

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO – PPGCS

CAMILA ROSANA WUADEN

**ESTOQUE DE CARBONO E DO NITROGÊNIO E ESTABILIZAÇÃO DA MATÉRIA
ORGÂNICA EM NITOSSOLO CULTIVADO SOB DIFERENTES PREPAROS E
ADUBAÇÕES**

LAGES

2023

CAMILA ROSANA WUADEN

**ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO E ESTABILIZAÇÃO DA MATÉRIA
ORGÂNICA EM NITOSSOLO CULTIVADO SOB DIFERENTES PREPAROS E
ADUBAÇÕES**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo – PPGCS, do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Álvaro Luiz Mafra

**LAGES
2023**

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Wuaden, Camila Rosana
ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO E
ESTABILIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM NITOSSOLO
CULTIVADO SOB DIFERENTES PREPAROS E ADUBAÇÕES /
Camila Rosana Wuaden. -- 2023.
83 p.

Orientador: Álvaro Luiz Mafra
Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina,
Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação
em Ciência do Solo, Lages, 2023.

1. Adubação Orgânica. 2. Plantio direto. 3. Macroagregados. 4.
Cama de aves. I. Mafra, Álvaro Luiz. II. Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

CAMILA ROSANA WUADEN

**ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO E ESTABILIZAÇÃO DA MATÉRIA
ORGÂNICA EM NITOSSOLO CULTIVADO SOB DIFERENTES PREPAROS E
ADUBAÇÕES**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo – PPGCS, do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

BANCA EXAMINADORA

Orientador:

Dr. Álvaro Luiz Mafra

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membros:

Dra. Josiléia Acordi Zanatta

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

Dr. André Anibal Brant

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Dr. Rodrigo da Silveira Nicoloso

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

Dr. Jackson Adriano Albuquerque

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Lages, 28 de abril de 2023.

Dedico esse trabalho a grandes mulheres que nunca desistiram de seus sonhos, em especial a minha querida Mãe Iolita (*in memoriam*) e a minha querida amiga Célia (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre junto de mim, iluminando e guiando meu caminho.

Aos meus pais Nivaldo e Iolita (*in memoriam*) meus maiores exemplos de vida, muito obrigado por todo carinho, amor, apoio, incentivo e força diante dos obstáculos. Minha mãe, sei que segues iluminando o meu caminho de onde estiver. As minhas irmãs Ana Flávia e Isabela, pelo apoio, incentivo e amizade. Amo todos vocês!

Aos bolsistas de iniciação científica, Andressa, Letícia e Carol e aos funcionários da Embrapa Suínos e Aves pela ajuda, companheirismo e momentos de descontração durante os trabalhos. A participação de vocês foi fundamental para o bom desenvolvimento deste trabalho. Aos amigos do cafezinho da Embrapa Suínos e Aves, pelos momentos de descontração, principalmente a Edenilse, a Martha e a Vivian, por todo apoio e incentivo.

Aos colegas de doutorado, e em especial ao Gustavo, a Caroline, ao Leonardo por todo incentivo e ajuda inestimável para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao Professor Cassol pela orientação, pela paciência, pelos ensinamentos e pela disponibilidade sempre que precisei. Ao Dr. Nicolosso pela receptividade, ensinamentos e incentivo durante todo o período que estive na Embrapa. Agradeço também aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo por todo ensinamento repassado.

A Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oferta do Doutorado. À CAPES e ao FUNDES pela concessão da bolsa de estudos e a Embrapa Suínos e Aves pelo suporte financeiro para execução dos experimentos do projeto de pesquisa.

A todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente neste período de doutorado, muito obrigada!

“Mesmo quando tudo parece desabar, cabe a mim decidir entre rir ou chorar, ir ou ficar, desistir ou lutar; porque descobri, no caminho incerto da vida, que o mais importante é o decidir.” (Cora Coralina)

RESUMO

Mudanças no uso do solo, como o uso para agricultura, causam alterações nos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo. A adubação orgânica associada ao plantio direto (PD) pode aumentar os estoques e a macroagregação quando comparado ao preparo convencional (PC), onde mecanismos distintos de estabilização podem estar envolvidos. Para testar essa hipótese, os objetivos desse estudo foram avaliar o efeito de diferentes formas de preparo do solo e fertilizantes orgânicos na ciclagem e no estoque de carbono e nitrogênio em diferentes camadas do solo (CAP I), na formação dos agregados do solo e proteção física da matéria orgânica (CAP II) e nos mecanismos de estabilização da matéria orgânica (CAP III) em um Nitossolo do Sul do Brasil. O estudo iniciou em 2012, onde a pastagem foi convertida para a agricultura, em um sistema sucessão de milho (*Zea mays* L.) e aveia preta (*Avena strigosa* Scherb.). O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com parcelas subdivididas e 4 repetições. Nas parcelas principais foram testados o PC e PD e nas subparcelas os fertilizantes: mineral (NPK), dejetos líquidos de suínos (DLS), dejetos líquidos de suínos injetado (DLSI), cama de aves (CAMA), além do tratamento controle sem adubação (CTR), no capítulo I. No capítulo II e III foi utilizado apenas os fertilizantes: mineral (NPK), cama de aves (CAMA), controle sem adubação (CTR) e foi incluído uma área subjacente de campo natural (CN). A aplicação foi feita no milho, fornecendo 140 kg de N-total ha⁻¹. O solo foi amostrado em 2012 e 2021 para avaliar mudanças nos estoques orgânicos totais de C (COT) e N (NT) nas profundidades de 0-60 cm, bem como nas frações C e N particulado (COP e NP) e associado aos minerais (Coam e Nam) na camada de solo de 0-30 cm. E em 2020 para avaliar a agregação e os mecanismos de estabilização. Considerando o estoque acumulado, o PD elevou seu estoque de C cerca de duas vezes mais que o PC. Esse aumento foi relacionado com as frações mais lábeis (COP e NP). Os preparos do solo e os fertilizantes interferiram na distribuição de massa de solo e conteúdo de C e N nas diferentes classes de agregados estáveis em água. O PD, quando comparado com o PC, aumentou a proteção do C e do N em macroagregados grandes do solo (>2000) do solo, igualando-se ao CN. Além disso, o PD, associado a adubação com CAMA aumentou a proteção física do C em grau igual e superior ao que ocorre no campo natural. Desta forma, a adubação com CAMA, associada ao PD promove maiores acúmulos de C e N no solo quando comparado com o PC, e com o NPK.

Palavras-chave: Adubação orgânica. Plantio direto. Macroagregados. Cama de aves.

ABSTRACT

Changes in land use, for agriculture, cause changes in soil carbon (C) and nitrogen (N) stocks. Organic fertilization associated with no-tillage (NT) can increase stocks and macroaggregation when compared to conventional tillage (CT), where different stabilization mechanisms maybe involved. The objectives of this study were to evaluate the effect of different forms of soil preparation and organic fertilizers on cycling and carbon and nitrogen pool in different soil layers (CAP I), in the formation of soil aggregates and physical protection of organic matter (CAP II) and in the mechanisms of stabilization of organic matter (CAP III) in a Oxisol (Kandic) from southern Brazil. The study started in 2012, where the pasture was converted to agriculture, in a succession system of maize (*Zea mays* L.) and oats (*Avena strigosa* Scherb.). The experimental design was randomized blocks with split plots and 4 replications. In the main plots, the CT and NT were tested and in the subplots the fertilizers: mineral (NPK), pig slurry (PS), pig slurry injected (LPDI), poultry litter (BED), in addition to the control treatment without fertilization (CTR), in Chapter I. In chapters II and III, only mineral fertilizers (NPK), poultry litter (BED), control without fertilization (CTR) were used, and natural grassland (NG) was included. The application was made on maize, providing 140 kg of N-total ha⁻¹. The soil was sampled in 2012 and 2021 to evaluate changes in total organic C (TOC) and N (TN) stocks at depths of 0-60 cm, as well as in particulate C and N fractions (POC and PN) and associated minerals (Mam and Nam) in the 0-30 cm soil layer. And in 2020 to evaluate the aggregation and stabilization mechanisms. This increase was related to the more labile fractions (POC and PN). Soil preparation and fertilizers interfere in the distribution of soil mass and C and N content in the different classes of water-stable aggregates. NT, when compared to CT, increased C and N protection in large (>2000) soil macroaggregates, matching NG. In addition, no-tillage, associated with fertilization with poultry litter, increased the physical protection of C to an equal or even greater degree than what occurs in the natural field. In this way, the fertilization with poultry litter, associated with the NT promotes greater accumulation of C and N in the soil when compared with the CT, and with the NPK.

Keywords: Organic fertilization. No-till. Magroaggregates. Poultry litter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1. Esquema da disposição dos tratamentos na área experimental 28
- Figura 2. Estoque de C orgânico total (A) e N total (B) em camada até 60cm de profundidade, em um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragens realizadas em 2012, quando era mantido sob pastagem natural e em 2021, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) 33
- Figura 3. Variação nos estoques de carbono orgânico total (A) e nitrogênio total (B) nas camadas 0-30 e 0-60cm de um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragem realizada, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). 34
- Figura 4. Estoque de C orgânico (COP) (A) e N (NP) (B) contidos na fração particulada (>53 μm) na camada 0-30cm de profundidade, em um Nitossolo sob pastagem natural em 2012 e após 9 anos de anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). 35
- Figura 5. Variação nos estoques de carbono orgânico particulado (COP) (A) e nitrogênio particulado (NP) (B) nas camadas de 0-30cm de um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragem realizada, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). 36
- Figura 6. Estoques de C orgânico (COam) (A) e N (NTam) associados aos minerais (B) em camadas de 0-30cm de profundidade, em um Nitossolo sob pastagem natural em 2012 e após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). 37
- Figura 7. Variação nos estoques de carbono orgânico associado aos minerais (COam) (A) e nitrogênio associado aos minerais (NTam) (B) nas camadas de 0-30cm de um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragem realizada, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) 37
- Figura 8. Teores de carbono (C) do solo em agregados estáveis em água, livres de areia, frações (< 53, 53-250, 250-2.000 e > 2.000 μm) na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes. 53
- Figura 9. Teores de nitrogênio (N) do solo em agregados estáveis em água, livres de areia, frações (< 53, 53-250, 250-2.000 e > 2.000 μm), na camada 0-5cm de um Nitossolo

	do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes.....	54
Figura 10.	Teores de carbono (C) do solo em agregados estáveis em água, livres de areia, frações (< 53, 53-250, 250-2.000 e > 2.000 μm), na camada 5-10cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes.....	55
Figura 11.	Teores de nitrogênio (N) do solo em agregados estáveis em água, livres de areia, frações (< 53, 53-250, 250-2.000 e > 2.000 μm), na camada 5-10cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes.....	56
Figura 12.	Esquema de fracionamento para o isolamento de frações funcionais da MOS	65
Figura 13.	Conteúdo de C nas diferentes frações, em cada classe de agregado estável em água (>2000, 250-2000, 53-250, <53) na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e nove anos contínuos de cultivos com milho e aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sem adubação (CTR) e adubados com fertilizante mineral e orgânico.	70
Figura 14.	Conteúdo de N nas diferentes frações, em cada classe de agregado estável em água (>2000, 250-2000, 53-250, <53) na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e nove anos contínuos de cultivos com milho e aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sem adubação (CTR) e adubados com fertilizante mineral e orgânico.	71
Figura 15.	Distribuição do C em compartimentos da MOS com mecanismos distintos de estabilização, na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e após nove anos de cultivos com milho e aveia, sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), sem adubação (CTR) e adubados com fertilizantes mineral (NPK) e orgânico (CAMA).	76
Figura 16.	Distribuição do N em compartimentos da MOS com mecanismos distintos de estabilização, na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e após nove anos de cultivos contínuos de milho e aveias, sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), sem adubação (CTR) e adubados com fertilizantes mineral (NPK) e orgânico (CAMA).	77

