químico, resultando na diminuição da relação silte/argila, em geral com valores inferiores a 0,7 para solos com textura média e 0,6 nos solos de textura argilosa a muito argilosa (SANTOS et al., 2018). Na área PP, na camada de 0,05-0,10 m, foi verificada relação silte/argila de 0,61, e para quase todas as áreas os teores de silte foram superiores a 20%. Uma explicação para esse resultado é que os teores de silte podem ser superestimados se tornando incompatíveis com o grau de intemperismo do solo, isto se dá pela presença de microagregados ou pseudo-silte (argila fortemente agregada) de tamanho silte, que apresentam maior resistência a dispersão corroborando com dados de Vitorino et al. (2003), que avaliou a mineralogia e estabilidade dos agregados do tamanho silte em diferentes ordens de solos na região sudeste do Brasil.

Tabela 2. Composição granulométrica (areia, silte e argila) nas áreas submetidas a diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal nas camadas de 0,00 – 0,05 e 0,05 - 0,10 m.

Área	Prof	Areia			Argila	Silte
		Grossa	Fina	Total		
	M	-----g kg ⁻¹ -----				
SPC	0,00- 0,05	29	36	65	751	185
PP	0,00- 0,05	50	81	131	610	207
SPD ₆	0,00- 0,05	46	28	73	592	335
SDP ₁₈	0,00- 0,05	24	86	109	561	330
MN	0,00- 0,05	49	61	110	629	261
SPC	0,05- 0,10	28	36	64	571	225
PP	0,05- 0,10	51	36	87	567	346
SPD ₆	0,05- 0,10	20	30	50	678	273
SPD ₁₈	0,05- 0,10	30	28	58	766	177
MN	0,05- 0,10	37	57	93	691	216

SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Prof: Profundidade da camada avaliada.

4.1.1 Morfologia dos agregados

Através da caracterização morfológica dos agregados, os mesmos foram identificados em duas classes: biogênicos e fisiogênicos (Tabela 3), não sendo observados efeitos significativos entre os sistemas de manejo sobre as proporções relativas das classes de agregados (biogênicos e fisiogênicos), possivelmente devido aos elevados teores de argila observados nesses solos. Em ambas as camadas, a maior média de agregados biogênicos foi verificada na área de MN. Isto se dá pelo fato de que a via biogênica é favorecida em ambientes de floresta por apresentar baixa ação antrópica, maior atividade biológica, presença de serapilheira e raízes (SILVA NETO et al., 2016; LOSS et al., 2014; FERREIRA et al., 2020). Lima et al. (2020) observaram que agregados biogênicos apresentaram maior proporção em áreas de floresta chegando a 62% da massa total.

Nas áreas de SPC, PP, SPD₆ e SPD₁₈ foi observada a predominância de agregados fisiogênicos (Tabela 3), sendo esse padrão também verificado por outros autores que avaliaram a proporção relativa e a dinâmica das vias de formação dos agregados (FERREIRA et al., 2020; PINTO et al., 2019; PINTO et al., 2021; SILVA NETO et al., 2016). Os referidos autores também observaram resultados semelhantes em áreas de fragmentos de Floresta Atlântica, sendo os agregados biogênicos mais expressivos, enquanto nas áreas de cultivo os fisiogênicos ocorreram em maior magnitude em detrimento aos biogênicos.

Tabela 3. Proporção (%) dos agregados formados pelas vias biogênica e fisiogênica nas camadas de 0,00 – 0,05 e 0,05 - 0,10 m de profundidade.

0,00 – 0,05 m	B	F
	(%)	
SPC	27,22 B	72,78 A
PP	18,42 B	81,58 A
SPD ₆	28,30 B	71,70 A
SPD ₁₈	23,95 B	76,05 A
MN	83,28 A	16,73 B
p-valor	<0,001	<0,001
CV (%)	23,44	13,32
0,05 - 0,10 m	B	F
	(%)	
SPC	29,52 B	70,48 A
PP	26,07 B	73,93 A
SPD ₆	13,73 B	86,27 A
SPD ₁₈	21,20 B	78,80 A
MN	79,60 A	20,40 B
p-valor	<0,001	<0,001
CV (%)	28,56	14,73

B: Biogênico; F: Fisiogênico; SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). CV: Coeficiente de variação.

Em estudo sobre a fertilidade e as frações da MOS em agregados sob diferentes sistemas de manejo em um Nitossolo Vermelho no sudoeste do Paraná, Loss et al. (2014) verificaram que em áreas de SPC somente foram observados agregados fisiogênicos, e nos outros sistemas de manejo constatou-se maior contribuição de agregados fisiogênicos em comparação aos biogênicos até 0,10 m.

Pulleman et al. (2005) concluíram que o SPC influencia na formação de agregados fisiogênicos, observando que mais de 60% da massa de agregados era constituída por essa classe. Estudos como os de Batista et al. (2013a) e Ferreira et al. (2020) mostram que a época

do ano promove efeito significativo na proporção das classes de agregados, sendo verificado predomínio de agregados intermediários na época seca, e proporção variável de acordo com o manejo utilizado na época das chuvas. Em seus estudos, avaliando as frações da MOS e fertilidade dos agregados, Loss et al. (2014) também verificaram predomínio de agregados fisiogênicos em comparação a biogênicos independente do manejo utilizado na camada de até 0,10 m de profundidade.

No presente estudo, as amostras de solo foram coletadas no início da estação seca, desta forma os agregados obtidos tiveram influência da época seca em sua gênese, o que explicaria a maior proporção de agregados fisiogênicos (Tabela 3). Os resultados encontrados são concordantes com os de Batista et al. (2013a) que observaram maiores valores de agregados intermediários, em segundo fisiogênicos e por último agregados biogênicos em áreas de ILP sob Latossolos Vermelhos cuja textura variava de média a argilosa. Os autores justificaram a variação em função da atividade biológica da comunidade da macrofauna do solo, devido a redução da atividade biológica na época seca ocorre menor formação de agregados biogênicos, enquanto que na época chuvosa a proporção de biogênicos foi maior exceto para a área com algodão/soja.

Pinto et al. (2021) avaliaram a contribuição de diferentes coberturas vegetais em áreas de SPD em Uberaba, Minas Gerais, e observaram que o emprego da *Brachiaria* spp. como planta de cobertura aumenta a formação de agregados biogênicos. Os autores consideraram o sistema radicular de gramíneas juntamente com a atividade da macrofauna edáfica os principais responsáveis pela formação de agregados biogênicos.

As gramíneas forrageiras possuem abundante sistema radicular (TISDALL & OADES, 1982) que, somado a pouca movimentação do solo e à ação de microrganismos, proporcionam a formação de microagregados, resultando na formação de macroagregados através da ação mecânica das raízes e como fonte de matéria orgânica, pois promovem maior adição de C em profundidade via renovação radicular, melhorando as condições para a atividade da fauna do solo (SALTON et al., 2008; LOSS et al., 2014).

4.1.2 Estabilidade dos agregados

Para a estabilidade dos agregados, representada pelo diâmetro médio ponderado (DMP), não foi observado padrão de maior estabilidade associado a agregados biogênicos ou fisiogênicos (Tabela 4), sendo verificada apenas diferenças entre os sistemas de manejo. Os menores valores de DMP foram observados na área de SPC, 1,224 e 1,487 nos agregados biogênicos e fisiogênicos respectivamente na camada de 0,00 – 0,05 e 1,127, 1,049 na camada de 0,05 – 0,10 m (Tabela 4).

A utilização de maquinário em intensidade para a realização das práticas culturais pode contribuir para a destruição dos agregados e compactação do solo, além de não proporcionar cobertura da superfície do solo para proteção contra o impacto das gotas de chuva, que causam a ruptura e desagregação do solo (MARCOLAN & ANGHIONO, 2006). As práticas culturais em solos com elevado conteúdo de argila devem ser realizadas respeitando a friabilidade do solo com intuito de evitar a compactação. A faixa de friabilidade corresponde à faixa de umidade no solo entre as condições de contração e a plasticidade, sendo a friabilidade que irá determinar o momento mais adequado para utilização de gradagem e aração (SILVA et al., 2006).

Tabela 4. Diâmetro médio ponderado (DMP) determinado pelo método do tamisamento via úmida para as vias biogênica e fisiogênica nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05 – 0,10 m utilizando agregados de 4 mm.

0,00 – 0,05 m	B	F
	DMP (mm)	
SPC	1,224 Ca	1,487 Ca
PP	4,360 Aa	4,431 Aa
SPD ₆	3,824 BCa	3,797 Ba
SPD ₁₈	4,057 ABa	3,664 Ba
MN	4,325 Aa	4,321 Aa
0,05 - 0,10 m	B*	F*
	DMP (mm)	
SPC	1,127C*	1,049C*
PP	4,321A*	4,300A*
SPD ₆	3,679B*	3,691B*
SPD ₁₈	3,703B*	3,747B*
MN	4,248A*	4,288A*

DMP: Diâmetro Médio Ponderado dos Agregados; SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna diferem pelo teste de Kruskal-Wallis, e letras minúsculas distintas na linha diferem pelo teste de Wilcoxon. *Não apresentaram interação significativa entre agregados biogênicos e fisiogênicos.

Na área de PP onde é cultivado *Cynodon dactylon* observaram-se os maiores valores de DMP determinado através do tamisamento via úmida, 4,360 e 4,431 mm, sendo próximos aos valores encontrados na área de MN em ambas as camadas (Tabela 4), sendo estes valores próximos a 5,000 mm, indicando elevada estabilidade estrutural. Em dados apresentados por Pinheiro et al. (2004), em um Latossolo no estado do Rio de Janeiro, quantificaram valores de DMP variando para diferentes tratamentos utilizados, a saber: de 2,0 mm para o sistema convencional, 3,0 mm sob plantio direto e 4,2 mm quando sob gramínea, corroborando com resultados obtidos neste estudo, e evidenciando a capacidade das gramíneas em melhorar a estabilização dos agregados do solo. Os maiores valores de estabilidade dos agregados em áreas de pastagem podem ser atribuídos ao sistema radicular das gramíneas favorecer maior agregação e estabilidade dos agregados além de fornecer proteção contra os processos erosivos (PERUSI & CARVALHO, 2008; SALTON et al., 2008). Corroborando com o trabalho de Rosset et al. (2019) na mesma região deste estudo.