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Características e taxas de aplicação dos fertilizantes usados nos tratamentos durante os anos do estudo (2012-2021) 26
- Tabela 2. Aporte de Carbono acima do solo em um Nitossolo Vermelho distroférico, sob dois sistemas de preparo e diferentes adubações durante o período de 2012 a 2021. 32
- Tabela 3. Estoque de nitrogênio total associado aos minerais (NTam) acumulado nas camadas 0-30cm de um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragem realizada, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). 38
- Tabela 4. Distribuição da massa dos agregados estáveis em água, livres de areia, na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes. 51
- Tabela 5. Distribuição da massa dos agregados estáveis em água, livres de areia, na camada 5-10cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes. 52
- Tabela 6. Distribuição dos teores de C nas diferentes frações da matéria orgânica do solo na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e após nove anos contínuos de cultivos com milho e aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes mineral (NPK e orgânico (CAMA). 73
- Tabela 7. Distribuição de teores de N nas diferentes frações da matéria orgânica do solo na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e nove anos contínuos de cultivos com milho e aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sem adubação (CTR) e adubados com fertilizantes mineral (NPK) e orgânico (CAMA). 75

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL	15
	REFERÊNCIAS	18
2.	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	20
3.	OBJETIVOS	21
3.1.	OBJETIVOS GERAL	21
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS CAPÍTULO I	21
3.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS CAPÍTULO II	21
3.4.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS CAPÍTULO III.....	21
4.	HIPOTESES	22
4.1.	HIPOTESES CAPÍTULO I	22
4.2.	HIPOTESES CAPÍTULO II	22
4.3.	HIPOTESES CAPÍTULO III.....	22
5.	CAPÍTULO 1: DINÂMICA DO ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM UM NITOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E ADUBAÇÃO ORGÂNICA	23
5.1.	INTRODUÇÃO	23
5.2.	MATERIAIS E MÉTODOS	24
5.2.1.	Caracterização e histórico da área experimental	24
5.2.2.	Tratamentos e delineamento experimental	25
5.2.3.	Entradas de carbono e nitrogênio no solo.....	29
5.2.4.	Amostragem e análises de solo.....	30
5.3.	RESULTADOS	31
5.3.1.	Aporte de C acima do solo.....	31
5.3.2.	Estoque de C e N total no solo	33
5.3.3.	Estoque de C e N particulado no solo	35
5.3.4.	Estoque de C e N associado aos minerais no solo	36
5.4.	DISCUSSÃO	38
5.4.1.	Estoque de C e N total.....	38
5.4.2.	Frações de C e N particulado e associado aos minerais.....	40
5.5.	CONCLUSÃO	42
5.6.	REFERÊNCIAS	43

6.	CAPÍTULO 2: DINÂMICA DA PROTEÇÃO FÍSICA DO CARBONO E NITROGÊNIO EM AGREGADOS DE UM NITOSSOLO SOB SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E ADUBAÇÃO ORGÂNICA	47
6.1.	INTRODUÇÃO	47
6.2.	MATERIAL E MÉTODOS	48
6.2.1.	Área experimental	48
6.2.2.	Amostragem de solo e análise dos agregados estáveis em água	48
6.3.	RESULTADOS	50
6.4.	DISCUSSÃO	56
6.5.	CONCLUSÃO	58
6.6.	REFERÊNCIAS	59
7.	CAPÍTULO 3: MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DO CARBONO E NITROGÊNIO EM UM NITOSSOLO SOB SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E ADUBAÇÃO ORGÂNICA	62
7.1.	INTRODUÇÃO	62
7.2.	MATERIAL E MÉTODOS	64
7.2.1.	Área experimental	64
7.2.2.	Amostragem e fracionamento do solo	64
7.2.3.	Isolamento de microagregados oclusos	66
7.2.4.	Isolamento das frações matéria orgânica particulada livre leve (freePOM) e matéria orgânica particulada oclusa fina (ofPOM)	66
7.2.5.	Isolamento de matéria orgânica particulada (POM) intra-agregado associado a fração microagregada	67
7.2.6.	Hidrólise ácida	67
7.2.7.	Carbono e nitrogênio total	68
7.2.8.	Análise estatística.....	68
7.3.	RESULTADOS	68
7.4.	DISCUSÃO.....	77
7.5.	CONCLUSÃO	79
7.6.	REFERÊNCIAS	81

1. INTRODUÇÃO GERAL

O estado de Santa Catarina é o maior produtor e exportador de carne suína do país, e o segundo maior produtor e exportador de carne de frango, atividades geradoras de volume expressivo de resíduos na forma de dejetos líquidos de suínos (DLS) e cama de aves (CAMA) (ABPA, 2022). A destinação desses resíduos tem sido o seu uso como fertilizante no solo, o que pode proporcionar aumento nos estoques de carbono e nitrogênio do solo (GATIBONI; NICOLOSO, 2019).

Os ciclos do carbono e do nitrogênio englobam os principais gases do efeito estufa (GEE), sendo que as fases desses ciclos acontecem em várias esferas, mas é no solo que as maiores dinâmicas ocorrem e é assim que esses dois elementos estão interligados (GUENET et al., 2021). O solo é considerado o maior reservatório terrestre de carbono e desempenha papel central no ciclo global desse elemento (STOCKMANN et al., 2013). O carbono fica armazenado principalmente na matéria orgânica do solo, que é o local onde existe o maior estoque terrestre desse elemento (cerca de 58%) (STOCKMANN et al., 2013).

Desta forma, o uso e manejo do solo é determinante para seu papel como local de emissão ou de armazenamento de carbono (BAYER et al., 2016). Ao longo da história, a atividade agrícola contribuiu com mudanças nos estoques de carbono terrestre, favorecendo fortemente a emissão de carbono para a atmosfera terrestre. Uma estimativa histórica simulando um mundo sem a agricultura revelou que esta atividade foi responsável pela perda de 133 Pg de C nos primeiros 2 metros de profundidade do perfil do solo (SANDERMAN; HENGL; FISKE, 2017). O mesmo estudo indicou uma intensificação na taxa de perda de carbono no solo nos últimos 200 anos (SANDERMAN; HENGL; FISKE, 2017).

No entanto, práticas agrícolas que elevam a quantidade de resíduos vegetais podem inverter esses valores. A agricultura conservacionista pode aumentar o aporte de carbono no solo e é considerada uma forma eficiente para aumento da eficiência do solo em drenar CO₂ atmosférico e mitigar o aquecimento global (BAYER et al., 2000; BAYER et al., 2006). O valor total de carbono orgânico armazenado no solo em agroecossistemas é resultado do equilíbrio entre as entradas de carbono, principalmente, a partir de resíduos de culturas (parte aérea e raízes), e as perdas de carbono geradas pela decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) por ação dos microrganismos (FUENTES et al., 2012; TIEFENBACHER et al., 2021). Estimativas apontam que o estoque de carbono orgânico do solo é de aproximadamente 677 Pg a 0,3 metros de profundidade, 993 Pg a 0,5 metros e 1.505 a 1

metro de profundidade. Deste total, aproximadamente 55% do total encontra-se nos primeiros 0,3 metros (LAL, 2018).

Já o teor de nitrogênio no solo é dinâmico devido à diversidade de formas químicas, reações e processos ao qual este elemento está envolvido, sendo também o nutriente mais exigido pela maioria das plantas (SARDÁ et al., 2018). A principal reserva de nitrogênio no solo (cerca de 95%) é a matéria orgânica, que é constituída de cerca de 5% de nitrogênio total (THICKE et al., 1993). A forma inorgânica é oriunda principalmente da mineralização da matéria orgânica do solo, além da aplicação de fertilizantes nitrogenados (FERNANDES & ROSSIELLO, 1995).

Uma forma de equilibrar esses elementos no solo é utilizando a agricultura conservacionista, que prevê perturbação mínima, cobertura permanente e rotação de culturas. A agricultura conservacionista é uma forma importante para melhorar a qualidade do solo e promover a adaptação e mitigação das alterações climáticas. Um pilar importante dessa forma de manejo é o plantio direto (PD), que associado ao aumento da entrada de carbono podem reconstruir os estoques de carbono orgânico do solo (COS), perdidos em solos de uso intensivo (BAYER et al., 2006; FABRIZZI et al., 2009).

O plantio direto associado a adubação orgânica aumenta o estoque de carbono e nitrogênio no solo (MAFRA et al., 2014; WUADEN et al., 2020;). Estudos de longa duração demonstraram que práticas conservacionistas aumentam não só o estoque na camada superficial (0-5cm), mas também em camadas subsuperficiais (5-15cm), evidenciando o potencial do solo agrícola em estocar esses elementos (NICOLOSO et al., 2018).

A formação e manutenção dos macroagregados do solo é um importante mecanismo que contribui com a permanência do C e do N do solo. O revolvimento do solo, resultante do preparo convencional, provoca a quebra dos agregados, ocasionando perdas de C e N que antes estavam protegidos dentro dos macroagregados (SIX; PAUSTIAN, 2014). A quebra do agregado, deixa a matéria orgânica exposta, o que contribuí com sua decomposição (MIKHA; RICE, 2004; SIX et al., 1998). Desta forma, o PD, geralmente possuem maiores concentrações de macroagregados e MOS em relação ao preparo convencional (PC) (SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 2000). Além disso, o uso adubação com fertilizantes orgânicos, com maior teor de matéria seca e maior relação C/N, como cama de aves, sozinha ou associado ao plantio direto possui o potencial de aumentar os teores de MOS (WATTS et al., 2010; YANG et al., 2019).

Destaca-se que o fracionamento da MOS é importante para entender melhor os processos de sua decomposição e estabilização, pois o carbono (C) e o nitrogênio (N)

contidos em diferentes frações no solo, apresentam tempos de rotatividade distintos. A manutenção do PD e aporte contínuo de resíduos orgânicos ao solo favorece agregação e, conseqüentemente, a estabilização de C e N no solo pela proteção física da matéria orgânica nos agregados (SIX et al., 2002; BAYER et al., 2006; GULDE et al., 2008)). Além disso, mudanças no uso da terra, manejo do solo e aporte de fertilizantes podem ter efeitos diferentes nessas frações (TIEFENBACHER et al., 2021). Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar como diferentes fontes de fertilizantes orgânicos e diferentes formas de manejo do solo interferem na dinâmica do carbono e nitrogênio.

REFERÊNCIAS

- BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. *Soil and Tillage Research*, v. 91, n. 1–2, p. 217–226, dez. 2006.
- BAYER, C. et al. Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. *Soil and Tillage Research*, v. 161, p. 86–94, 1 ago. 2016.
- FABRIZZI, K. P. et al. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: Effect of native and agroecosystems. *Biogeochemistry*, v. 92, n. 1–2, p. 129–143, 2009.
- GUENET, B. et al. Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? [s.l: s.n.]. v. 27
- GULDE, S. et al. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, v. 72, n. 3, p. 605–612, 2008.
- LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, v. 24, n. 8, p. 3285–3301, 2018.
- MIKHA, M. M.; RICE, C. W. Tillage and Manure Effects on Soil and Aggregate-Associated Carbon and Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, n. 3, p. 809–816, 1 maio 2004.
- NICOLOSO, R. S. et al. Carbon saturation and translocation in a no-till soil under organic amendments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 264, n. May, p. 73–84, 2018.
- SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 114, n. 36, p. 9575–9580, 5 set. 2017.
- SARDÁ, L. G. et al. Methane emission factor of open deposits used to store swine slurry in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 6, p. 657–663, 1 jun. 2018.
- SIX, J. et al. Aggregation and Soil Organic Matter Accumulation in Cultivated and Native Grassland Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 62, n. 5, p. 1367–1377, 1998.
- SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. [s.l: s.n.].
- SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000.
- SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 68, p. A4, 2014.
- STOCKMANN, U. et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 164, p. 80–99, 1 jan. 2013.
- TIEFENBACHER, A. et al. Optimizing carbon sequestration in croplands: A synthesis. *Agronomy*, v. 11, n. 5, 1 maio 2021.

WATTS, D. B. et al. Long-Term Tillage and Poultry Litter Impacts Soil Carbon and Nitrogen Mineralization and Fertility. *Soil Science Society of America Journal*, v. 74, n. 4, p. 1239–1247, 2010.

WUADEN, C. R. et al. Early adoption of no-till mitigates soil organic carbon and nitrogen losses due to land use change. *Soil and Tillage Research*, v. 204, n. June, p. 104728, 2020.

YANG, W. et al. CO₂ emission and soil carbon sequestration from spring- and fall-applied poultry litter in corn production as simulated with RZWQM2. *Journal of Cleaner Production*, v. 209, p. 1285–1293, 1 fev. 2019.

2. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em três capítulos. O primeiro capítulo aborda as mudanças nos estoques de carbono e nitrogênio de um Nitossolo cultivado sob dois sistemas de preparo do solo e adubação com diferentes fertilizantes.

O segundo capítulo aborda como diferentes preparos do solo e fertilizantes afetam a formação dos agregados do solo e influenciam na proteção física da matéria orgânica em um Nitossolo.

O terceiro capítulo trata da relação entre os mecanismos de estabilização de carbono e de nitrogênio em um Nitossolo sob diferentes sistemas de preparo do solo e diferentes fertilizantes.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVOS GERAL

O objetivo deste estudo foi avaliar a dinâmica dos estoques de carbono e nitrogênio de um Nitossolo do Sul do Brasil cultivado sob duas formas de preparo do solo e adubação com diferentes fertilizantes orgânicos derivados de dejetos de suínos e aves.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS CAPÍTULO I

Estimar como diferentes formas de preparo do solo e fertilizantes orgânicos afetam a ciclagem e o estoque de carbono e nitrogênio em diferentes camadas do solo.

3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS CAPÍTULO II

Analisar o efeito de diferentes formas de preparo do solo e fertilizantes orgânicos na formação dos agregados do solo e proteção física da matéria orgânica.

3.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS CAPÍTULO III

Avaliar a influência de diferentes formas de preparo do solo e fertilizantes orgânicos nos mecanismos de estabilização da matéria orgânica de um Nitossolo.

4. HIPOTEESES

4.1. HIPOTEESES CAPÍTULO I

(i) A adubação orgânica associada ao plantio direto (PD) aumenta os estoques e frações granulométricas do carbono orgânico e nitrogênio no solo quando comparados ao preparo convencional (PC) e adubação mineral; e (ii) Adubos orgânicos sólidos promovem maiores incrementos nos estoques de carbono orgânico e nitrogênio do solo do que adubos orgânicos líquidos. (iii) Desejo líquido injetado aumenta o estoque de N do solo em relação à sua aplicação na superfície.

4.2. HIPOTEESES CAPÍTULO II

(i) A adubação com fertilizantes orgânicos associada ao PD aumenta a agregação e o acúmulo de carbono e nitrogênio em macroagregados nas camadas mais superficiais do solo quando comparados ao PC e adubação mineral;

4.3. HIPOTEESES CAPÍTULO III

(i) A maior proteção física da matéria orgânica do solo sob O PD e uso contínuo de fertilizantes orgânicos aumenta, no longo prazo, a interação físico-química do carbono e do nitrogênio com as frações silte e argila quando comparados ao PC e adubação mineral;

5. CAPÍTULO 1: DINÂMICA DO ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM UM NITOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E ADUBAÇÃO ORGÂNICA

5.1. INTRODUÇÃO

O solo é grande reservatório de carbono, sendo um compartimento com cerca de 2.400 PgC, enquanto a atmosfera contém 760 PgC e a vegetação 550 PgC (IPCC, 2007). Desta forma, mudanças no uso do solo, como o uso para agricultura, podem impactar diretamente o estoque de carbono do solo, assim como a sua distribuição no perfil (MAN et al., 2021; (TIEFENBACHER et al., 2021; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

Assim, a busca por formas de reduzir as perdas de C e N, associadas a MOS e aumentar esses estoques pode contribuir para a mitigação da emissão de gases do efeito estufa, além de contribuir com a adaptação de sistemas agrícolas às mudanças climáticas devido aos diversos co-benefícios que oferece (TIEFENBACHER et al., 2021).

Manejos conservacionistas como o plantio direto (PD) contribuem para o acúmulo de carbono orgânico no solo, que fica mais protegido fisicamente na forma de matéria orgânica contida nos agregados. Isso ocorre, devido às suas características de não revolvimento do solo que evita a ruptura dos agregados e pela menor exposição à ação das chuvas, devido à permanência dos resíduos culturais em superfície (SIX et al., 1999; BAYER et al., 2000; LOVATO et al., 2004). Em um estudo realizado em solos tropicais por Pinheiro et al. (2015), a acumulação de MOS foi maior em PD em relação ao convencional (PC), mesmo quando houve baixa entrada de resíduos de colheita, evidenciando a importância de práticas conservacionistas.

Além do preparo do solo, a recuperação do carbono orgânico do solo (COS) pode ser impulsionada pelo manejo da fertilidade do solo, associada com a alta entrada de carbono proporcionada pela rotação de culturas (DE OLIVEIRA FERREIRA et al., 2018a), uso de fertilizantes orgânicos (NICOLOSO.,2009; MAFRA et al., 2014), correção da acidez do solo (INAGAKI et al., 2017) e controle da erosão do solo (BERTOL et al., 2003; OLSON et al., 2016).

A adubação, principalmente a nitrogenada é diretamente relacionada ao sequestro de C e o acúmulo de N no solo por favorecer o desenvolvimento vegetativo das plantas (parte aérea e raízes) para maior produção de biomassa (DIEKOW et al., 2005; ZANATTA et al., 2007). A adubação realizada com fertilizantes orgânicos, isoladamente ou associados com

fertilizante mineral, possui maior capacidade em elevar o estoque de COS, em relação ao uso exclusivo de fertilizante mineral (MAFRA et al., 2014; RODRIGUES, 2017). Além disso, a combinação da adubação com fertilizantes orgânicos com PD, assim como a qualidade da matéria orgânica do fertilizante, é capaz de promover uma recuperação mais rápida das reservas de COS (NICOLOSO et al., 2018).

Os fertilizantes orgânicos com maior teor de matéria seca e maior relação C:N, como o composto orgânico derivado de dejetos de suíno e a cama de aves, aportam maiores quantidades de carbono, que também contribuem para o estoque de C no solo (SISTANI et al., 2010; ROGERI et al., 2016). Já o uso de dejetos de suíno líquido injetado pode reduzir as perdas de carbono e nitrogênio por volatilização e emissões para a atmosfera, promovendo maiores incrementos nas frações da MOS (FEDEROLF et al., 2017; FRANCISCO et al., 2022).

Portanto, considerando a importância de compreender mais profundamente a relação entre tipos de manejo de solo e o uso de fertilizantes orgânicos na dinâmica temporal dos estoques de carbono e de nitrogênio no solo, o objetivo desse estudo foi avaliar diferentes preparos do solo e fertilizantes sobre a ciclagem e estoque de carbono e nitrogênio em diferentes profundidades ao longo do tempo.

5.2. MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1. Caracterização e histórico da área experimental

O estudo foi realizado em uma área experimental na sede da Embrapa Suínos e Aves, em Concórdia/SC (27°18'53''S, 51°59'25''O). O clima da região caracteriza-se como mesotérmico subtropical úmido (Cfa), de acordo com Köppen, com temperatura média anual de 18°C e precipitação média anual de 1.800 mm. O solo foi classificado como Nitossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 2013).

A área de estudo faz parte de um experimento de longa duração que foi implantado em março de 2012 (GRAVE et al., 2015), sendo que previamente a área era mantida com pastagem natural composta predominantemente por uma mistura de gramíneas perenes. Em abril do mesmo ano, a pastagem natural foi dessecada com a aplicação de glifosato, e a acidez do solo foi corrigida com a aplicação e incorporação de 2,0 Mg ha⁻¹ de calcário.

Após esta etapa, foi semeada aveia-preta (*Avena strigosa* L. (Scherb)) para formação de palhada. Em outubro de 2012 foi realizada coleta de solo na camada superficial (0-10cm)

para caracterização de granulometria e fertilidade com o uso de trado calador. Os teores de argila, silte e areia foram de 250, 460 e 290 g kg⁻¹, respectivamente (EMBRAPA, 1997). O solo apresentou os seguintes atributos químicos: pH-H₂O (1:1) 5,3, pH-SMP 5,8, Al³⁺ 0,3 cmol_c dm⁻³, matéria orgânica 39,0 g kg⁻¹, P_{Mehlich-1} 6,6 mg dm⁻³, K_{Mehlich-1} 250 mg dm⁻³, Ca²⁺ 7,5 cmol_c dm⁻³, Mg²⁺ 3,3 cmol_c dm⁻³, CTC 11,9 cmol_c dm⁻³ e saturação de base 68%.

Ainda em outubro de 2012 foi realizada a primeira aplicação dos tratamentos e a implantação da cultura do milho (*Zea mays* L.). A partir de então, manteve-se o sistema de culturas em todas as parcelas e em todos os anos, caracterizado pela sucessão milho-aveia-preta, cultivados no verão e inverno, respectivamente. O milho é semeado entre 15 de setembro e 31 de outubro, conforme as condições de clima em cada ano. A aveia-preta é semeada entre 15 de março e 15 de abril e dessecada quando em pleno florescimento, cerca de 20 dias antes da semeadura do milho.

5.2.2. Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos compreenderam um esquema fatorial 2 x 5, com duas formas de preparo do solo e 5 fertilizantes. As formas de preparo utilizados foram preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e os fertilizantes, aplicados a partir de 2019, foram: mineral (NPK), dejetos líquidos de suíno (DLS), dejetos líquidos de suíno injetado (DLSI) e cama de aves (CAMA) e um controle, ou seja, sem qualquer tipo de adubação (CTR).

De 2012 até 2018 os tratamentos de fertilizantes foram: controle (CTR), mineral (NPK), dejetos líquidos de suínos (DLS), fração líquida do dejetos de suínos tratado por biodigestão (BIO) e dejetos de suíno tratado por compostagem (COMP). A partir de 2019, o tratamento o BIO foi substituído por dejetos líquidos de suíno injetado no solo (DLSI) e o COMP pela cama de aves (CAMA). No PC o solo foi revolvido por meio de uma operação com arado de discos e duas com grade niveladora antes da semeadura do milho e, com apenas duas operações com grade niveladora antes da semeadura da cultura da aveia-preta. No PD as culturas do milho e aveia-preta foram implantadas com abertura do leito das sementes por semeadora com disco frontal de corte, facão sulcador e discos duplos defasados.

Tabela 1. Características e taxas de aplicação dos fertilizantes usados nos tratamentos durante os anos do estudo (2012-2021)