No sistema de SPD₁₈ na camada de 0,00-0,05 m foi verificado valores de DMP próximos à área de MN, indicando que o conjunto de práticas empregado neste sistema foi capaz de recuperar a estabilidade dos agregados além de contribuir para a manutenção deste atributo ao longo do tempo (Tabela 4). Enquanto em área de SPD₆ os valores de DMP foram menores, esse resultado evidencia o efeito do tempo do sistema associado às características conservacionistas relacionadas que promovem um ambiente mais propício para a permanência dos principais agentes formadores de agregados biogênicos que são os organismos da macrofauna do solo. Na camada de 0,05-0,10 m o SPD₁₈ foi diferente da área de MN em função da tendência de diminuição da atividade biológica em profundidade, refletida aqui em estabilidade de agregados biogênicos.

Os elevados valores de DMP podem estar relacionados a ausência de revolvimento e proteção da superfície do solo contra o impacto das gotas de chuva. A MOS é considerada uma das principais facilitadoras do processo de agregação do solo, portanto em solos tropicais é responsável por grande parte da variação dos índices de agregação (CASTRO FILHO, 1998). Em uma cronossequência de SPD com 6, 14 e 22 anos na mesma região deste estudo, Rosset

et al. (2019) observaram aumento do DMP ao longo dos anos de cultivo em sucessão soja/milho. Ao avaliar o DMP em áreas de SPC, plantio reduzido e área de floresta, Pereira et al. (2017) constataram que esse atributo foi o parâmetro físico que melhor representou as diferenças entre as formas de manejo utilizadas.

Trabalhos recentes na literatura em diversas condições de clima e solo também destacam valores de DMP superiores em áreas nativas. Porém quando comparado sistemas conservacionistas, a exemplo do SPD, ao longo dos anos de cultivo e de pastagens bem manejadas, com sistemas de manejo sem conservação, a exemplo do SPC e pastagens degradadas, verificaram que práticas de conservação do solo ao longo do tempo, beneficiam a formação e estabilização dos agregados (ROSSET et al., 2019; OZÓRIO et al., 2019; FALCÃO et al., 2020; FERREIRA et al., 2020).

Foi observada diferença entre os sistemas de manejo em ambos os métodos via seca e via úmida. É possível observar na Figura 5, que o tamisamento via úmida foi mais eficaz em demonstrar a influência dos sistemas de manejo na estabilidade dos agregados. O menor valor do coeficiente de variação para a avaliação da estabilidade dos agregados, com o emprego do tamisamento via seca quando comparada com a via úmida, pode ser atribuído aos elevados teores de argila do solo que conferem maior resistência dos agregados frente ao tamisamento via seco. Esse padrão também foi observado por Perusi & Carvalho (2008) estudando a estabilidade de agregados avaliado através do peneiramento via seca e úmida para diferentes sistemas de uso e manejo em Argissolos no município de Anhumas, SP.

Ao avaliarem a estabilidade dos agregados através dos métodos úmido e seco em um experimento com diferentes densidades de plantio de bananeira, Pinto et al. (2020) observaram que a determinação através do método via úmida apresentou diferenças entre os tratamentos, enquanto para a via seca não foi verificada correlação entre a estabilidade e as densidades de plantio utilizadas.

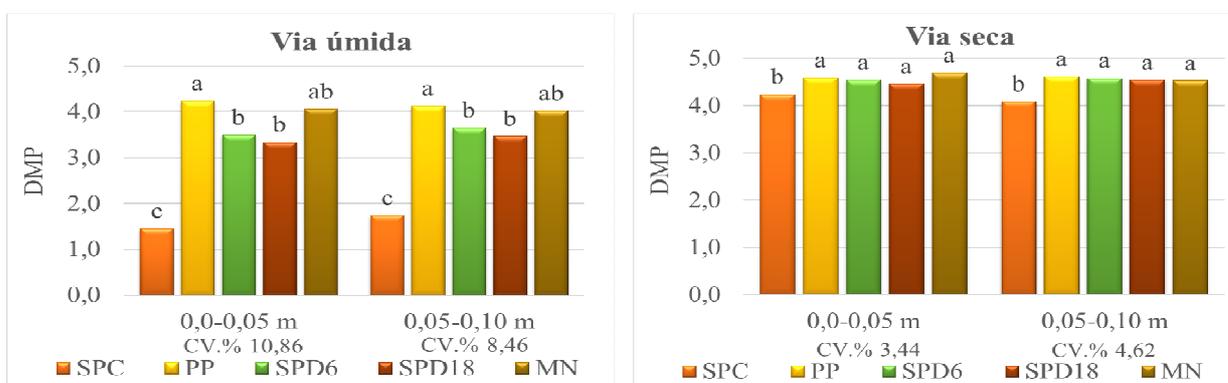


Figura 5. Diâmetro médio ponderado (DMP) via úmida e via seca nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05 – 0,10 m utilizando agregados de 4mm. DMP: Diâmetro Médio Ponderado; SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Valores que apresentaram mesma letra não diferem entre tratamentos para uma mesma profundidade (Bonferroni. $p < 0,05$). CV: Coeficiente de variação.

4.4 Atributos Químicos

Para os atributos químicos são apresentados os valores médios das 4 repetições para os valores de pH, e os teores de Ca, Mg, Na, K, H+Al, P e valores SB, T e V% nos agregados biogênicos e fisiogênicos nas camadas de 0,00-0,05m (Tabela 5) e 0,05-0,10 m (Tabela 6). Foram verificadas diferenças entre as classes de agregados assim como influência dos

sistemas de manejo na fertilidade de agregados biogênicos e fisiogênicos nas duas camadas avaliadas (Tabela 5 e 6). Os únicos atributos que não apresentaram interação entre tratamento e classe de agregado foram pH, K e H+Al na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 5) e Ca, K e Al na camada de 0,05-0,10 m (Tabela 6).

Os valores de pH em água diferiram entre os sistemas avaliados para ambas as camadas, sendo na área de SPC observado os menores valores de pH (5,6), e os valores mais elevados foram verificados na área de SPD₁₈, na camada superficial e em subsuperfície com 6,2 e 6,2 respectivamente. Considerada como de pH mais ácido, a área de SPC, foi a única a diferir das outras áreas de cultivo, devido à incorporação do calcário à 20 cm de profundidade, que pode estar causando uma diluição da neutralização da acidez à aplicação superficial. Sistemas de manejo com elevada produtividade requerem necessariamente a utilização da calagem para assegurar bons níveis de fertilidade, visto que o pH é um atributo que está diretamente relacionado a disponibilidade de nutrientes para as plantas (TEIXEIRA et al., 2017).

Tabela 5. Atributos de fertilidade do solo nos agregados biogênicos e fisiogênicos nas diferentes áreas estudadas para a camada de 0,00-0,05 m.

Área	pH ^(t)	Ca		Mg		K	Na ⁽¹⁾			Al ^(t)		H+Al ^(t)	P ⁽¹⁾	
	H2O	-----cmolc kg ⁻¹ -----												mg dm ⁻³
	*	B	F	B	F	*	B	F	B	F	*	B	F	
SPC	5,6C	3,0Ca	3,5Aa	6,7Aa	3,9ABb	0,8A	0,6Ba	0,6Ba	0,0Ab	0,1ABa	4,83CD	2,9Ab	6,3Aa	
PP	5,9B	4,1BCa	4,5Aa	3,0BCa	2,8Ba	0,8A	0,6Aa	0,6Ba	0,1Aa	0,0 Bb	5,11BC	0,0Ca	0,0Da	
SPD ₆	6,0AB	4,1BCa	4,1Aa	3,4Bb	4,9Aa	1,0A	0,6Ba	0,6Ba	0,1Aa	0,1ABa	4,60D	2,5ABa	2,8Ba	
SPD ₁₈	6,2A	4,3Ba	4,1Aa	1,4Ca	0,78Ca	0,44B	0,6Ba	0,6Ba	0,1Aa	0,0ABa	5,39B	1,7Ba	1,5Ca	
MN	5,7BC	6,0Aa	4,2Ab	2,7BCa	2,7BCa	0,5B	0,6Ba	0,6Ba	0,1Aa	0,1Aa	8,01A	0,1Ca	0,0Ea	
CV(%)	3,09	13,75		28,96		21,27		-			7,31		-	

SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na coluna e minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey (p<0,05). B. Agregados biogênicos. F. Agregados Fisiogênicos. ⁽¹⁾ Dados transformados pelo método de Box-Cox (1964). *Não apresentou interação significativa entre classes de agregados, portanto foi utilizado a média entre eles. ⁽¹⁾Essas variáveis não atenderam aos pressupostos da ANAVA, mesmo com transformação de dados. Logo, métodos não-paramétricos foram utilizados, médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna diferem pelo teste de Kruskal-Wallis e letras minúsculas distintas na linha diferem pelo teste de Wilcoxon.

Tabela 6. Atributos de fertilidade do solo nos agregados biogênicos e fisiogênicos nas diferentes áreas estudadas para a camada de 0,05-0,10 m.

Área	pH ^(t)		Ca	Mg ⁽¹⁾		K	Na ⁽¹⁾		Al	H+Al ^(t)		P ⁽¹⁾		
	B	F	*	B	F	*	B	F	*	B	F	B	F	
	H2O		-----cmolc kg ⁻¹ -----										mg dm ⁻³	
SPC	5,6Ba	5,6Ba	3,4B	2,7ABa	3,6BCa	0,8A	0,57Ba	0,57BCa	0,03B	4,8Ca	4,8Ca	3,5Aa	6,07Aa	
PP	5,9ABa	6,0Aa	3,9B	3,3ABa	4,2ABa	0,7A	0,58Aa	0,58Aa	0,07AB	5,2Ba	5,0Cb	0,0Da	0,0Ca	
SPD ₆	6,0Aa	6,1Aa	4,4AB	3,7Ab	5,2Aa	0,8A	0,58Aba	0,57Ba	0,09A	5,1Ba	4,9Ca	2,3Ba	2,0Ba	
SPD ₁₈	6,21Aa	5,9ABa	3,9B	1,5Ca	2,0Ca	0,3B	0,57Ba	0,57Ba	0,09A	6,4Aa	6,7Ba	1,2Ca	1,52Ba	
MN	6,1Aa	6,0Aa	5,2A	2,5BCa	4,1Ba	0,4B	0,57Ba	0,57Ba	0,13A	6,2Ab	8,9Aa	0Ea	0Da	
CV(%)	--		18,47	--		37,15	--		84,79	5,92		--		

SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na coluna e minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey (p<0,05). B. Agregados biogênicos. F. Agregados Fisiogênicos. ^(t) Dados transformados pelo método de Box-Cox (1964). *Não apresentou interação significativa entre classes de agregados, portanto foi utilizado a média entre eles. ⁽¹⁾Essas variáveis não atenderam aos pressupostos da ANOVA, mesmo com transformação de dados. Logo, métodos não-paramétricos foram utilizados, médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna diferem pelo teste de Kruskal-Wallis e letras minúsculas distintas na linha diferem pelo teste de Wilcoxon.