Fertilizante	Ano	Características											Taxa aplicação
		MS	SV	COT	NT	C/N	N- Org	NH ₄ - N	NO ₃ - N	Min- N	P	K	m ³ /ha ⁻¹
		%	kg m ⁻³							%	kg m ⁻³		
DLS ¹	2012	7,4	45,9	29	4,4	6,6	1,7	2,7	ND	62,0	0,7	0,9	31,7
	2013	ND	ND	15,6	4,1	3,8	0,9	3,2	ND	78,4	1,2	1,2	34,1
	2014	ND	17,2	9,3	3	3,1	1	2	ND	67,4	0,7	0,9	46,9
	2015	ND	112	51,5	5,7	9,1	2,4	3,3	ND	58,2	2,1	0,9	24,7
	2016	ND	11,8	6,1	2,4	2,6	0,8	1,6	ND	65,6	0,3	0,7	59,1
	2017	9,9	ND	38,0	5,8	6,6	2,7	3,1	ND	53,8	1,6	0,9	24,2
	2018	ND	15,4	8,3	3,7	2,2	1,1	2,6	ND	71,1	0,8	1,1	38,1
	2019	ND	4,7	2,7	1,7	1,6	0,3	1,5	ND	85,0	0,2	0,8	81,2
	2020	ND	ND	ND	2,3	ND	0,4	1,9	ND	ND	ND	ND	71,1
2021	ND	ND	ND	6,7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	23,9	
BIO ¹	2012	6,5	38,4	17,7	5,2	3,4	2,5	2,6	ND	ND	3,2	0,9	27,1
	2013	ND	ND	6,3	2,6	2,5	0,5	2,1	ND	81,1	0,2	1,2	54,8
	2014	ND	8	4,3	1,9	2,3	0,5	1,3	ND	71,5	0,45	0,9	75,6
	2015	ND	7,1	4	1,9	2,2	0,3	1,6	ND	82,7	0,23	1,0	74,5
	2016	ND	4,2	1,9	1,8	1,1	0,2	1,6	ND	88,6	0,11	0,7	78,7
	2017	0,8	ND	2,3	1,8	1,2	0,2	1,6	ND	87,4	0,1	0,9	76
	2018	ND	3,7	1,9	1,9	1,0	0,2	1,7	ND	91,1	0,23	1,1	73,5
DLSI ¹	2019	ND	4,7	2,7	1,7	1,6	0,3	1,5	ND	85,1	0,22	0,8	81,2
	2020	ND	ND	ND	2,3	ND	0,4	1,8	ND	ND	ND	ND	71,1
	2021	ND	ND	ND	6,7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	23,9
COMP ²	2012	29,1	ND	317	16,6	19,1	15,1	1,2	0,2	8,9	3,2	5,5	29
	2013	47,3	ND	250	23,6	10,6	23,5	0,1	0,0	0,5	10,7	4,6	12,5
	2014	43,9	ND	378	21,6	17,5	19,8	0,8	1,0	8,5	4,6	4,8	14,8
	2015	42	ND	325	18,3	17,8	18,2	0,1	0,0	0,3	6,9	3,9	18,3
	2016	30	ND	299	17,5	17,1	17	0	0,5	3,1	3,7	3,26	26,7
	2017	34,7	ND	268	15,7	17	ND	ND	ND	ND	5,5	2,92	25,7
	2018	42,2	ND	302	15,2	19,8	ND	ND	0,	6,1	4,1	3,65	21,7
	2019	71,5	ND	308	34	9,1	ND	ND	0,1	19,7	9,7	14,1	8,2
	CAMA ²	2020	79,5	ND	356	42,5	8,4	ND	ND	ND	12,9	ND	ND
2021		79,5	ND	356	42,5	8,4	ND	ND	ND	12,9	ND	ND	9,5

(DLS: dejetto líquido de suínos; BIO: digestato de biodigestor, DLSI: dejetto líquido de suínos injetado no solo, COMP: compostagem de dejetto líquido de suíno, CAMA: cama de aves; ND: não determinado; MS: massa seca; SV: sólidos voláteis; COT: carbono orgânico total; NT: nitrogênio total; N-Org: nitrogênio orgânico; NH₄N: nitrogênio amoniacal; NO₃N: nitrogênio nítrico; C/N: razão carbono total/nitrogênio total).

Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

¹ resultados expressos em base natural. ² resultados expressos em base seca.

Os fertilizantes orgânicos DLS e DLSI foram procedentes das granjas de terminação de suínos da Embrapa Suínos e Aves, coletados de tanques anaeróbicos a céu aberto, onde estavam armazenados sem tratamento. Foram usadas duas formas de aplicação, sendo o DLS aplicado superficialmente no solo, e o DLSI injetado no solo. Esse procedimento foi realizado com o auxílio de um distribuidor de adubo orgânico líquido com incorporador (Mepel), que abre um sulco no solo, onde o fertilizante é colocado. A CAMA foi adquirida de propriedades produtoras de franco de corte, dando preferências para camas de aves com, no mínimo, sete lotes terminados.

Antes da aplicação, os fertilizantes orgânicos foram analisados para determinar os teores de matéria seca à 65°C, carbono (C) e nitrogênio total (N-total) por combustão seca, nitrogênio total (NTK) e nitrogênio amoniacal (N-NH₄) por Kjeldahl, nitrato (N-NO₃) e nitrito (N-NO₂) por injeção em fluxo. Também foram medidos fósforo (P) por espectrofotometria, potássio (K) por espectrometria por plasma, cálcio (Ca), magnésio (Mg), cobre (Cu) e zinco (Zn) por absorção atômica e pH por potenciometria (Tabela 1). Todos os métodos de extração e análises seguem os protocolos padrão (BRASIL, 2014).

Os fertilizantes foram aplicados uma vez ao ano, distribuídos na superfície do solo, sempre após a dessecação da aveia preta e as operações de preparo do solo nas parcelas do PC. As doses dos fertilizantes foram estabelecidas visando a aplicação da mesma dose de N-total (140 kg N ha⁻¹), exceto o controle que não recebeu adubação. Considerou-se que 100% do N do dejetos está disponível para a cultura a ser adubada, sendo, portanto, equivalente ao adubo mineral. Entretanto, a partir de 2019, com utilização da cama de aves a dose nesse tratamento foi alterada para 200kg, pois considerando que o índice de liberação do N desse fertilizante é de 70%. Com isso, estimou-se que cerca de 140kg/ha de N ficou disponível à cultura (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2004).

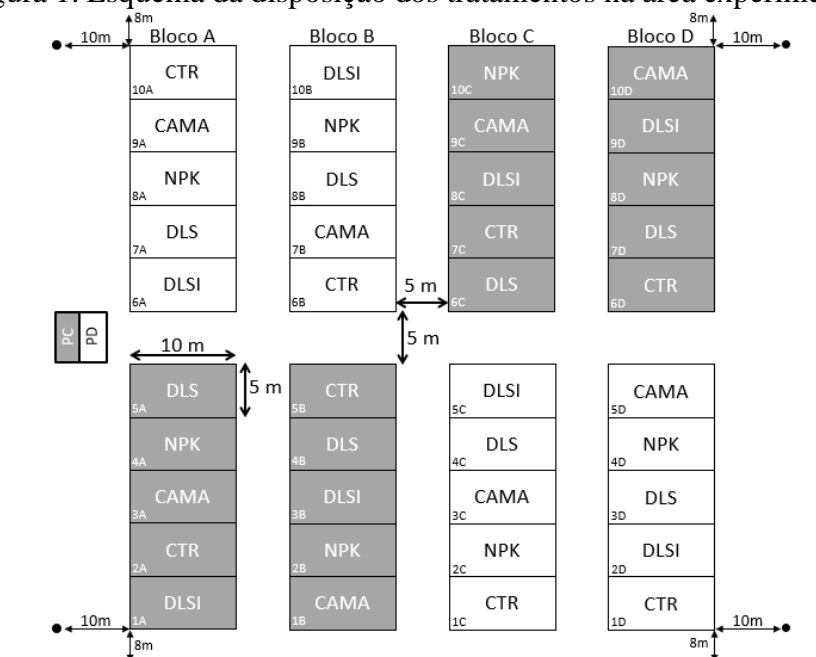
A dose de N foi dimensionada para uma expectativa de produtividade de 8.7 Mg ha⁻¹ de grãos de milho, valor relatado como médio na região de plantio (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2004). Para tanto, a dose aplicada de cada fertilizante foi calculada conforme a sua concentração de N-total e teor de matéria seca. Este procedimento promoveu a aplicação de diferentes quantidades de P e K no solo, de acordo com a fonte de fertilizante. Desta maneira, sempre que a quantidade de nutrientes aplicada via fertilizantes orgânicos foi inferior a recomendação à cultura do milho, foi adicionada a quantidade faltante para complementação com a aplicação de fertilizantes minerais (superfosfato triplo e cloreto de potássio). Assim todos os tratamentos, com exceção

do controle, receberam anualmente, no mínimo, 140 kg N ha⁻¹, 115 kg de P₂O₅ ha⁻¹ e 77 kg de K₂O ha⁻¹ (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2004).

Após a aplicação dos fertilizantes, nas parcelas no PC foi realizada a incorporação no solo com uma operação de grade niveladora. O milho foi semeado com semeadora equipada com disco de corte, facão sulcador e discos duplos defasados em linhas espaçadas por 80 cm. A população de plantas utilizada foi de 60.000-65.000 plantas ha⁻¹. O milho foi colhido mecanicamente e os resíduos da cultura permaneceram nas parcelas. A cultura da aveia-preta não recebeu qualquer aplicação de fertilizantes. Todos os demais tratamentos culturais seguiram as recomendações técnicas usuais de cada cultura.

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições (Figura 1). As parcelas principais foram compostas pelos dois sistemas de preparo do solo, com dimensões de 10 x 25 m (comprimento x largura). Nas subparcelas foram aplicadas as diferentes fontes de fertilizantes, com dimensões de 10 x 5 m (comprimento x largura) dessas unidades experimentais (UE).

Figura 1. Esquema da disposição dos tratamentos na área experimental



A área foi dividida em quatro blocos principais (A, B, C e D). Cada bloco possui duas parcelas, sendo que o branco representa o plantio direto, e o cinza o preparo convencional. Cada parcela possui cinco subparcelas referentes aos tratamentos (CTR - controle, NPK - adubação mineral, DLS - dejetos líquidos de suínos, DLSI - dejetos líquidos de suínos injetado, CAMA - cama de aves).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

5.2.3. Entradas de carbono e nitrogênio no solo

Para determinar o aporte de carbono e nitrogênio oriundo das culturas, anualmente foi realizada a amostragem de massa seca total produzidas por milho e aveia preta. O milho foi amostrado na maturação fisiológica dos grãos e no momento da colheita. Na maturação fisiológica dos grãos, realizou-se a coleta de quatro plantas de milho por UE, cortadas rente ao solo, aleatoriamente no interior das subparcelas. Os grãos foram separados do restante da planta e ambas as amostras foram secas a 65°C até peso constante.

No momento da colheita, para determinar a produtividade de grãos de milho, realizou-se a coleta das espigas das plantas de milho presentes em dois metros lineares em três locais da subparcela, compondo então uma amostra composta por subparcela. Os grãos foram removidos das espigas, pesados e uma subamostra foi seca a 65°C até peso constante para determinação da umidade. A produtividade do milho foi então expressa por unidade de área (Mg ha^{-1}) e com teor de umidade de grãos ajustado para 13%.

Esses dados foram utilizados para a determinação do índice de colheita (IC), que é a razão entre a massa de grãos e parte aérea (colmo, folhas e sabugos) da planta. O IC é calculado pela seguinte equação:

$$\text{IC} = G / (G + \text{PA}).$$

Onde: G e PA são a massa de grãos e parte aérea, respectivamente, em kg. A massa de grãos seca foi utilizada para calcular a massa da parte aérea do milho por unidade de área (Mg ha^{-1}) em função do IC.

A aveia-preta foi coletada no momento do seu pleno florescimento ou logo antes da sua dessecação, para determinação da massa de parte aérea. As plantas de aveia-preta foram cortadas rente ao solo de cada subparcela em uma área de 0,25 m² delimitada por um quadrado metálico. As amostras de aveia-preta foram secas a 65°C até peso constante e a massa de parte aérea foi expressa por unidade de área (Mg ha^{-1}).

A coleta de raízes para determinar a razão entre a massa de raízes e parte aérea foi realizada no ano de 2014. Essa amostragem foi realizada no momento da maturação fisiológica do milho, onde foram abertas trincheiras para coleta de amostras das raízes na margem de cada subparcela do PC com adubação mineral e PD com adubação mineral. A partir dessa amostragem, os dados foram extrapolados para os demais tratamentos e anos, a fim de estimar a massa de raízes em cada ano.

As amostras de raízes foram coletadas em blocos de solo de 80 cm de largura e 50 cm de comprimento nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade. Os blocos de solo foram coletados de modo que a linha do milho estivesse centralizada em relação a sua largura e a área amostrada continha 3-4 plantas de milho. A parte aérea do milho foi coletada e os blocos de solo foram desagregados manualmente de forma a preservar a integridade das raízes.

O solo aderido às raízes foi removido lavando o material com água sobre uma peneira com malha de 2 mm. A parte aérea e as raízes foram secas a 65°C até peso constante. Todas as amostras de parte aérea, grãos e raízes foram analisadas em laboratório para determinação dos seus teores de C, N, P e K.

5.2.4. Amostragem e análises de solo

O solo foi amostrado em março de 2012, e maio de 2021 para determinar os teores de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono orgânico particulado (COP), nitrogênio particulado (NP), carbono orgânico associado aos minerais (COam) e nitrogênio associado aos minerais (Nam) em cada tratamento.