Tabela 7. Soma de bases, Valor T e V% nos agregados biogênicos e fisiogênicos nas diferentes áreas estudadas para as camadas de 0,05-0,10 m e 0,05-0,10m.

Área	SB		T		V%		Área	SB	T	V%	
	B	F	B	F	B	F				B	F
0,00-0,05m							0,05-0,10m	*	*	B	F
SPC	11,2Aa	8,7ABb	16,1Aa	13,6BCb	70,0Aa	63,90ABb	SPC	8,0C	12,7C	61,3A	63,3A
PP	8,4BCa	8,7ABa	13,4Ba	13,9 Ba	62,8Bca	62,4Ba	PP	8,8BC	13,9BC	61,1A	65,3A
SPD ₆	9,1Ba	10,5Aa	13,7Ba	15,1ABa	66,0ABa	69,6Aa	SPD ₆	10,2A	15,2B	64,6A	69,3A
SPD ₁₈	6,8Ca	5,9Ca	11,9Ba	11,6Ca	57,3Ca	50,5Cb	SPD ₁₈	6,5D	13,2C	49,6B	49,3A
MN	9,7ABa	7,9Bb	17,3Aa	16,4Aa	56,5Ca	48,2Cb	MN	9,5AB	17,06A	67,0A	50,8B
CV(%)	11,12		7,51		5,19		CV(%)	10	7,16	5,01	

SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na coluna e minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey (p<0,05). B. Agregados biogênicos. F. Agregados Fisiogênicos. ⁽¹⁾ Dados transformados pelo método de Box-Cox (1964). *Não apresentou interação significativa entre classes de agregados, portanto foi utilizado a média entre eles. ⁽¹⁾Essas variáveis não atenderam aos pressupostos da ANOVA, mesmo com transformação de dados. Logo, métodos não-paramétricos foram utilizados, médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna diferem pelo teste de Kruskal-Wallis e letras minúsculas distintas na linha diferem pelo teste de Wilcoxon.

A falta de cobertura e o revolvimento do solo no SPC somada a absorção de nutrientes como Ca^{+2} e Mg^{+2} e outros pelo sistema radicular da cultura implantada, que se renova a cada ciclo de cultivo, contribui para o aumento da acidez do solo ao longo do tempo, enquanto o aumento observado no valor de pH na área de SPD₁₈ pode estar relacionado aos maiores conteúdos de matéria orgânica adicionados em superfície através da deposição da palhada responsável pela ciclagem de nutrientes fornecendo nutrientes e complexando o Al (BARBOSA FILHO et al., 2005; SILVA NETO et al., 2016).

Os baixos valores de Al encontrados estão associados com o pH observado. Valores acima de 5,4 (Tabela 5 e 6) favorecem a precipitação do Al^{3+} , e associado ao elevado conteúdo de matéria orgânica que também atua complexando íons de Al em formas estáveis diminuem assim sua disponibilidade em solução do solo.

Para os teores de Ca, foi observada diferença em todos os manejos avaliados. Em ambas as camadas, o maior teor médio foi observado na área de MN com $6,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ na camada superficial e $5,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ na camada de 0,05-0,10 m, podendo estar relacionado ao material de origem (basalto) que faz com que esse Latossolo apresente uma elevada saturação por bases. Os maiores teores médios de Mg^{+2} foram observados nas áreas de SPC e SPD₆, e os menores nas áreas de SPD₁₈ e PP. Os teores de K e P foram mais baixos na área de MN, sendo que na área de PP observou-se os menores teores de P, chegando a 0,0. Tal fato pode ser atribuído a baixa adição de P em pastagens. A disponibilidade de P em sistemas que não utilizam adubação periódica depende da ciclagem de nutrientes e da adsorção com compostos insolúveis que tornam o P indisponível para as plantas.

Resultados semelhantes foram observados por Araújo et al. (2000) que observaram baixos teores de P no solo na área de MN quando comparado a área cultivada em um Latossolo Vermelho Distrófico do noroeste do Paraná. E por Rosset et al. (2014) sobre o mesmo tipo de solo também no município de Guaira, região oeste do estado do Paraná.

Rosset et al. (2015) em seu estudo verificaram o mesmo padrão de baixos valores de P e K na área de MN e PP para a camada 0,00-0,05m, atribuindo esse padrão à baixa fertilidade natural de áreas de mata quanto ao elemento P, enquanto os valores mais elevados em sistemas cultivados são devido a utilização de adubações fosfatadas realizadas anualmente a cada ciclo da cultura.

Foram observados valores de H+Al (Tabela 5 e 6) mais elevados nos sistemas em que houve uma maior adição de C (Tabela 7 e 8) e nas áreas de MN, e os menores na área de SPC, indicando correlação desse atributo com os teores de (COT). Resultados semelhantes foram verificados por Batista (2011) que constatou aumento dos valores de H+Al relacionado aos teores de COT, sendo que esses valores também aumentaram da época chuvosa para época seca na camada superficial de áreas de cultivo localizadas no Cerrado.

A CTC na área de SPC para a camada de 0,00-0,05m chegou a valores próximos aos observados na MN em agregados biogênicos, isto é explicado pelos elevados teores de Mg^{+2} na área de SPC padrão descrito anteriormente, e também verificado na área em SPD₆ na camada 0,05-0,10m. Para os valores de SB na camada de 0,00-0,05 m, nos agregados biogênicos foram observados maiores valores em comparação aos fisiogênicos na área de SPC, sendo observado o mesmo padrão para área de MN, indicando que houve redução deste atributo nos agregados fisiogênicos na camada mais superficial do solo. Os altos valores de Mg^{+2} nos agregados biogênicos contribuem para a diferença no valor SB na área de SPC.

Para os teores de Ca, de modo geral, foi observada diferença entre as classes de agregados da área de MN, sendo observados maiores teores nos agregados biogênicos em comparação aos fisiogênicos para a camada de 0,00-0,05 m, indicando que na via de formação biogênica na área de MN ocorre maior acúmulo de Ca.

Em seus estudos Silva Neto et al. (2010) verificaram que coprólitos em agregados biogênicos possuem maiores teores médios de Ca^{+2} em comparação aos agregados

fisiogênicos em áreas de cultivo de gramíneas para quatro classes de solos avaliadas. Isso se deve à passagem do material do solo pelo trato intestinal das minhocas que possuem glândulas calcíferas e levam ao enriquecimento desse elemento em agregados biogênicos (SCHRADER & ZHANG, 1997). Os resultados encontrados neste estudo também corroboram com Loss et al. (2014b) que observaram níveis elevados de Ca trocável em ambas as classes de agregados em áreas de floresta, sendo os maiores valores médias verificados nos agregados biogênicos.

O padrão observado para os valores de pH, e teores de K e P nas áreas SPC, PP, SPD₆ e SPD₁₈ e MN são distintos dos verificados no trabalho Silva Neto et al. (2010), que identificaram agregados biogênicos com maiores teores de P, K e valores de pH, sendo esses superiores aos encontrados nos agregados fisiogênicos. No presente estudo não foi verificada diferença entre as classes de agregados biogênicos e fisiogênicos para os valores de pH e teores de K. Já para os teores de P, observaram-se maiores teores nos agregados fisiogênicos em comparação aos biogênicos em SPC.

Avaliando os conteúdos de P total e P orgânico, através do fracionamento sequencial, em agregados biogênicos e fisiogênicos provenientes de diferentes sistemas de manejo agroecológico na Fazendinha Agroecológica do km 47 em Seropédica, Moura et al. (2019) observaram que nos agregados fisiogênicos da maioria dos sistemas avaliados os maiores valores de P e suas diferentes formas. Os autores atribuem esse resultado ao maior acúmulo de P em estruturas orgânicas mais recalcitrantes como os ácidos húmicos.

Os resultados observados reforçam que agregados biogênicos e fisiogênicos possuem além de sua morfologia, diferenças em seus atributos químicos, como observado por Batista et al. (2013a) ao avaliarem agregados de diferentes vias de formação em um Latossolo Vermelho do Cerrado.

4.5 Fracionamento Granulométrico da Matéria Orgânica

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados dos teores de COT, carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COam) nas diferentes camadas. Os teores de carbono orgânico total (COT) variaram de 21,49 a 10,48 g kg⁻¹ na camada de 0,00 – 0,05 m e 17,47 a 3,95 g kg⁻¹ na camada 0,05-0,10 m em todas as áreas avaliadas.

Na área de SPD₁₈ foram quantificados os maiores teores de COT nos agregados fisiogênicos, sendo 19,33 g kg⁻¹ na camada 0,00-0,05 m, enquanto o menor valor, 10,48 g kg⁻¹, foi observado nos agregados fisiogênicos na área de MN. Na área de SPD₁₈ na camada 0,05-0,10 m também foram observados os maiores valores de COT quando comparada as outras áreas, tanto para agregados biogênicos quanto para fisiogênicos.

Os teores de COT dos agregados biogênicos na camada 0,00-0,05 m (Tabela 7), os das áreas diferiu, com maiores teores na área de MN, e em SPC os menores teores, enquanto nas áreas PP, SPD₆ e SPD₁₈ não houve diferenças. Já na camada de 0,05-0,10 m (Tabela 8) os maiores teores de COT foram quantificados na área de SPD₁₈, superando os teores da área de MN. Já para as demais áreas não foram observadas diferenças significativas.

Os maiores teores de COT verificados nos agregados biogênicos na área de SPD₁₈ podem estar relacionados ao maior aporte, acúmulo e manutenção de resíduos vegetais e o menor revolvimento do solo quando comparado aos demais sistemas de cultivo (JAKELAITIS et al., 2008; PORTO et al., 2009). Adicionalmente o tempo de implementação do SPD favoreceu aumento no conteúdo de COT nos agregados biogênicos e fisiogênicos na camada 0,05-0,10 m, e nos fisiogênicos da camada superficial.

Rosset et al. (2016) verificaram o aumento dos teores de carbono total e das frações mais lábeis da matéria orgânica com o tempo de adoção do SPD ao avaliar diferentes sistemas

em um Latossolo Vermelho de textura muito argilosa, destacando o maior aumento entre as áreas de SPD com 14 anos (fase de consolidação) e SPD com 22 anos (fase de manutenção). Os autores concluíram que a prática de revolvimento do solo reduz a estabilidade do carbono do solo, principalmente da fração humina.

Tabela 8. Teor de carbono orgânico total e das frações granulométricas da matéria orgânica do solo nos agregados biogênicos e fisiogênicos das diferentes áreas estudadas na camada de 0,00-0,05 m.

Área	COT		COp ⁽¹⁾		COam	
	-----g kg ⁻¹ -----					
	B	F	B	F	B	F
SPC	11,23Ba	10,88ABa	1,13Ca	0,72Ba	10,10Aa	10,15ABa
PP	15,30ABa	18,78ABa	1,45BCb	2,42Aa	13,84Aa	16,36ABa
SPD ₆	14,13ABa	13,70ABa	1,27BCa	0,78Bb	12,86Aa	12,93ABa
SPD ₁₈	14,60ABa	19,33Aa	2,60ABa	1,82Aa	12,00Aa	17,50Aa
MN	21,49Aa	10,48Bb	3,30Aa	2,10Aa	18,18Aa	8,40Bb
CV (%)	27,92		86,69		30,23	

COT: Carbono Orgânico Total; COp: Carbono Orgânico Particulado; COam: Carbono Orgânico associado aos Minerais. SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. B. Agregados biogênicos. F. Agregados Fisiogênicos. Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na coluna e minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey (p<0,05). ⁽¹⁾ Dados transformados pelo método de Box-Cox (1964).

Na área de SPC foram quantificados os menores teores de carbono orgânico particulado (COp) quando comparados aos demais sistemas (Tabelas 7 e 8), indicando que as atividades de preparo do solo reduzem a estabilidade dos agregados diminuindo a proteção física que os agregados proporcionam a matéria orgânica, expondo esse COp para oxidação pela microfauna do solo (GOLCHIN et al., 1994). Os teores de COp variam de 3,30 a 0,72 g kg⁻¹ na camada de 0,00 – 0,05 m, e 2,52 a 0,51 g kg⁻¹ em 0,05 – 0,10 m, sendo os maiores teores nas áreas de SPD₁₈ em 0,05-0,10 e MN em 0,00-0,05m. Resultados semelhantes foram observados por Pinto et al. (2021) nos tratamentos SPD + Milheto com 18 anos de implantação e SPD + Crotalária com 6 anos, sendo corroborado pelos altos teores encontrados em SPD₁₈ nesse estudo.

Estudos como os de Loss et al. (2014), Batista (2015) e Rossi et al. (2016) verificaram maior sensibilidade da fração COp as mudanças causadas pelas diferentes formas de manejo ou cobertura vegetal, sendo essa percepção ainda mais evidente nos agregados biogênicos, o que pode estar relacionada a maior proteção desta fração de maior labilidade no interior dos agregados biogênicos. Enquanto para os agregados fisiogênicos, foi observada diferença apenas para a área de SPC, com os menores teores em ambas as camadas. Para a área de PP nos agregados biogênicos foram quantificados menores teores de COp em comparação aos fisiogênicos nas duas camadas avaliadas, este resultado indica que esta área pode estar influenciando positivamente a atividade dos microrganismos do solo, favorecendo que a MO passe para formas mais recalcitrantes.

Tabela 9. Teor de carbono orgânico total e das frações granulométricas da matéria orgânica do solo nos agregados biogênicos e fisiogênicos das diferentes áreas estudadas na camada de 0,05-0,10 m.

Área	COT ^(t)		COp ^(t)		COam	
	-----g kg ⁻¹ -----					
	B	F	B	F	B	F
SPC	7,97Ba	10,17Ba	0,7Da	0,5Bb	7,27ABa	9,67Ba
PP	6,82Ba	6,55BCa	1,1Cb	1,65Aa	5,72Ba	4,9BCa
SPD ₆	12,01 ^a Ba	3,95Cb	1,67Ba	1,8Aa	10,34ABa	2,15Cb
SPD ₁₈	15,58Aa	17,47Aa	2,52Aa	1,47Ab	13,00Aa	16,00Aa
MN	12,03ABa	4,83BCb	2,25ABa	1,9Aa	9,78ABa	2,94Cb
CV (%)	28,63		22,75		35,29	

COT: Carbono Orgânico Total; COp: Carbono Orgânico Particulado; COam: Carbono Orgânico associado aos Minerais. SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. B. Agregados biogênicos. F. Agregados Fisiogênicos. Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na coluna e minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey (p<0,05). ^(t) Dados transformados pelo método de Box-Cox (1964).

Ferreira et al. (2020) encontraram na estação seca maiores teores de COp em todas as classes de agregados de formação de agregados em área de SPD com 23 anos de implementação quando comparada a outros sistemas de manejo. Os autores concluem que esses resultados são decorrentes aos solos sob SPD serem submetidos a mínima perturbação, além de fornecimento constante de material orgânico em superfície, de forma que os agregados são preservados, possibilitando maior proteção do C nesta fração da MOS.

Em estudos em diversas condições de solo e sistemas de manejo, alguns autores relataram que agregados biogênicos apresentam maiores teores de COp quando comparados aos fisiogênicos (LOSS et al., 2014; BATISTA, 2015; ROSSI et al., 2016; SCHULTZ et al., 2019; FERREIRA et al., 2020), reforçando a hipótese que agregados da classe biogênica proporcionam maior proteção e estabilização da fração particulada da matéria orgânica do solo em comparação a agregados fisiogênicos. Ao avaliar as frações da matéria orgânica de agregados em áreas de SPD no Cerrado Mineiro, Pinto (2020) observou que em SPD com 18 anos, e SPC com 20 anos, os teores de COp foram maiores em agregados biogênicos quando comparados aos fisiogênicos, atribuindo esse resultado a uma maior manutenção e incorporação de matéria orgânica mais lábil nos agregados biogênicos devido a atuação da fauna do solo e das raízes das plantas.

Para o carbono orgânico associado aos minerais (COam), não foram verificadas diferenças entre os agregados biogênicos para a camada de 0,00-0,05 m (Tabela 7), enquanto para os agregados fisiogênicos da mesma camada, o maior teor foi observado na área de SPD₁₈, e o menor na área de MN, enquanto as áreas de SPD₆, PP e SPC foram semelhantes. A fauna atua na decomposição da MOS promovendo a formação de compostos orgânicos mais recalcitrantes, que pode estar ocasionando menor efeito dos sistemas de manejo avaliados no COam nos agregados biogênicos da camada 0,00-0,05 m.

Na camada de 0,05-0,10 m (Tabela 8), tanto para os agregados biogênicos quanto para fisiogênicos, os maiores teores de COT, COp e COam foram observados em SPD₁₈. COam é a fração da MOS que está associada diretamente às frações silte e argila, interagindo com a

superfície destas partículas e formando os complexos organominerais, estando protegida pelos colóides do solo (CHRISTENSEN, 2001; FERREIRA et al., 2020).

Ao comparar o tempo de implementação do SPD, é possível observar que houve aumento nos teores de COT (apenas nos fisiogênicos), COp (biogênicos e fisiogênicos) e COam (apenas nos fisiogênicos) na camada de 0,00-0,05 m. Esse padrão também é observado na camada de 0,05-0,10 m em quase todas as áreas avaliadas e vias de formação. Resultados semelhantes foram observados por Rosset et al. (2019) e Ferreira et al. (2020) em Latossolo Vermelho localizado na mesma região deste estudo. Estes dados demonstram que o tempo de implantação do SPD contribuiu para o aumento do estoque de carbono das frações da MOS.

Na comparação entre os teores de COT, COp e COam entre as vias de formação, foram observadas diferenças entre as áreas, nas quais para os agregados biogênicos da área de MN foram verificados os maiores teores de COT em comparação aos fisiogênicos nas duas camadas, sendo o mesmo padrão observado para a área de SPD₆ na camada de 0,05-0,10 m. Maiores teores de COT na área de MN também foram relatados por outros autores (BATISTA et al., 2013b; LOSS et al., 2014; FERREIRA et al., 2020) indicando que agregados biogênicos possuem maior conteúdo de COT em seu interior.

Nas áreas de PP os valores de COp foram maiores na via de formação fisiogênica quando comparada a biogênica em ambas as camadas. Enquanto na área de SPD₁₈ na camada 0,00-0,05 m, foram observados maiores teores de COp nos agregados biogênicos em comparação aos agregados fisiogênicos. Já na camada 0,05-0,10 m foi quantificado maior conteúdo de COp nos agregados biogênicos da área de SPD₁₈, e nos biogênicos na área de SPC quando comparados aos fisiogênicos.

Na área de MN, em ambas as camadas, os teores médios de COam foram maiores nos agregados biogênicos quando comparados aos fisiogênicos (Tabela 7 e 8). Isto se deve ao aumento dos teores de carbono ocasionado pela maior atividade biológica (raízes e fauna do solo) em áreas de vegetação nativa (MACHADO et al., 2015, BATISTA 2015). Maiores teores de COam nos agregados biogênicos também foram observados por Loss et al. (2014), que estudaram o efeito de diferentes sistemas de culturas sobre a formação de agregados biogênicos e fisiogênicos.

4.6 Fracionamento Densimétrico da Matéria Orgânica

Verificou-se que a massa da fração leve livre (FLL) e fração leve livre intra-agregado (FLLI) diferiram entre os sistemas de cultivo para ambas as camadas avaliadas (Tabelas 9). Enquanto os teores de carbono da FLL e FLLI (C-FLL e C-FLLI, respectivamente) apresentados na tabela 10, indicaram diferença apenas para a fração C-FLLI para a camada de 0,00-0,05 m, não sendo observadas diferença entre as classes de agregados.

No SPD₁₈ foram verificados os maiores valores de massa nos agregados biogênicos da FLL (SPD₁₈>MN=SPD₆>PP>SPC) para a camada de 0,00-0,05 m (Tabela 9), indicando que os resíduos vegetais que são adicionados em superfície na área de SPD favorecem maior proteção física da FLL, enquanto o maior revolvimento e intensivo uso do solo no SPC contribuíram para os menores valores de massa da FLL. Padrão similar foi verificado por Pinheiro et al. (2004) em áreas de SPC sob Latossolo Vermelho Distrófico no município de Paty de Alferes (RJ), atribuindo os baixos valores de massa da FLL ao elevado grau de revolvimento do solo, e a não-adição de material orgânico em SPC, ressaltando também a redução da FLLI na área de SPC.

O uso do solo com PP e outras formas de manejo, principalmente SPC, reduziram a quantidade de FLL nos agregados biogênicos, em especial na camada 0,00-0,05 m, indicando maior labilidade e sensibilidade ao manejo por parte desta fração (CONCEIÇÃO et al., 2008; PINTO, 2020; COSTA JUNIOR et al., 2011). Os resultados também corroboram com dados

Frazão et al. (2010) que ao avaliarem os estoques da fração leve e matéria orgânica em SPC e SPD, observaram que, em todas as áreas sob uso agrícola ocorreu a redução nos estoques de C-FLL quando comparadas a área de mata nativa, indicando baixo aporte de resíduos pelos sistemas agrícolas estudados associados a uma rápida decomposição dos mesmos em áreas manejadas.