As amostras foram coletadas com um trado hidráulico tipo calador, onde foi possível obter cilindros de solo indeformados com 5 cm de diâmetro até uma profundidade de 60 cm. Em cada subparcela, duas amostras foram coletadas, sendo que cada cilindro foi imediatamente medido e separado nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-60 cm, evitando a contaminação entre camadas. As duas subamostras de cada camada foram reunidas em uma amostra composta por cada subparcela e foram pesadas logo após a coleta.

Para determinação da umidade, aproximadamente 10 g de solo foram retirados das amostras e colocados a secar a 105°C até peso constante. O teor de umidade do solo foi utilizado para determinar a massa seca da amostra integral e com isso, calcular a densidade e a massa de solo em cada camada por unidade de área (Mg m^{-3} e Mg ha^{-1}) (WENDT; HAUSER, 2013).

O restante do solo das amostras, foram desagregadas manualmente, secas ao ar, peneiradas a 2 mm, raízes e fragmentos de plantas foram removidos e, então, as amostras foram homogeneizadas e armazenadas para posterior análise. Para determinação dos teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), subamostras de aproximadamente 5 gramas foram moídas em gral de ágata e posteriormente analisadas por combustão seca (CHNS-O Flash 2000, Thermo Scientific, Estados Unidos).

Parte do solo das amostras foi utilizada para fracionamento granulométrico conforme metodologia descrita por Cambardella & Elliott (1992) (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). 20 g de solo foram submetidos à dispersão em frascos com volume total de 100 mL contendo 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}). Os frascos foram agitados durante 16 horas e o solo disperso foi peneirado à $53 \mu\text{m}$ com auxílio de um jato de água destilada.

A fração de solo retida na peneira ($>53 \mu\text{m}$) foi transferida para uma bandeja de alumínio e seca a 65°C até peso constante. A fração de solo que passou pela peneira ($<53 \mu\text{m}$) foi coletada em outra bandeja de alumínio e seca a 65°C até peso constante. As duas frações foram moídas em gral de ágata e posteriormente analisadas para determinação dos teores de carbono e nitrogênio do solo por combustão seca.

Os teores de carbono e nitrogênio da fração $>53 \mu\text{m}$ foram denominados de carbono orgânico particulado (COP) e nitrogênio particulado (NP). Já, os teores de carbono e nitrogênio da fração $<53 \mu\text{m}$ foram denominados de carbono orgânico e nitrogênio associado aos minerais (Coam e NTam). Os estoques de COT e NT e demais frações granulométricas foram calculados em massas equivalentes de solo (WENDT; HAUSER, 2013), tendo como referência cada camada de solo determinadas em 2012.

Os dados foram submetidos a análise de variância, considerando os efeitos de bloco, preparo de solo como parcelas principais, fontes de N como subparcelas, tempo como subparcelas (quando aplicável) e a interação entre os fatores. Foi utilizado o comando LSMEANS com o teste t protegido para avaliar as diferenças entre as médias quando da interação de sistemas de preparo e fontes de N no mesmo ano de amostragem, e o teste F para avaliar diferenças entre anos de amostragem para a interação dos mesmos fatores. Todos os resultados foram considerados estatisticamente significantes quando $P < 0.05$.

5.3. RESULTADOS

5.3.1. Aporte de C acima do solo

A tabela 2 mostra o aporte de C gerado pela parte aérea das culturas ao longo dos 9 anos de avaliação do experimento que, juntamente com o C oriundo dos fertilizantes contribui como fonte do estoque de C no solo.

O aporte pela cultura do milho não apresentou diferença estatística entre os sistemas de preparo do solo (PC e PD), mas na média, os fertilizantes NPK, DLS e DLSI,

aumentaram o aporte de C para o solo em relação ao CTR, com valores variando de 4,60 a 4,73 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. A CAMA e o CTR apresentaram menor aporte de C em relação aos demais fertilizantes avaliados, aportando respectivamente 4,05 e 3,67 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹.

Tabela 2. Aporte de Carbono acima do solo em um Nitossolo Vermelho distroférico, sob dois sistemas de preparo e diferentes adubações durante o período de 2012 a 2021.

	Preparo	Fertilizantes					Média
		CTR	NPK	DLS	BIO/DLSI	COMP/CAMA	
		----- Mg C ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----					
Fertilizantes	PC/PD	0,00	0,00	0,92	0,48	2,68	n/d
Milho	PC	3,87	4,67	4,69	4,60	4,14	4,39ns
	PD	3,47	4,52	4,59	4,89	3,95	4,28
	Média	3,67 b ¹	4,60 a	4,64 a	4,73 a	4,05 b	4,34
Aveia preta	PC	1,61	1,61	1,69	1,92	1,70	1,70ns
	PD	1,53	1,56	1,69	1,79	1,75	1,67
	Média	1,57 b	1,59 b	1,69 ab	1,85 a	1,73 ab	1,69
Total	PC	5,47	6,29	7,00	6,79	8,15	6,74ns
	PD	5,00	6,08	6,91	6,92	8,01	6,59
	Média	5,24 d	6,18 c	6,95 b	6,85 b	8,08 a	6,66

PC- Preparo convencional, PD- plantio direto, CTR - controle, NPK - adubação mineral, DLS – dejetos líquidos de suínos, DLSI - dejetos líquidos de suínos injetado, CAMA - cama de aves; ns: não significativo pelo teste F.

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

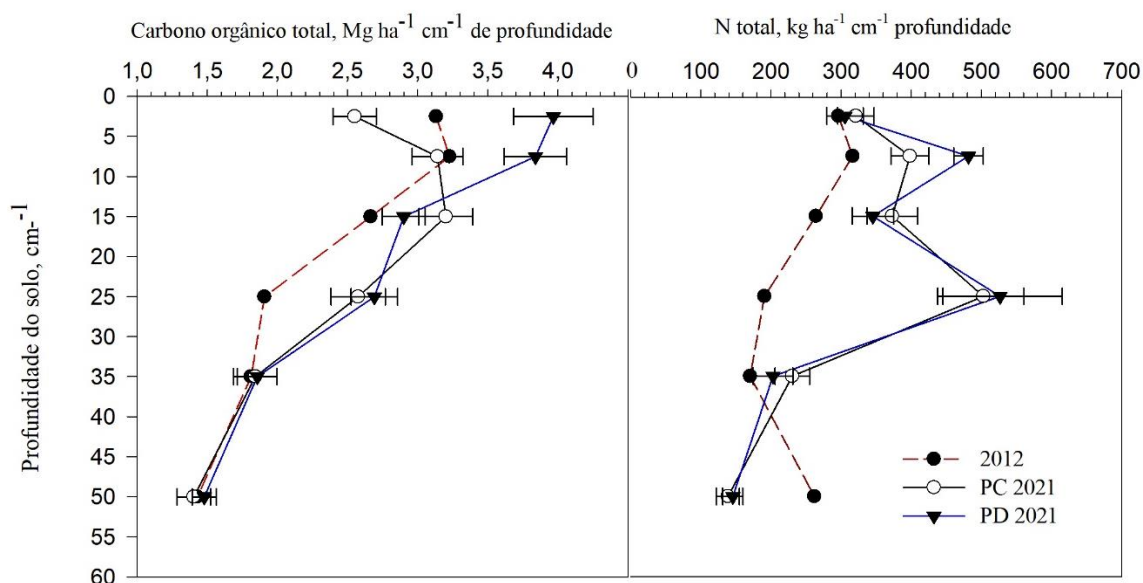
No aporte de C gerado pela aveia preta, também não houve diferença significativa entre os preparos do solo (Tabela 2). Entretanto, ao avaliar o efeito dos fertilizantes, independentemente do preparo utilizado, observou-se que o DLSI aportou 1,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ sendo superior ao controle e adubação química NPK.

O aporte total de C para o solo incluiu os fertilizantes e a massa seca oriunda do milho e da aveia preta (Tabela 2). Novamente, não houve diferença entre os sistemas de preparo, porém, isso ocorreu entre os fertilizantes. O fertilizante que mais aportou C ao longo do tempo foi a CAMA, na média forneceu 2,68 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, seguido do DLS e DLSI, 0,92 e 0,48 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Esse aporte, refletiu no montante total, onde a CAMA foi superior aos outros tratamentos, totalizando 8,08 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. Os outros fertilizantes orgânicos DLS e DLSI foram inferiores a cama, mas superiores ao NPK e ao CTR, fornecendo ao solo um total de 6,95 e 6,85 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹.

5.3.2. Estoque de C e N total no solo

Na avaliação realizada em 2021, não houve diferença significativa nos estoques de carbono total e nitrogênio total entre os fertilizantes. No entanto, observou-se efeito significativo dos sistemas de preparo do solo no estoque do carbono nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20cm do solo (Figura 2).

Figura 2. Estoque de C orgânico total (A) e N total (B) em camada até 60cm de profundidade, em um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragens realizadas em 2012, quando era mantido sob pastagem natural e em 2021, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD)



Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Nas camadas de 0-5 e 5-10 cm o estoque de carbono foi superior no PD, enquanto que na camada 10-20 o maior estoque de carbono ocorreu no PC (Figura 2. A). Nos primeiros 5 cm de profundidade, o PD teve um aumento de 1 Mg ha^{-1} , após 9 anos de uso agrícola, já o PC reduziu cerca de $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ nesta mesma profundidade, quando comparado com os estoques iniciais, em 2012. Na camada 5-10cm, a diferença também foi significativa e o PD aumentou cerca de $0,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto o PC manteve os valores iniciais de estoque.

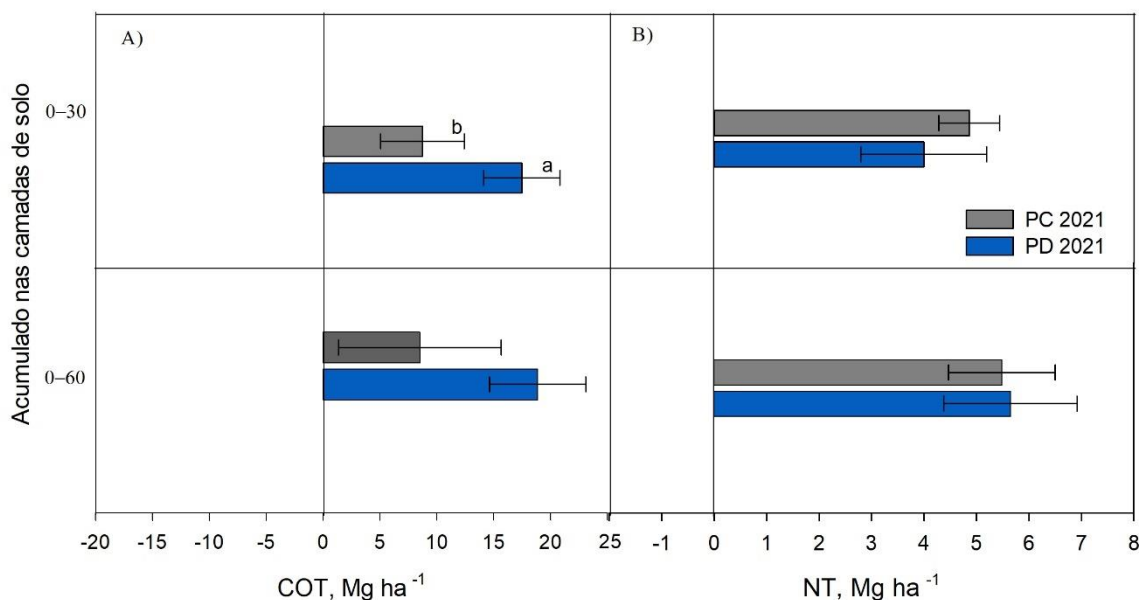
Na camada de 10-20cm o estoque de carbono em 2021, em ambos os preparos do solo foram maiores que aquele encontrado em 2012. No entanto, nessa camada (10-20cm) o PC armazenou cerca de $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ a mais carbono em relação ao PD. Na camada 20-30cm os dois sistemas de preparo do solo não diferiram entre si, porém, aumentaram o acúmulo de C em relação ao observado em 2012. Já nas camadas abaixo de 30cm não houve alteração

em relação ao estoque de C existente em 2012 e também não houve diferença significativa entre os sistemas de preparo do solo (Figura 2. A).