Tabela 10. Massa de material orgânico obtido a partir do fracionamento densimétrico nos agregados biogênicos e fisiogênicos das diferentes áreas estudadas nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m.

Área	FLL ⁽¹⁾		FLLI	
	-----g kg ⁻¹ -----			
0,00-0,05 m	B	F	B	F
SPC	4,27Da	2,63Ca	2,04ns	1,69ns
PP	6,88Ca	11,13Aa	2,08ns	1,58ns
SPD ₆	8,71Ba	6,78BCa	2,18ns	2,13ns
SPD ₁₈	11,81Aa	7,81ABa	1,96ns	1,79ns
MN	8,57Ba	10,38ABa	2,41ns	2,64ns
0,05-0,10 m	B	F	B	F
SPC	3,33Ca	3,39Ca	1,10Ba	1,30Ba
PP	5,65BCa	6,70BCa	2,42Ba	1,55Ba
SPD ₆	6,41BCa	5,97BCa	1,76Ba	0,89Ba
SPD ₁₈	8,48ABa	6,53ABa	2,06Ba	2,23Ba
MN	11,91Aa	8,77Aa	3,50Aa	3,25Aa

FLL: Fração leve livre; FLLI: Fração leve livre intra-agregado; SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. B. Agregados biogênicos. F. Agregados Fisiogênicos. ⁽¹⁾ Essa variável não atende aos pressupostos da ANAVA, mesmo com transformação de dados. Logo, métodos não-paramétricos foram utilizados, médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna diferem pelo teste de Kruskal-Wallis, e letras minúsculas distintas na linha diferem pelo teste de Wilcoxon. ns De acordo com o teste F as médias da coluna são estatisticamente iguais.

Para a camada de 0,05-0,10 m através da análise da massa da FLL também verificou-se a influência dos sistemas de manejo, quantificando-se os maiores valores desta fração nas duas vias de formação na área de SPD₁₈, em que observaram-se os maiores valores de massa, sendo estes somente inferiores aos determinados na área MN (Tabela 9). A distribuição em ordem decrescente da massa para essa fração, obedeceu a seguinte distribuição: MN>SPD₁₈>SPD₆=PP>SPC. Não foi observada diferença significativa entre sistemas de manejo ou entre as classes de agregados pelo teste F ($p \geq 0,05$) para a FLLI na camada de 0,00-0,05 m, bem como entre classes de agregados na camada 0,05-0,10 m, sendo observada nesta última camada apenas diferença entre a área de MN e os demais sistemas de manejo.

Com relação aos teores de carbono C-FLL e C-FLLI, não foram observadas diferenças entre tratamentos e classes de agregados, com exceção para a o C-FLLI na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 10), que demonstrou aumento dessa fração nas áreas de SPD com 6 anos e 18 anos se aproximando dos teores observados na área de MN, indicando que os sistemas conservacionistas acumulam mais material orgânico. Adicionalmente, a maior estabilidade dos agregados (DMP) (Tabela 4) observada nestas áreas favorecem maior proteção física contribuindo assim para o aumento do conteúdo de carbono nas frações leves.

As estruturas orgânicas presentes no C-FLL possuem grande similaridade com as observadas no COp (CONCEIÇÃO et al., 2007), podendo haver correlação entre essas frações como observado por alguns autores (PINHEIRO et al., 2004; PINTO et al., 2021; CONCEIÇÃO et al., 2007). O C-FLL representa a capacidade que o manejo e a vegetação de cobertura têm em assegurar os estoques de carbono no solo ao longo dos anos de cultivo (FRAZÃO et al., 2010; PINHEIRO et al., 2004; RANGEL & SILVA, 2007).

O C-FLLI mostrou-se ser mais sensível a alterações no manejo que a fração C-FLL, visto que foi a única a apresentar teores médios diferentes entre os sistemas de manejo avaliados. Esses resultados são discordantes dos encontrados por Pinheiro et al. (2004) que concluíram que os teores de C-FLL demonstraram maior sensibilidade aos diferentes sistemas de manejo.

Tabela 11. Carbono da Fração leve livre (C-FLL) e Fração leve livre intra-agregados (C-FLLI) em agregados biogênicos e fisiogênicos das diferentes áreas estudadas nas camadas de 0,00-0,05m e 0,05-0,10m.

Área	C-FLL ⁽¹⁾		C-FLLI	
	-----g kg ⁻¹ -----			
0,00-0,05 m	B	F	B	F
SPC	0,91ns	0,61ns	0,21B	0,25B
PP	0,96ns	1,00ns	0,25B	0,24B
SPD ₆	1,06ns	0,79ns	0,29AB	0,34AB
SPD ₁₈	1,11ns	0,96ns	0,33AB	0,20AB
MN	1,16ns	1,25ns	0,42A	0,44 ^a
	-----g kg ⁻¹ -----			
0,05-0,10 m	B	F	B	F
SPC	0,78ns	0,70ns	0,20ns	0,14ns
PP	0,89ns	0,94ns	0,25ns	0,22ns
SPD ₆	0,94ns	0,91ns	0,27ns	0,19nsn
SPD ₁₈	1,14ns	0,86ns	0,31ns	0,27ns
MN	0,96ns	1,15ns	0,36ns	0,36ns

C-FLL: Carbono da fração leve livre; C-FLLI: Carbono da fração leve livre intra-agregado; SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. B. Agregados biogênicos. F. Agregados Fisiogênicos. Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p<0,05). ns De acordo com o teste F as médias da coluna são estatisticamente iguais.

4.7 Abundância do ¹³C

Foi observada diferença significativa entre os sistemas de manejo para a abundância isotópica de ¹³C nos agregados fisiogênicos e biogênicos em ambas as camadas (Tabela 11). Sendo a análise do ¹³C uma ferramenta utilizada para verificar o histórico das áreas de cultivo, e também quantificar quais culturas estão contribuindo mais para formação da MOS (GUARESCHI et al., 2012).

A assinatura isotópica do ^{13}C foi maior nas áreas de PP para as ambas as vias de formação nas duas camadas avaliadas, com maior valor de -18,95% nos agregados biogênicos na camada 0,00-0,05 m. A gramínea coast-Cross (*Cynodon dactylon*) utilizada na área de PP se caracteriza como de ciclo fotossintético C4 (-12%), indicando que os maiores valores observados nesta área são devido a maior contribuição dessa gramínea, que ao longo dos 45 anos de implantação adicionou material vegetal em superfície.

Nos agregados biogênicos da área de PP, nota-se redução no valor de ^{13}C de -18,95% na camada de 0,00-0,05 m, para -20,01% na camada de 0,05-0,10 m, indicando que está ocorrendo substituição gradativa do C adicionado pela gramínea. Estes resultados corroboram com estudos realizados por Assunção et al. (2019), que observaram maior variação em ^{13}C com valores de -20,00% para camadas superficiais e -18,00% em subsuperfície em sistema de pastagem. Os autores ainda atribuíram as mudanças da composição isotópica do carbono resultado da contribuição de 41 anos de implantação da pastagem, com predomínio de plantas C3.

Costa Junior et al. (2011) observaram substituição de até 83% na camada de 0,00-0,20 m em área de pastagem, diminuindo em camadas mais profundas. Os autores concluíram também que microagregados fornecem maior proteção ao C quando comparados aos meso e macroagregados, utilizando o tempo de residência média do C nestas estruturas.

Os valores mais negativos de ^{13}C foram observados na área de MN, padrão também observado por Dortzbach et al. (2015) verificando valores mais negativos em uma área de floresta pouco alterada no estado de Santa Catarina quando comparada a áreas de pastagem permanente com 25 e 70 anos de implantação. Os autores avaliaram a conversão floresta – pastagem e pastagem – floresta, concluindo que houve mudanças nas proporções de C originado pela mata nativa e do adicionado pelo pasto, salientando que a conversão é um processo lento pois em pastagens com 50 anos de uso foi encontrado 66% do COT derivado da floresta na camada superficial

Tabela 12. Abundância natural de ^{13}C (%) em agregados biogênicos e fisiogênicos, em diferentes sistemas de uso do solo em Guaíra, PR, nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m.

Manejo	Abundância natural de ^{13}C			
	0,00-0,05 m		0,05-0,10 m	
	B	F	B	F
SPC	-23,19Ca	-22,81Ba	-23,32Ba	-22,90Ba
PP	-18,95Aa	-19,50Aa	-20,01Aa	-19,29Aa
SPD6	-23,62Ca	-23,57Ca	-23,61Ca	-23,89Da
SPD18	-22,83Ba	-23,20BCa	-23,24Ba	-23,33Ca
MN	-25,40Da	-25,03Da	-25,09Da	-24,88Ea

SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. B. Agregados biogênicos. F. Agregados Fisiogênicos. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem pelo teste de Kruskal-Wallis (p < 0,05) e letras minúsculas na linha pelo teste de Wilcoxon (p < 0,05).

Esse padrão também pode ser observado em outros biomas, como no estudo desenvolvido por Loss et al. (2011) que verificaram valores de ^{13}C mais negativos em área de cerrado quando comparada ao SPD. Para os agregados biogênicos na camada 0,00-0,05 m, na área de SPD₁₈ os resultados foram mais próximos na área PP, indicando que o milho (*Zea mays* L.), uma planta C4, cultivado em consórcio, pode ter contribuído de forma mais significativa para o aumento do C armazenado no solo, refletindo assim na abundância natural de ^{13}C . Enquanto nas áreas de SPD₆ os valores encontrados indicam modificação desse

atributo em direção aos valores médios estabelecidos para plantas C3 (-28%), corroborando com Guareschi et al. (2012) que encontraram resultados semelhantes em seu estudo.

Avaliando as influências de diferentes consórcios em áreas de SPD nas frações da MOS, Pinto et al. (2021) constataram que os agregados biogênicos apresentaram valores mais negativos de ^{13}C quando comparados aos fisiogênicos, não corroborando com resultados observados no presente estudo. Já Bossuyt et al. (2005) estudando a função das minhocas para proteção física do C com a utilização de sorgo marcado com ^{13}C , verificaram uma contribuição de 22% maior de agregados biogênicos em comparação aos fisiogênicos.

4.8 Análise de Agrupamentos

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada a partir das interpretações da distribuição dos atributos químicos e físicos, do conteúdo de COT e das frações da MOS nas vias de formação dos agregados em diferentes sistemas de manejo do solo (Figuras 6 e 7). Os resultados são dispostos nos eixos 1 e 2, estes eixos são as componentes que visam explicar os dados em função dos atributos avaliados de modo a captar a maior variabilidade possível de explicação dos dados, e as setas representam os atributos avaliados, indicando a direção do gradiente máximo, e o comprimento da seta indica a proporção que este atributo se correlaciona com os eixos (PINTO, 2020).

Para a camada de 0,00-0,05 m, a componente 1 explica 33% da variância total e a componente 2, 18%. Juntas elas explicam 51% da variância nos dados originais. Para essa camada é possível observar a formação de três grupos que separam atributos e áreas de cultivo. Esses resultados indicam que as diferentes práticas de manejo influenciam fortemente nos atributos estudados. As frações de carbono (COT, COp e COAM, FLL, FLLI, C-FLL e C-FLLI), teores de Ca^{2+} e DMP são definidos por valores positivos na PC1, indicando o melhor estado de conservação do solo nas áreas de MN e PP.

O SPC se distanciou dos outros sistemas de cultivo nos atributos avaliados principalmente na componente 1, onde foi definido pelos valores negativos da PC1 se correlacionando com os nutrientes Mg, K e P. O sistema mais próximo ao SPC foi o SPD₆, essas tendências podem ser explicadas ao fato do manejo do solo utilizado em SPC reduzem o aporte e manutenção da MOS distanciando este dos sistemas conservacionistas, enquanto o SPD₆ ainda apresenta maior correlação com o SPC devido ao pouco tempo de conversão do sistema quando comparado ao SPD₁₈.

Já na camada 0,05-0,10 m, a componente 1 explicou 33% da variância, e a componente 2, 22%, totalizando 55% da variância total nos dados originais. Nesta camada é possível observar o acréscimo de mais um grupo, sendo os atributos DMP, pH, Ca^{+2} , Al^{+3} e H+Al e frações da MOS (COp, FLL, FLLI, C-FLL e C-FLLI) são definidos por valores positivos na PC1, assim como observado na camada superior, enquanto os atributos COAM e COT agrupam juntamente com o SPD₁₈, demonstrando que o manejo aplicado nesta área favorece o maior aporte e manutenção do C no solo na profundidade 0,05-0,10 m. O COp foi mais fortemente relacionado com a área MN, indicando maior capacidade de proteção da matéria orgânica particulada em ambas as camadas.

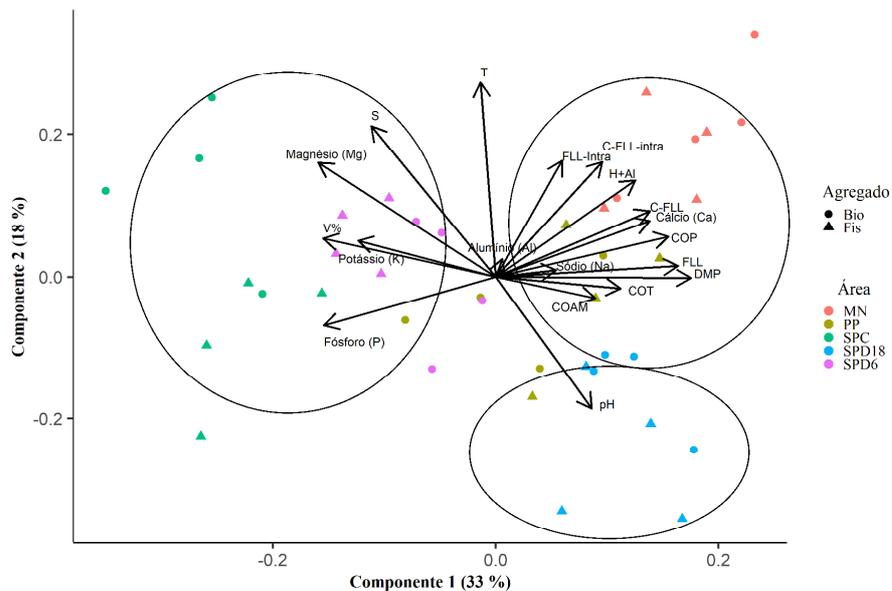


Figura 6. Análise de componentes principais dos atributos estudados na camada de 0,00-0,05 m. SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Bio. Agregados biogênicos. Fis. Agregados Fisiogênicos.

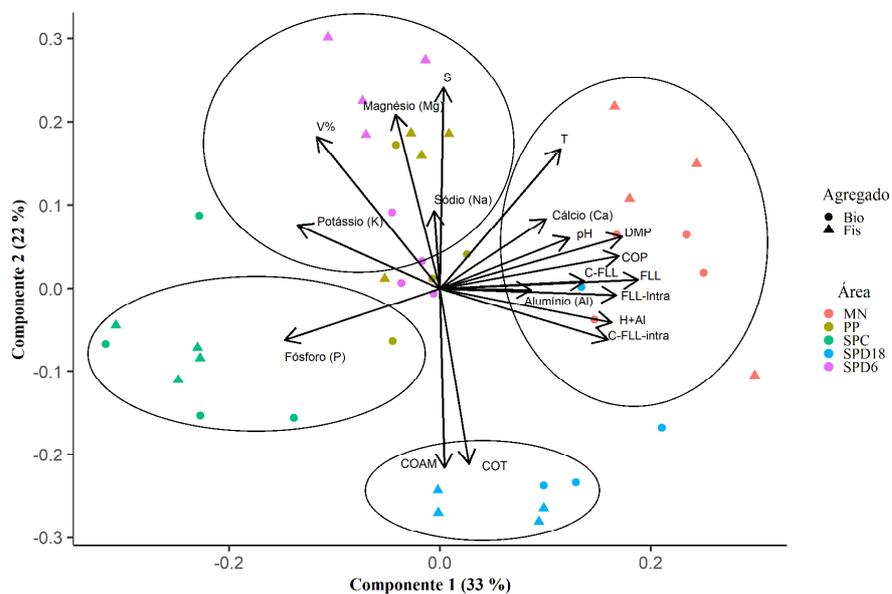


Figura 7. Análise de componentes principais dos atributos estudados na camada de 0,05-0,10 m. SPC: Sistema de Preparo Convencional; PP: Pastagem Permanente; SPD₆: Sistema Plantio Direto com 6 anos; SPD₁₈: Sistema Plantio Direto com 18 anos; MN: Mata Nativa. Bio. Agregados biogênicos. Fis. Agregados Fisiogênicos.

Foi observado que os diferentes tempos de implantação do SPD contribuíram para identificar semelhanças ou diferenças entre as áreas principalmente na camada de 0,05-0,10 m. Isso indica que o maior tempo de adoção do SPD aproximou os atributos comparados aos encontrados em área de MN, que é considerada um referencial positivo para a avaliação dos atributos do solo em áreas de produção vegetal.

5. CONCLUSÕES

Os teores de carbono orgânico total e os teores obtidos através do fracionamento granulométrico foram sensíveis para detectar diferenças entre os sistemas de manejo do solo, sendo que a magnitude dos efeitos foi maior nas frações lábeis da matéria orgânica do solo.

Na área de SPC observaram-se os menores valores de agregação, identificados pelo índice do DMP, independente da camada e da via de formação do agregado, demonstrando o impacto desse sistema de manejo na agregação do solo.

Na área de SPD após dezoito anos foi verificado acúmulo de MOS similar ao observado na área floresta, sendo quantificados maiores valores tanto nos agregados fisiogênicos quanto nos biogênicos. Nesta área também foram verificados incrementos nas frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo indicando que o manejo conservacionista favorece maior proteção física da MOS, demonstrando uma maior estabilidade desse sistema em função das práticas conservacionistas realizadas.

Através do emprego da análise de componentes principais, comprovou-se a influência dos manejos aplicados sendo possível estabelecer a separação destes em diferentes grupos, verificando-se a individualização da área de SPC das áreas de SPD e MN.

Para os agregados formados na área de referência foram observadas diferenças significativas em comparação aos formados nos demais sistemas, indicando que as diferentes vias podem ser utilizadas como indicadores de qualidade de solo em sistemas submetidos a diferentes tipos de manejo ou cobertura vegetal.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. Informe Agropecuário, v. 22 (208), p. 25-36, 2001.
- ALVARES, C. A., STAPES, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M., SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22 (6), p. 711–728, 2014.
- ANDRADE, E. A.; AQUINO, D. N.; COSTA, M. C. G.; SANTOS, C. L. A.; ALMEIDA, A. M. M. Raleamento em floresta tropical seca pode aumentar a biomassa radicular, estoque de carbono e tamanho de agregados em Vertissolo. Agro@mbiente On-line, v. 15, 2021.
- 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.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. Acta Amazônica, v. 41, n. 1, pp. 103-114, 2011.
- ARAÚJO, M. A. A.; TORMENA, C. A.; WATANABE, S. H.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. C.; MATA, J. D. V. Avaliação do impacto do cultivo nas características químicas e na agregação de um latossolo vermelho distrófico do noroeste do Paraná. Acta Scientiarum, Maringá, vol.22, n.4, p.1045-1053, 2000.
- ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA M. G.; ROSSET J. S.; BERBARA R. L. L.; GARCÍA A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. Science of the Total Environ, n. 658, p. 901–911, 2019.
- BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos de fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro e da soja influenciados pela calagem em superfície e39 incorporada. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 29, n. 3, p. 507-514, 2005.
- BATISTA, I. Relação entre macrofauna, agregação e atributos edáficos em sequência de culturas sob plantio direto. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, p.94, 2015.
- BATISTA, I. Atributos edáficos e fauna do solo em áreas de integração lavoura-pecuária no bioma Cerrado, Mato Grosso do Sul. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, p.86, 2011.
- BATISTA, I.; CORREIA, M.E.F.; PEREIRA, M.G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J.A.; MELLO, N.A. de. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. Semina: Ciências Agrárias, v.34, p.1535-1548, 2013 (a).
- 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 (b).

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. da. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v.48, p.863-871, 2005.

BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. Mapa de solos do Estado do Paraná. Legenda atualizada. Rio de Janeiro, Embrapa Florestas/Embrapa Solos/Instituto Agronômico do Paraná, p.74, 2008.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; Carbon accumulation at depth in Ferrasols under zero-till subtropical agriculture. *Global Change Biol.* 16 (2), 784–795, 2010.

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.

BOUTTON, T. W. Stable carbon isotope ratios of natural materials: II. Atmospheric, Terrestrial, Marine, and Freshwater environments. In D.C. Coleman and B. Fry (ed.) *Carbon isotope techniques*. Academic Press, San Diego, CA, p. 173–185, 1991.

BOX GEP, COX DR. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Society*, v.26 p. 211-252, 1964.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, v. 124, n. 12, p. 3-22, 2005.