Ao avaliar o nitrogênio total no ano de 2021 (Figura 2. B) não se observou diferença significativa entre os preparados nas diferentes camadas do solo. No entanto, houve um aumento dos estoques de nitrogênio nas camadas até 40cm de profundidade, em comparação com os estoques existentes em de 2012, principalmente na camada 20-30cm de solo.

Considerando o estoque acumulado nas camadas de 0 a-30cm de solo, observou-se efeito significativo do preparo do solo no carbono orgânico total (figura 3, A). Em 2021, o PD acumulou cerca de duas vezes mais C no solo do que o PC (8,7 Mg ha⁻¹). Já, no estoque de C orgânico total acumulado nas camadas até 60cm, não houve diferença significativa entre os preparos do solo. Contudo, os valores numéricos do somatório de C orgânico acumulado em todas as camadas avaliadas foram distintos e a falta de diferença entre os preparos do solo é reflexo do alto coeficiente de variação observado para a média do preparo.

Figura 3. Variação nos estoques de carbono orgânico total (A) e nitrogênio total (B) nas camadas 0-30 e 0-60cm de um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragem realizada, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD).



Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Em relação ao somatório de nitrogênio total acumulado não houve diferença significativa entre os preparos do solo (Figura 3, B). No entanto, em ambos os métodos de

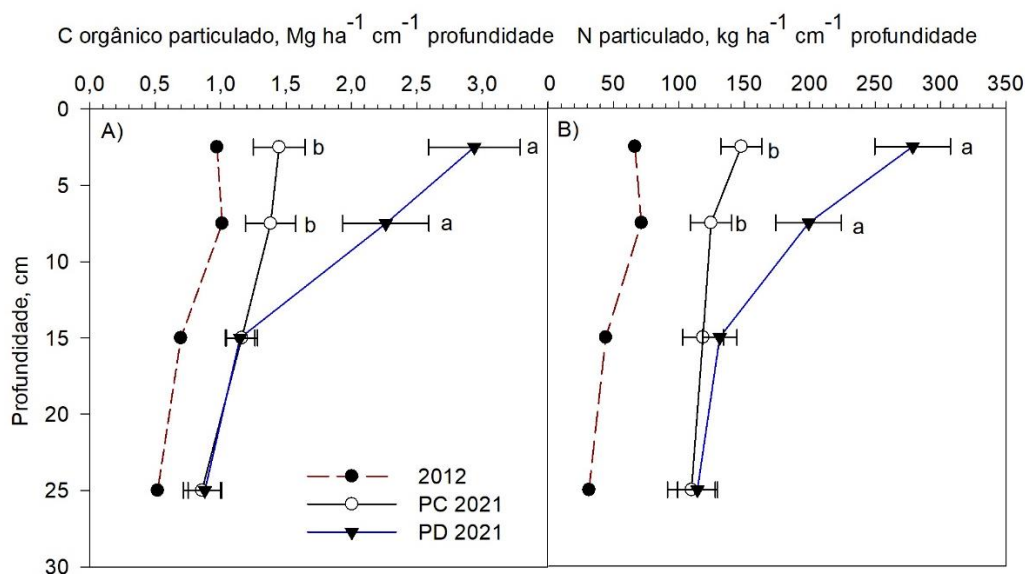
preparo do solo acumularam mais nitrogênio no perfil do solo, em comparação com ao observado 2012, representado pela linha base (0 Mg ha^{-1}).

Embora não tenham sido detectadas diferenças significativas quanto aos estoques de C e N no solo entre as diferentes fontes de adubos orgânicos, a variação nos resultados sugere que um monitoramento a longo prazo seria interessante para determinar os efeitos da adubação orgânica sobre os estoques de carbono e nitrogênio no solo.

5.3.3. Estoque de C e N particulado no solo

Avaliando os estoques de C e de N nas fração particulada ($>53 \mu\text{m}$), em 2021, não houve diferença significativa nos fertilizantes. No entanto entre as formas de preparo do solo nas camadas superficiais (0-5 e 5-10cm) (Figura 4, A), o PD apresentou maior estoque de COP, sendo superior a linha base (2012) e ao plantio convencional, em aproximadamente $2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ de C. Nas demais profundidades, inferiores a 10cm, os dois sistemas de preparo do solo mantiveram os mesmos níveis de COP, e foram superiores aos teores iniciais de 2012.

Figura 4. Estoque de C orgânico (COP) (A) e N (NP) (B) contidos na fração particulada ($>53 \mu\text{m}$) na camada 0-30cm de profundidade, em um Nitossolo sob pastagem natural em 2012 e após 9 anos de anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD).

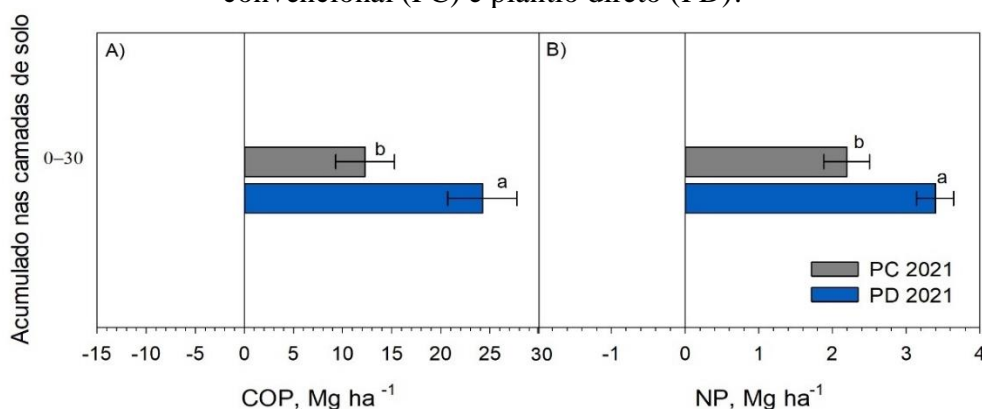


Fonte: elaborado pela autora, 2022.

O NP seguiu o mesmo comportamento do COP, teve acúmulo maior nas camadas superficiais (0-5 e 5-10cm), onde o PD foi superior ao PC, acumulando aproximadamente $170 \text{ kg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ de N na camada 0-5cm e $50 \text{ ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ na camada 5-10cm (Figura 4, B).

Já nos teores acumulados (figura 5), 0-30cm de profundidade, tanto o COP, quanto o NP, as duas formas de preparo do solo foram superiores à linha base (2012), mas o PD foi significativamente superior ao PC. O PD estocou cerca de $11,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de COP e $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ NP mais que o PC. Ao comparar o estoque COT e NT em cada camada (Figuras 4) com o estoque acumulado (Figura 5) é possível observar que a diferença vista no acumulado (0-30cm), neste caso, se deve ao aumento dos teores de COP e NT nas camadas superficiais (0-5 e 5-10cm), indicando que as primeiras camadas são mais afetadas pelo manejo do solo. Esse resultado evidencia que é o carbono de acumulação mais recente que contribui no aumento do estoque de carbono orgânico total.

Figura 5. Variação nos estoques de carbono orgânico particulado (COP) (A) e nitrogênio particulado (NP) (B) nas camadas de 0-30cm de um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragem realizada, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD).

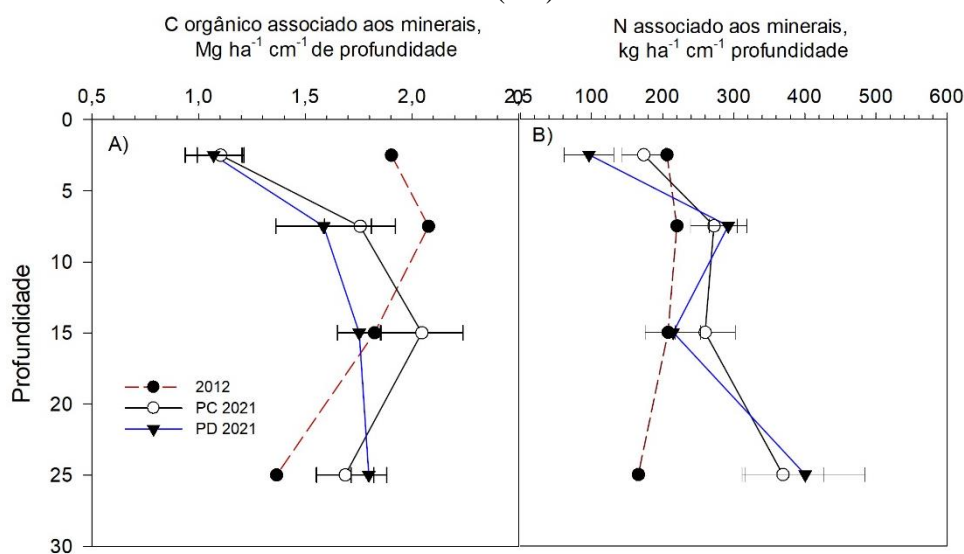


Fonte: elaborado pela autora, 2022.

5.3.4. Estoque de C e N associado aos minerais no solo

Os estoques de C (Coam) e N (NTam) associados aos minerais, não apresentaram diferença significativa entre os fertilizantes e os preparos do solo. Porém é possível observar que tanto o PD como o PC reduziram os teores de COam (figura 6, A.), quando comparado com a linha base (2012) nas camadas superficiais (0-5 e 5-10cm). O mesmo foi observado com o Nam (figura 6,B), apenas na camada de 0 a 5cm. Na camada de 10 a 20cm, tanto COam como o NTam aumentaram seus teores no PC, e na profundidade 20 a 30cm, o aumento ocorreu em ambos métodos de preparo do solo.

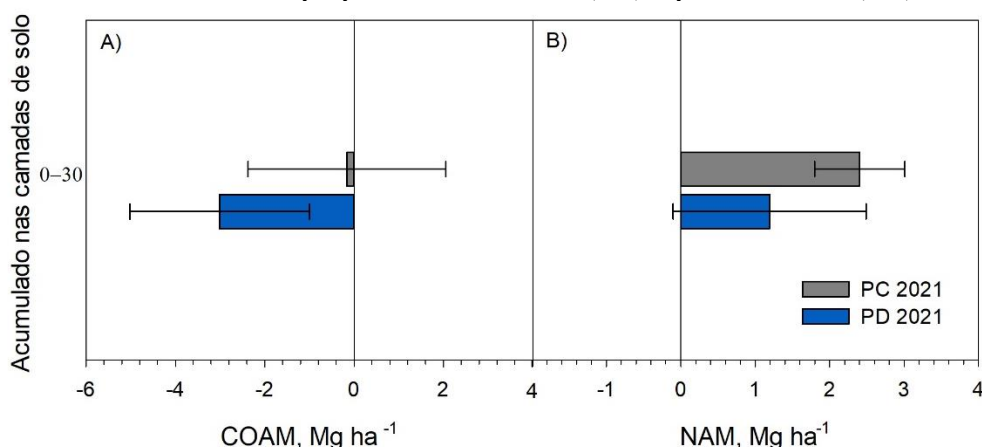
Figura 6. Estoques de C orgânico (COam) (A) e N (NTam) associados aos minerais (B) em camadas de 0-30cm de profundidade, em um Nitossolo sob pastagem natural em 2012 e após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD).



Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Na camada acumulada (0-30cm) não houve diferença significativa entre os preparos do solo, porém foi observado maiores perdas de C no COam no PD, em comparação com 2012 (figura 7, A). Na fração Nam houve um aumento em relação a linha base (2012), onde o PC armazenou certa de 1,2 Mg ha⁻¹ a mais de Nam, em comparação com PD (figura 7, B).

Figura 7. Variação nos estoques de carbono orgânico associado aos minerais (COam) (A) e nitrogênio associado aos minerais (NTam) (B) nas camadas de 0-30cm de um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragem realizada, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD)



Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Nesta mesma camada (0-30cm), o NTam, teve diferenças significativas entre os fertilizantes (Tabela. 3), em que dentro do PC, o controle foi inferior em relação ao NPK,

CAMA e DLS. O NPK, CAMA, DLS e DLSI armazenaram entorno de 3,18, 2,28, 2,16 e 1,31 Mg ha⁻¹ a mais, respectivamente, em relação ao CTR. No PD não se observou diferença entre os fertilizantes.