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. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, n. 56, p. 777-783, 1992.

CASTRO FILHO, C. de. Effects of liming on characteristics of a Brazilian Oxisol at three levels of organic matter as related to erosion. Tesis (Doctor) - The Ohio State University, 1998.

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.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, Vol 52, p.345–353, Set, 2001.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping system in soil carbon stocks and stabilization. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 129, p. 40-47, 2013.

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. Eficiência do polítungstato 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, v.32, p.541-549, 2008.

COSTA JUNIOR. C.; PICCOLO M.C.; Neto M.V S.; BERNOUX M. Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no bioma Cerrado. Revista Brasileira de Ciências do Solo, n. 33, p. 1-12, 2012.

COSTA JUNIOR C.; PICCOLO M. C.; NETO M. S.; CAMARGO P. B.; CERRI C. C.; BERNOUX M. Carbono total e $\delta^{13}C$ em agregados dos solos sob vegetação nativa e pastagem no bioma Cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, n. 35, p. 1241-1252, 2011.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C., FON TOUR A, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. Revista Brasileira de Ciência do Solo, n. 27, p. 527- 535, 2003.

COUTINHO, F. S.; PINTO, L. A. S. R.; PEREIRA, M. G.; ASSUNÇÃO, S. A.; ZANDONÁ, S. R.; BARROS, F. C.; SOUZA, R. S.; FAGUNDES, H. S.; SOUZA, E. H. S. Soil quality indicators in areas with different vegetation cover in the Atlantic Forest biome, Southeastern Brazil. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.11, n.7, p.1-15, 2020.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N. D.; WIETHÓLTER, S. Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, 15 p, 2012.

DEVINE, S.; MARKEWITZ, D.; HENDRIX, P.; COLEMAN, D. Soil Aggregates and Associated Organic Matter under Conventional Tillage, No-Tillage, and Forest Succession after Three Decades. Plos One, California, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2014.

DORTZBACH, D.; PEREIRA, M. G.; BLAINSKI, E.; GONZÁLEZ, A. P. Estoque de C e abundância natural de ^{13}C em razão da conversão de áreas de floresta e pastagem em bioma Mata Atlântica. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, p.1643-1660, 2015.

DRIVER J. D.; HOLBEN W. E.; RILLIG M. C. Characterization of glomalin as a htpal wall component of arbuscular mychorrhizal fungi. Soil Biology & Biochemistry, n. 37, p. 101-106, 2004.

DUCATTI C. Aplicação dos isótopos estáveis em aquíicultura. Revista Brasileira de Zootecnia, n. 36, p. 01-10, 2007.

Dufranc, G.; Dechen, S. C. F.; Freitas, S. S.; Camargo, O. A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados em dois latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p.505-517, 2004.

FAO. Global forest resources assessment – key findings, Policy research paper, FAO, Rome, 2020.

FALCÃO, K. S.; MONTEIRO, F. N.; OZÓRIO, J. M. B.; SOUZA, C. B. S.; FARIAS, P. G. S.; MENEZES, R. S.; PANACHUKI, E.; ROSSET, J. S. Estoque de carbono e agregação do solo sob diferentes sistemas de uso no Cerrado. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 55(2), 242-255, 2020.

FERREIRA, C. R.; NASCIMENTO GUEDES, J.; ROSSET, J. S.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Diversity of the edaphic macrofauna in áreas managed under no-tillage for diferente periods. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(2), 599-610, 2019.

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 & Tillage Research*, n. 198, p. 1-9, 2020.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M. D.; DEBIASI, H.; TORRES, E. Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná. *Embrapa Soja*, Londrina, p. 52, 2011.

FRAZÃO, L. A.; SANTANA, I. K. S.; CAMPOS, D. V. B.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 45, n. 10, p. 1198-1204, 2010.

GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; SKJEMSTAD, J. O.; CLARKE, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research*, 32: 285-309, 1994.

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, MG, v. 36, n. 3, p. 1-10, 2012.

HAYNES, R. J.; FRASER, P. M.; PIERCY, J. E.; TREGURTHA, R. J. Casts of *Aporrectodea caliginosa* (Savigny) and *Lumbricus rubellus* (Hoffmeister) differ in microbial activity, nutrient availability and aggregate stability. *Pedobiologia*, v.47, p.882–887, 2003.

HECKLER, I. C.; HERNANI, I. C.; PITO, L.; PALHA, C. IN: SALTON, I.C., HERNANI, I. C.; FONTES, C. Z. (Org.). Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a EMBRAPA responde. *Dourados: EMBRAPA-CPAO*, p.37- 49, 1998.

HERNANI, L. C.; FREITAS, P. L.; DENARDIN, J. E.; KOCHANN, R. A.; DE-MARIA, I. C.; LANDERS, J. N. Uma resposta conservacionista – o impacto do Sistema de plantio direto. *Repositório de Informação Tecnológica da Embrapa*, cap 14, 2002.

HOOPER, D. U.; BIGNELL, D. E.; BROWN, V. K.; BRUSSAARD, L.; DANGERFIELD, J. M.; WALL, D. H.; WARDLE, D. A.; COLEMAN, D. C.; GILLER, K. E.; LAVELLE, P.; VAN DER PUTTEN, W. H.; DE RUITER, P. C.; RUSEK, J.; SILVER, W. L.; TIEDJE, J. M.; WOLTERS, V. Interactions between aboveground and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: patterns, mechanisms, and feedbacks. *Bioscience*, Oxford, v. 50, p. 1049–1061, 2000.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema de Recuperação Automática – SIDRA. (2014).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). Disponível em:<<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/pt/agencia-home.html>>. Acessado em 05/08/21

JAKELAITIS, A.; SILVA, A. A.; SANTOS, J. B.; VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.38, p.118-127, 2008.

JOUQUET, P.; BOTTINELLI, N.; PODWOJEWSKI, P.; HALLAIRE, V.; DUC, T. T. Chemical and physical properties of earthworm casts as compared to bulk soil under a range of different land-use systems in Vietnam. *Geoderma*, Amsterdam, v. 146, p. 231–238, 2008.

KÄMPF, N.; CURI, N. Conceito de solo e sua evolução histórica. In: Ker, J. C., Curi, N., Schaefer, C. E. G. R. & Vidal-Torrado, P. eds. *Pedologia: fundamentos*. Viçosa, MG: SBCS, 1-20p, 2012.

KRUSKAL, W. H.; ALLEN WALLIS, W. “Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis.” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 47, no. 260, 1952, pp. 583–621, www.jstor.org/stable/2280779. Accessed 06 JUL. 2021.

LANGENBACH, T.; INACIO, M. V.; AQUINO, M. A.; BRUNNINGER, B. Effects of earthworm *Pontoscolex corethrurus* on distribution of acaricida dicofol in a Podzolic soil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.37, p. 1663-1668. 2002.

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

LIMA, S. S.; PEREIRA, M. G.; SILVA NETO, E.C.; FERNANDES, D.A.C., AQUINO, A.M. Biogenic and physcogenic aggregates under different crops with black oat in Nova Friburgo, Brazil. *Rev Caatinga* 33, 299–309, 2020.

LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; 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 physcogenic aggregates in a soil with 10 years of pig manure application. *Soil and Tillage Research*, n. 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. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, p.1269-1276, 2011.

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

LOSS, A.; RIBEIRO, E. C.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa, ES . *Bioscience Journal*, 30(5), 2014.

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

MACHADO, D. L.; PEREIRA, M. G.; CORREIA, M. E. F.; DINIZ, A. R.; MENEZES, C. E. G. Fauna edáfica na dinâmica sucessional da mata atlântica em floresta estacional semidecidual na bacia do rio Paraíba do Sul - RJ. *Ciência Florestal*, v.25, p.91-106, 2015.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, n. 11, p. 1135-1139, 2006.

MARTINS, L. F. B. N.; TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; SOUZA, C. B. S.; FARIAS, P. G. S.; OZÓRIO, J. M. B.; MARRA, L. M.; CASTILHO, S. C. P. Soil carbono in diferente uses in the Southern cone of Mato Grosso do Sul. *Revista de Agricultura Neotropical. Cassilândia-MS*, v. 7, n. 4, p. 86-94, 2020..

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

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, n. 46, p. 466-478, 2019.

MORAIS, D. H.; SILVA, C.; ROSSET, J.; FARIAS, P. G.; SOUZA, C. B.; BARROS OZÓRIO, J.; CASTILHO, S.; MARRA, L. Stock and indices of carbon management under different soil use systems. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, 56(2), 286-295, 2021

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.

OZÓRIO, J. M. B.; ROSSET, J. S.; SCHIAVO, J. A.; PANACHUKI, E.; SOUZA, C. B. S.; MENEZES, R. S.; CASTILHO, S. C. P.; MARRA, L. M. Estoque de carbono e agregação do solo sob fragmentos florestais nos biomas Mata Atlântica e Cerrado. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 53, 97-116, 2019.

OZÓRIO, J. M. B.; ROSSET, J. S.; SCHIAVO, J. A.; SOUZA, C. B. S.; FARIAS, P. G. S.; OLIVEIRA, N. S.; MENEZES, R. S.; PANACHUKI, E. Physical fractions of organic matter and mineralizable soil carbon in forest fragments of the Atlantic Forest. *Ambiente & Água*. 2020.

PEREIRA, A. A.; THOMAZ, E. L.; FACHIN, A. P. Atributos físicos do solo em áreas cultivadas com feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L) sob diferentes sistemas de manejo. *Geoambiente On-Line*, n. 28, 2017.

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

PERUSI, M. C.; CARVALHO, W. A. Comparação de Métodos para Determinação da Estabilidade de Agregados por Vias Seca e Úmida em Diferentes Sistemas de Uso e Manejo do Solo. *Geociências*, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 197-206, 2008.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in Red Latosol from Brazil. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 77, p. 79-84, 2004.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). *R. Bras. Ci. Solo*, 28:731-737, 2004^a

PINTO, L. A. S. R. Matéria Orgânica e Atributos Edáficos de Agregados em Áreas de Sistemas Plantio Direto no Cerrado Mineiro. Dissertação de Mestrado (Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, p.98, 2020.

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.

PINTO, L. A. S. R.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, O. A. Q.; SOUZA, R. S.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JUNIOR, W. F.; MARTELLETO, L. A. Carbono orgânico e agregação do solo em áreas sob diferentes densidades de plantio da cultura da bananeira. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, p. 10268-10285, 2020.

PINTO, L. A. S. R.; ZIVIANI, M. M.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JUNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; SILVA, C. F.; TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Soil organic matter of aggregates physicogenic and biogenic in areas under no-tillage system in the Cerrado, Brazil. *Research, Society and Development*, v. 10, 2021.

PINTO, L. A. S. R.; TORRES, J. L. R.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R.; SILVA JÚNIOR, W. F.; LIMA, S. S.; BEUTLER, S. J.; Pereira, M. G. Physicogenic and biogenic aggregates under different management systems in the Cerrado region, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 45, 2021.

PORTO, M. L.; ALVES, J. C.; DINIZ, A. A.; SOUZA, A. P.; SANTOS, D. Indicadores biológicos de qualidade do solo em diferentes sistemas de uso no Brejo Paraibano. *Ciência e Agrotecnologia*, v.33, p.1011-1017, 2009.

PORTUGAL A. F.; JUNCKSH I; SCHAEFER C. E. R. G.; NEVES J. C. L. Estabilidade de agregados em Argissolo sob diferentes usos, comparado com mata. *Revista Ceres*, n. 57, p. 545-53, 2010.

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.; VAN BREEMEN, N.; JONGMANS, A. G. Soil organic matter distribution and microaggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity. *European Journal of Soil Science*, v.56, p.453-467, 2005.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL <https://www.R-project.org/>

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.1609-1623, 2007.

RICHARD, A.; FILHO, J. T.; BRITO, O. R.; ILNILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeito. *Semina: Ciências Agrárias*, v.26, n.3, p.321-344, 2005.

RILLIG M. C.; WRIGHT S. F.; NICHOLS K. A.; SCHMIDT W. F.; TORN M. S. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant and Soil*, v. 233, p. 167-177, 2001.

RODRIGUEZ, L.; SUÁREZ, J. C.; PULLEMAN, M.; GUACA, L.; RICO, A.; ROMERO, M.; QUINTERO, M.; LAVELLE, P. Agroforestry systems in the Colombian Amazon improve the provision of soil ecosystem services. *Applied Soil Ecology*, v. 164, 2021.

ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Organic matter and soil aggregation in agricultural systems with different adoption times. *Semina* 40:3443–3459, 2019.

ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G. SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, n. 35, p. 6, 2016.

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 Cândido Rondon, 2015.

ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M.; SEIDEL, E. P. Carbon stock, chemical and physical properties of soils under management systems with different deployment times in western region of Paraná, Brazil. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 35, n. 6, p. 30-53, 2014.

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. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1677-1685, 2016.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E.; BUCKNER, J.; FORNARI, A.; SÁ, M. F. M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENZKE-FILHO, S. P.; PAULLETI, V.; SIQUEIRA NETO, M. O plantio direto como base do sistema de produção visando o sequestro de carbono. *Revista Plantio Direto, Passo Fundo*, v. 84, n. 1, p.45-61, 2004.

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

SANCHES, L, VALENTINI, C. M. A.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. S. Dinâmica sazonal da produção e decomposição de serrapilheira em floresta tropical de transição. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*, 13(2): 183-189, 2009.

SANTOS, T. M. D.; OZÓRIO, J. M. B.; ROSSET, J. S.; BISPO, L. S.; FARIA, E.; CASTILHO, S. C. P. Estoque de carbono e emissão de CO₂ em áreas manejadas e nativa na Região Cone-Sul de Mato Grosso do Sul. *Revista Meio Ambiente*. 2021.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBERAS, J.F.; COLEHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; FILHO, J.C.A.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – 5ª edição; revisada e ampliada – Brasília, DF. Embrapa. 590p. 2018.

SAVIOLI, M. R.; SECCO, D.; TOKURA, L. K.; CHANG, P.; VILLA, B.; CASTRO, M. S. Componentes de produção da soja sob níveis de compactação do solo. *Revista Acta Iguazu*. v. 10, n. 2, 2021.

SCHRADER, S.; ZHANG, H. Earthworm casting: stabilization or destabilization of soil structure? *Soil Biology and Biochemistry*, v.29, p.469-475, 1997.

SCHULER, R. T.; WOOD, R. K. Soil compaction. In: CONSERVATION tillage systems and management: crop residue management with no-till, ridge-till, mulch-till. Ames: Midwest Plan Service, 1992. p.42-45.

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, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. & CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 10:579-585, 2006.

SILVA, N. F.; NASSAR, J. M.; AGUIAR E SILVA, M. A. variabilidade térmica e a probabilidade de ocorrência de geada e calor extremo na mesorregião norte pioneira paranaense (brasil) – estudo de caso do ano de 2019: *Revista Geonorte*, 12(39), 216-237. 2021.

SILVA NETO E. C.; PEREIRA M. G.; FERNANDES J. C. F.; CORRÊA NETO T. A. Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation in Atlantic Forest from Southeastern Brazil: *Ciências Agrárias* 37 (6), 2016

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

SIX, J.; FELLER, C.; DENEK, 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.

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.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. Manual de métodos de análise do solo. 3. ed. Brasília: Embrapa, 573 p, 2017.

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.; 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*, v.29, p. 609-618, 2005.

TRIOLA, MARIO F. Introdução à Estatística. 10a Edição. Editora LTC. (2008)

TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; MARTINS, L. F. B. N.; OZÓRIO, J. M. B.; CASTILHO, S. C. de P.; MARRA, L. M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*. 13(4), 1447-1469, 2020.

TRUMBORE S.E. Comparison of carbono dynamics in traopical and temperate using radiocarbon measurements. *Global Biochemical Cycles*, v. 7, p. 275-290, 1993.

VENTURA, B. S.; LOSS, A.; COMIN, J. J.; SEPULVEDA, C. M.; LOVATO, P. E.; BRUNETTO, G. Carbono, nitrogênio e frações granulométricas em agregados biogênicos e fisiogênicos. *Research, Society and Development*. v. 9, n. 10, 2020.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; CURI, N. LIMA, J. M. SILVA, M. L. N.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 38, n. 1, p. 133-141, 2003.

VODNIK D.; GRČMAN H.; MAČEK I.; VAN ELTEREN J.T.; KOVAČEVIČ M. The contribution of glomalin-related soil protein top Pb and Zn sequestration in polluted soil. *Science of the Total Environment*, v. 392, p. 130-136, 2008.

WRIGHT S. F.; FRANKE-SNYDER M.; MORTON J. B.; UPADHAYAYA A. Times-couser study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant and soil*, v. 181, p. 193-203, 1996.

WRIGHT S. F.; GREEN V. S.; CAVIGELLI M. A. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. *Soil & Tillage Research*, v. 94, p. 546-549, 2007.

YEOMANS J. C.; BREMMER J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm Soil Sci Plant Anal*19, p. 1467-1476, 1998.

7. ANEXOS



Figura 8. Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de SPC. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor.

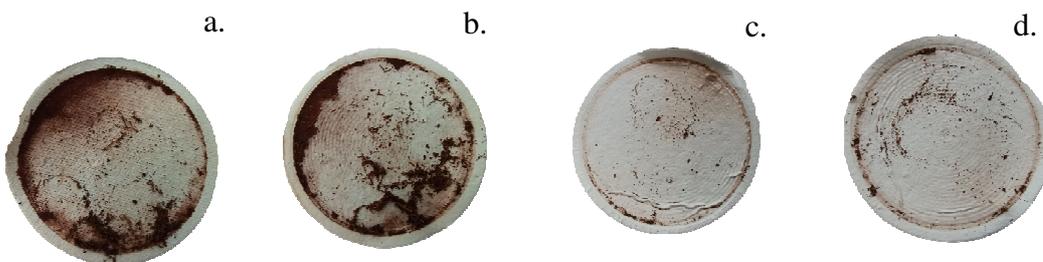


Figura 9. Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de PP. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor.

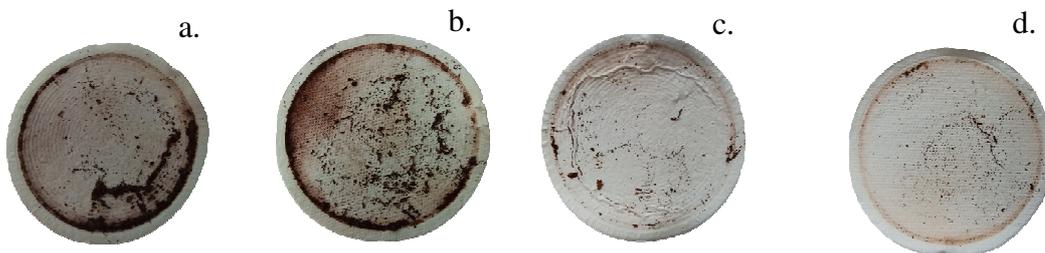


Figura 10 Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de SPD₆. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor.

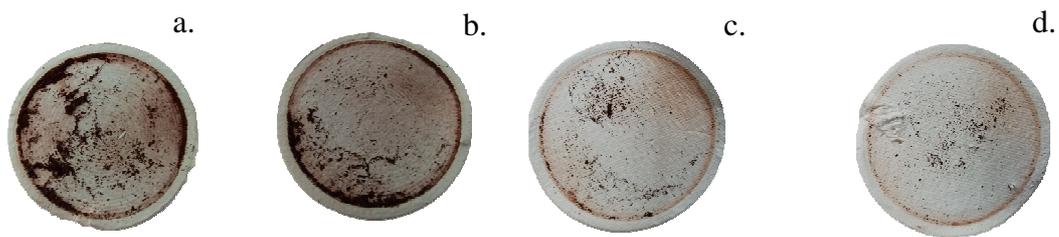


Figura 11. Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de SPD₁₈. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor.

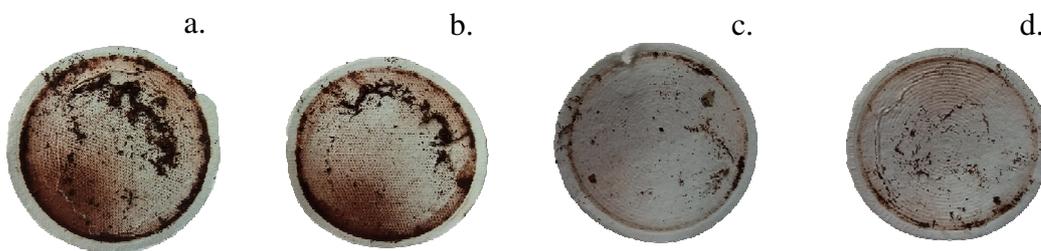


Figura 12. Material vegetal depositado em filtro utilizado para realizar o fracionamento densimétrico da área de MN. **a.** FLL de agregados biogênicos. **b.** FLL de agregados fisiogênicos. **c.** FLL-I de agregados biogênicos. **d.** FLL-I de agregados fisiogênicos. Fotos: Autor.