Ao comparar as formas de preparado do solo em cada fertilizante, o PC foi superior nos tratamentos NPK e DLS, em que a diferença foi 2,96 e 2,27 Mg ha⁻¹ em relação ao PD, respectivamente.

Tabela 3. Estoque de nitrogênio total associado aos minerais (NTam) acumulado nas camadas 0-30cm de um Nitossolo Vermelho distroférico em amostragem realizada, após 9 anos de cultivos com a sucessão milho-aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD).

	CTR	NPK	DLS	DLSI	CAMA	Média
	----- Mg ha ⁻¹ -----					
PC	¹ 6,48 aB	9,66 aA	8,64 aA	7,79 aAB	8,76 aA	8,27
PD	7,92 aA	6,70 bA	6,37 bA	6,99 aA	7,30 aA	7,06
Média	7,21	8,18	7,51	7,39	8,03	

PC- Preparo convencional, PD- plantio direto, CTR - controle, NPK - adubação mineral, CAMA - cama de aves¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha e minúscula na coluna, pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

5.4. DISCUSSÃO

5.4.1. Estoque de C e N total

A variação dos teores de C e N no solo estão relacionados principalmente com as entradas e saídas (aporte e perdas), quando o aporte é maior que as perdas, ocorre o aumento do estoque de C e N no solo. Os diferentes fertilizantes geraram aportes de quantidades diferentes de C (Tabela 2). Neste caso, mesmo o COMP e a CAMA tendo um aporte inicial maior de C, isso não refletiu diretamente em aumento de estoque de carbono. Diversos fatores podem estar relacionados com esse resultado, como a maior presença de N orgânico, que apresenta baixa mineralização (GIACOMINI; AITA, 2008; ROGERI et al., 2016), o que refletiu na menor produção de biomassa do milho, com conseqüente menor aporte de C, igualando-se à testemunha sem adubação.

No somatório do aporte de C entre os fertilizantes e a produção de biomassa pelas culturas (Tabela 2), mesmo o tratamento COMP CAMA ter aportado maiores teores de C, durante os nove anos de experimento, isso não se refletiu em diferença dos estoques de C e N acumulados no solo entre os fertilizantes. Provavelmente sejam necessários mais anos de

avalição para que os efeitos da adubação com fertilizantes orgânicos sejam significativos (RODRIGUES et al., 2021). Entretanto, as práticas de preparo do solo geralmente alteraram mais a dinâmica da matéria orgânica do solo do que a adubação nitrogenada (MAN et al., 2021).

Neste estudo, depois de nove anos de PD foi verificado aumento nos teores de C, nas camadas superficiais (0-5 e 5-10cm), em comparação ao PC e a linha base (2012), isso se deve porque sistemas conservacionistas como o PD, preservam os macroagregados do solo, conferindo uma proteção física (SIX et al., 2004). Além disso, o não revolvimento ou revolvimento mínimo do solo, evita a aeração e aumento da temperatura do solo, fatores que podem estimular a atividade microbiana, acelerando a decomposição e mineralização da MOS, como ocorre no PC. Além disso, manejos que contribuem com a longevidade de macroagregados recém-formados, resulta em maior estabilização da MOS em microagregados formados dentro de macroagregados estáveis (SIX; PAUSTIAN, 2014)

O maior aporte de resíduos e menor revolvimento do solo no PD favorece a agregação e aumenta a proteção física de C e N nos agregados. Com isso, interação organomineral também é favorecida, pois reduz o potencial oxidativo da matéria orgânica do solo, aumentando o estoque de C e N em relação ao PC (TIECHER et al., 2020). A formação de agregados no solo também pode ser estimulada com o uso de adubação orgânica (NICOLOSO et al., 2018) e adubação verde (TIECHER et al., 2020).

Além disso, o manejo da fertilidade (aporte de N), associado a manejos conservacionista, que contribuem com a adição de resíduos culturais ao solo, estão relacionados com o aumento dos estoques de carbono orgânico no solo, principalmente na camadas superficiais (DE OLIVEIRA FERREIRA et al., 2018).

O estoque de COT foi maior nas primeiras camada do solo em PD, resultados que corroboram com outros estudos (DE MORAES SÁ et al., 2014; RODRIGUES et al., 2021). Em um estudo de 24 anos, em um Gleissolo no Canadá, diferentes doses de adubação nitrogenada (N) e diferentes preparo do solo não alteraram as concentrações de carbono orgânico total no solo (MAN et al., 2021). O que indica que fatores climáticos e ambientais também influenciam nessa dinâmica, e por isso estudos em diferentes solos e climas são importantes. Além disso, em outro estudo, o uso de plantas de cobertura no inverno teve maior efeito sobre as taxas de acúmulo de C e N no solo, em comparação ao efeito do preparo do solo (TIECHER et al., 2020).

Na camada 10-20 cm o estoque de C no PC foi superior ao PD, efeito que pode ser atribuído ao revolvimento mecânico do solo, que reincorpora os resíduos orgânicos da

superfície para camadas subsuperficiais do solo, contribuindo com a redistribuição do COT da superfície para as camadas mais profundas do solo (JAGADAMMA; LAL, 2010).

Nas demais camadas (20-30, 30-40 e 40-60cm) não houve efeito do preparo do solo nos teores de carbono orgânico total. Em geral é esperado que as camadas mais profundas sejam menos afetadas pelos diferentes preparos do solo e adubação, mas é importante sua avaliação para ver a dinâmica dos estoques ou perdas de C em todo o perfil, para não super ou subestimar os resultados (BLANCO-CANQUI et al., 2021). O monitoramento ao longo do tempo e em todo o perfil do solo permite uma verificação mais precisa da dinâmica do C e do N, pois mesmo após muitos anos de avaliação o estoque de C orgânico do solo na camada superficial (0 a 20cm) pode continuar aumentando linearmente no PD, mas ao avaliar todo o perfil do solo (0 a 100cm) não observaram diferenças entre os preparos do solo, pois o estoque é redistribuído ao longo do perfil (LOCATELLI et al., 2022; TIECHER et al., 2020; VELOSO; CECAGNO; BAYER, 2019)

No acumulado de nitrogênio total não se observou efeito nos preparos do solo. No entanto, os dois métodos de preparo acumularam mais nitrogênio no perfil do solo, em comparação com a linha base (2012), após 9 anos de experimento. Esse resultado pode estar relacionado com o aporte anual de adubo, que contribuí com a manutenção da MOS.

Esses resultados sugerem que adoção do PD contribui com o aumento do estoque de carbono orgânico total e nitrogênio total, principalmente nas camadas superficiais do solo.

5.4.2. Frações de C e N particulado e associado aos minerais

O carbono orgânico particulado COP e o NP são frações mais sensíveis da matéria orgânica do solo em comparação com o CO_{am} e NT_{am}, elas equivalem às partículas com diâmetro maior que 53µm e, portanto, correspondem à fração areia do solo (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Essa fração possui uma rotatividade mais rápida, sendo de formação mais recente, oriunda principalmente da decomposição incompleta dos resíduos vegetais e fertilizantes. Assim, trata-se de uma fração cujo montante depende da contínua reposição por aportes de resíduos vegetais, por isso é usada como um indicador para verificar o efeito do preparo do solo em curto prazo (BAYER et al., 2001, 2002). Esse efeito foi observado no presente estudo, onde o aumento do estoque de COT no PD, ocorreu na fração COP, principalmente nas camadas superficiais.

Mudanças no uso e manejo do solo podem reduzir o estoque de carbono e nitrogênio do solo, porém adoção precoce de práticas conservacionistas do solo podem reduzir ou

evitar que isso ocorra (LOCATELLI et al., 2022; WUADEN et al., 2020). Em um estudo anterior, realizado neste mesmo experimento, após 5 anos de implantação, já foi possível observar o aumento do COP relacionado com a adoção de práticas conservacionistas (WUADEN et al., 2020).

O aumento do estoque de COP ocorreu principalmente nas camadas superficiais, e o NP seguiu na mesma proporção. A mudança no teor de nitrogênio nas diferentes camadas de solo, geralmente refletiu aquelas observadas para C (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992).

O PD e o alto aporte de matéria orgânica, oriundos dos fertilizantes e aporte pela biomassa vegetal, contribuem com o aumento das concentrações de frações lábeis de carbono (COP) no solo em comparação com o PC (BONGIORNO et al., 2019). Esse aumento pode estar relacionado com as características da matéria orgânica adicionada, sua composição bioquímica, tipo de vegetação, biodiversidade do solo, aporte de biomassa e práticas de manejo ou ainda relacionado com condições de clima e solo (DERRIEN et al., 2023).

A fração associada aos minerais é considerada mais estável, de formação e acúmulo há médio e longo prazos. No entanto, nesse atual estudo, tanto o COam quanto o NTam diminuíram nas camadas mais superficiais. Esse efeito pode ser atribuído a mudança de uso do solo inicialmente com uma pastagem nativa para área agrícola, que pode diminuir os teores de C associado a fração silte+argila devido a ruptura dos agregados nas áreas cultivadas, ocasionando aumento na exposição do carbono à ação microbiana (ANDRADE et al, 2013). Outro efeito que pode ser observado na mudança de uso do solo, de vegetação nativa para PD é redução de COam na camada de 30–70 cm e aumento do COP nas camadas superfícies. Neste caso o acúmulo de C na fração particulada nas camadas superiores do solo está compensando a perda do COam (LOCATELLI et al., 2022).

Outro fator pode estar relacionado com o tempo do experimento (9 anos), pois há casos de experimentos de longa duração, onde o PD aumentou os teores de carbono orgânico particulado (COP) e matéria orgânica associada a minerais (MOAM) devido à entrada constante de resíduos de culturas nas camadas superficiais (FERREIRA et al., 2020). Ao longo do tempo, maior aporte de resíduos e menor revolvimento do solo no PD aumenta a proteção física de C e N nos agregados e favorece a interação organomineral, que acaba reduzindo o potencial oxidativo do solo, aumentando o estoque de C e N. (TIECHER et al., 2020). Há indícios de que em solos relativamente pobres em MO, o C tende a ser armazenado mais como MOAM do que como MOP, em clima temperado (COTRUFO et al., 2019).

A persistência da MOP é controlada principalmente pela inibição microbiana e enzimática (além de alguma oclusão de curto prazo em agregados), enquanto a MOam é protegido da decomposição por interações organominerais com Al, Fe e Mn amorfos. (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020; PULLEMAN; MARINISSEN, 2004).

Em um estudo com diversos solos do mundo foi evidenciado a importância da proteção mineral para promover a preservação do carbono orgânico (HEMINGWAY et al., 2019). Porém, o armazenamento de C na fração COam seria limitado a um valor máximo de saturação (COTRUFO et al., 2019; GEORGIU et al. 2022), enquanto o COP, ao contrário, não parece ser limitado. A fração COP, devido ao seu tamanho ilimitado, seria, portanto, uma interessante alavanca para armazenamento adicional de C e pode representar a principal oportunidade para aumentar o armazenamento de C em solo com poucas fases minerais reativas. No entanto, essa capacidade adicional de armazenamento de C do COP ainda é controversa, uma vez que a duração desse armazenamento, antes da degradação do COP pelos decompositores, pode representar um limite para sua contribuição para o acúmulo de estoque de COS a longo prazo (DERRIEN et al., 2023).

5.5. CONCLUSÃO

O plantio direto aumenta o estoque de carbono e de nitrogênio nas camadas superficiais do solo, principalmente nas frações mais lábeis (COP e NP). No entanto, esses primeiros 9 anos de experimento, possivelmente ainda não foram suficientes para evidenciar a contribuição da adubação com fertilizantes orgânicos associada com o plantio direto, no aumento dos estoques de C e N no solo, sendo necessárias futuras avaliações.

No período de 9 anos de avaliação, o fator preparo do solo é o que mais influência na mudança de estoque de carbono e nitrogênio em solos de Nitossolo do Sul do Brasil, cultivado com sucessão de milho e aveia.

Os resultados indicam que cultivos sob manejo conservacionista do solo, como o plantio direto, associado à adubação gera maior produção de biomassa vegetal e eleva o estoque de C e N do solo, principalmente nas frações mais lábeis (C e N particulado).

5.6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. P. Estoque e frações de carbono e atributos físicos em Nitossolo Vermelho relacionados à aplicação de esterco em sistemas de produção. 2013. 86 f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, 2013.

BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C.E. C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J.A.; NICOLOSO, R. S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na Agricultura Conservacionista. *Tópicos Ci. Solo*, v. 7, p. 55-118, 2011

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

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

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

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo – ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2. Ed. Porto Alegre: Metrópole, p. 7-18, 2008.

BENITES, V.M.; CORREA, J.C.; MENEZES, J.F.S.; POLIDORO, J.C; CAMPOS, D.V.B. Production of granulated organomineral fertilizer from pig slurry and poultry litter in Brazil. Congress, Anais, 15th World Fertilizer Congress of the International Scientific Centre For Fertilizers (Ciec), 2010.

BERTOL, I.; MELLO, E. L.; GUADAGNIN, J. C.; ZAPAROLLI, A. L. V.; CARRAFA, M. R. Nutrients losses by water erosion. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 581-586, 2003.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. E A. Manual De Métodos. In: MAPA/SDA/CGAL (Ed.). *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos*. Brasília: MAPA/SDA/CGAL, 2014. p. 1–220.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1 maio 1992.

COTRUFO, M. F. et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience* 2019 12:12, v. 12, n. 12, p. 989–994, 18 nov. 2019.

DE MORAES SÁ, J. C. et al. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. *Soil and Tillage Research*, v. 136, p. 38–50, mar. 2014.

DE OLIVEIRA FERREIRA, A. et al. Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 622–623, p. 735–742, 2018.

DENEF, K. et al. Carbon Sequestration in Microaggregates of No-Tillage Soils with Different Clay Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, n. 6, p. 1935–1944, 1 nov. 2004.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2a ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 26

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3a ed. Brasília: [s.n.].

FRANCISCO, C. A. L. et al. Carbon and nitrogen in particle-size fractions of organic matter of soils fertilised with surface and injected applications of pig slurry. *Soil Research*, v. 60, n. 1, p. 65–72, 1 jan. 2022.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C. Cama sobreposta e dejetos líquidos de suínos como fonte de nitrogênio ao milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 1, p. 195–205, 2008.

GRAVE, R. A. et al. Short-term carbon dioxide emission under contrasting soil disturbance levels and organic amendments. *Soil and Tillage Research*, v. 146, n. PB, p. 184–192, 2015.

LAL, R. et al. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 73, n. 6, p. 145A-152A, 2018.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, v. 26, n. 1, p. 261–273, 1 jan. 2020.

LOCATELLI, J. L. et al. Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. *Geoderma Regional*, v. 28, p. e00474, 1 mar. 2022.

MAFRA, M. S. H. et al. Acúmulo de carbono em Latossolo adubado com dejetos líquidos de suínos e cultivado em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, n. 8, p. 630–638, 2014.

MAN, M. et al. Tillage management exerts stronger controls on soil microbial community structure and organic matter molecular composition than N fertilization. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 336, p. 108028, 15 set. 2021.

NICOLOSO, R. S. et al. Carbon saturation and translocation in a no-till soil under organic amendments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 264, n. May, p. 73–84, 2018.

- NICOLOSO, R. S.; RICE, C. W. Intensification of no-till agricultural systems: An opportunity for carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, v. 85, n. 5, p. 1395–1409, 1 set. 2021.
- PULLEMAN, M. M.; MARINISSEN, J. C. Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma*, v. 120, n. 3–4, p. 273–282, 1 jun. 2004.
- RODRIGUES, L. A. T. et al. Short- and long-term effects of animal manures and mineral fertilizer on carbon stocks in subtropical soil under no-tillage. *Geoderma*, v. 386, p. 114913, 15 mar. 2021.
- ROGERI, D. A. et al. Composition of poultry litter in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 40, 30 jun. 2016.
- SISTANI, K. R. et al. Nutrient source and tillage impact on corn grain yield and soil properties. *Soil Science*, v. 175, n. 12, p. 593–600, 2010.
- SIX, J. et al. Aggregation and Soil Organic Matter Accumulation in Cultivated and Native Grassland Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 62, n. 5, p. 1367–1377, 1998.
- SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, v. 79, p. 7–31, 2004.
- SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000.
- SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 68, p. A4, 2014.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. Manual de Adubação e Calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10a ed. [s.l.] Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004.
- TIECHER, T. et al. Effect of 26-years of soil tillage systems and winter cover crops on C and N stocks in a Southern Brazilian Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, 25 nov. 2020.
- TIEFENBACHER, A. et al. Optimizing carbon sequestration in croplands: A synthesis. *Agronomy*, v. 11, n. 5, 1 maio 2021.
- VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. *Soil and Tillage Research*, v. 190, p. 139–146, 1 jul. 2019.
- WATTS, D. B. et al. Long-Term Tillage and Poultry Litter Impacts Soil Carbon and Nitrogen Mineralization and Fertility. *Soil Science Society of America Journal*, v. 74, n. 4, p. 1239–1247, 2010.

WENDT, J. W.; HAUSER, S. An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers. *European Journal of Soil Science*, v. 64, n. 1, p. 58–65, 2013.

WITZGALL, K. et al. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nature Communications*, v. 12, n. 1, p. 1–10, 5 jul. 2021.

WUADEN, C. R. et al. Early adoption of no-till mitigates soil organic carbon and nitrogen losses due to land use change. *Soil and Tillage Research*, v. 204, n. June, p. 104728, 2020.

YANG, W. et al. CO₂ emission and soil carbon sequestration from spring- and fall-applied poultry litter in corn production as simulated with RZWQM2. *Journal of Cleaner Production*, v. 209, p. 1285–1293, 1 fev. 2019.

ZANATTA, J. A. et al. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. *Soil and Tillage Research*, v. 94, n. 2, p. 510–519, 1 jun. 2007.

6. CAPÍTULO 2: DINÂMICA DA PROTEÇÃO FÍSICA DO CARBONO E NITROGÊNIO EM AGREGADOS DE UM NITOSSOLO SOB SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E ADUBAÇÃO ORGÂNICA

6.1. INTRODUÇÃO

A agregação é considerada um dos mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo (MOS), protegendo fisicamente a matéria orgânica da ação dos decompositores (SIX et al., 2004). Os agregados do solo e suas frações são partículas secundárias formadas pela combinação de fragmentos minerais e outras substâncias orgânicas e inorgânicas que apresentam importante papel como retentores de carbono e nitrogênio (BRONICK & LAL, 2005; JASTROW & MILLER, 1997). Os agregados do solo são classificados de acordo com o seu diâmetro, com nomenclaturas para cada fração (OADES & WATERS, 1991; TISDALL & OADES, 1982).

Portanto, o fracionamento físico dos agregados do solo, mediante sua separação em diferentes faixas granulométricas, pode ser uma abordagem útil para entender a dinâmica e os atributos funcionais da MOS. Assim, as frações menores que 53 μm , denominadas como “fração silte + argila”, são compostos de complexos organominerais recalcitrantes. Estes são frequentemente vinculados aos microagregados (53 a 250 μm) que são mantidos com polissacarídeos e materiais húmicos, que também são razoavelmente persistentes devido à recalcitrância bioquímica e proteção física (GULDE et al., 2008). Esses materiais são frequentemente unidos em macroagregados pequenos (250 -2000 μm) e magroagregados grandes (maior que 2000 μm) por raízes, hifas e materiais orgânicos que prontamente se decompõem ou mudam, mas parte permanece fisicamente protegida dentro do agregado (GULDE et al., 2008; (WITZGALL et al., 2021)).

Essas três classes de tamanho ocorrem no que é conhecido como uma hierarquia agregada (TISDALL & OADES, 1982). Os macroagregados possuem tamanho maior, são menos estáveis e se quebram mais facilmente quando expostos à hidratação. Já os microagregados possuem tamanho intermediário e são ligeiramente mais estáveis do que os macroagregados. Já, a fração silte + argila possui o menor tamanho e é considerada a agregação mais estável (TISDALL & OADES, 1982).

Os agregados, sobretudo os macroagregados são sensíveis às práticas de manejo do solo, sendo que as técnicas utilizadas no preparo convencional provocam o aumento da quebra dos mesmos (SIX et al., 1998). Por exemplo, o revolvimento e exposição do solo às

chuvas provoca a interrupção dos agregados do solo, expondo o carbono que estava previamente protegido, das ações do ambiente e a degradação dos microrganismos, ocasionando o aumento da decomposição e perda da MOS (SIX et al., 1998; MIKHA; RICE, 2004).

A perturbação resultante do preparo do solo é uma das principais causas da diminuição da MOS, e da redução do número e estabilidade dos agregados do solo, em áreas onde ecossistemas naturais foram convertidos para a agricultura (SIX; PAUSTIAN, 2014). Os sistemas de plantio direto (PD) geralmente exibem maior agregação e MOS em relação ao preparo convencional (PC). Entretanto, a extensão das mudanças de MOS em resposta ao manejo de PD varia entre os solos, sendo que os mecanismos de estabilização da matéria orgânica nos sistemas de PD ainda não são claros (SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 2000). Além disso, uso adubação com fertilizantes orgânicos, com maior teor de matéria seca e maior relação C:N, como cama de aves, sozinha (YANG et al., 2019) ou associado ao plantio direto possui o potencial de aumentar os teores de MOS (WATTS et al., 2010).

Sendo assim, o objetivo desse estudo foi analisar o efeito do preparo do solo e da adubação orgânica e mineral na proteção da matéria orgânica (formação de macroagregados), em um Nitossolo em clima subtropical.

6.2. MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1. Área experimental

O estudo foi realizado no mesmo experimento descrito no capítulo I.

6.2.2. Amostragem de solo e análise dos agregados estáveis em água

Para avaliar o carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) contidos em diferentes tamanhos de agregados, foi realizada uma coleta de solo em agosto de 2020, nos tratamentos: preparo convencional: controle (PC CTR), mineral (PC NPK), e cama de aves (PC CAMA); e plantio direto: controle (PD CTR), mineral (PD NPK) e cama de aves (PD CAMA); além do campo natural (CN) como área de referência.

As amostras de solo foram coletadas nas camadas 0-5 e 5-10 cm, em blocos indeformados de 15 cm x 15 cm e foram cuidadosamente acondicionados em uma forma de alumínio. O fracionamento dos agregados do solo estáveis em água obtidos por peneiramento úmido foi realizada, baseada na metodologia descrita por Six et al. (2000).

Após a coleta, as amostras foram desagregadas manualmente até que todo o solo passasse por uma peneira com malhas de 8 mm. A seguir, o solo foi seco ao ar, raízes e fragmentos grosseiros de plantas foram removidos e as amostras foram então armazenadas em recipientes rígidos para evitar a sua fragmentação.

Para o fracionamento os agregados foram saturados com água, de modo que a pressão causada pelo ar preso no interior dos agregados promovesse a ruptura dos agregados instáveis na amostra e a seguir, foi realizado o peneiramento úmido (OR, 1996). Cerca de 80 g de cada amostra foram pesadas e distribuídas uniformemente sobre uma peneira com malha de de $2.000\mu\text{m}$ colocada dentro de um balde plástico de 10 litros. Lentamente foi adicionada água destilada, pelas laterais do balde, até cerca de 2 cm acima do nível da malha da peneira, cobrindo todo o solo com água. Assim, as amostras permaneceram em repouso durante 5 minutos.

Todas as raízes e outros fragmentos de plantas maiores que 2,00 mm que flutuaram após a adição da água foram removidos, pois não são considerados como parte da MOS. Os agregados estáveis em água foram separados manualmente pela oscilação vertical da peneira emergindo e submergindo na água por 50 vezes em dois minutos. Os agregados estáveis em água que ficaram retidos na peneira foram transferidos com o auxílio de jatos de água destilada para uma bandeja de alumínio. O restante do solo e a água retida no balde foram transferidos para uma peneira com malha de $250\mu\text{m}$ e posteriormente para outra peneira com malha de $53\mu\text{m}$, repetindo-se os procedimentos de separação descritos acima. O solo que passou pela última peneira (de $53\mu\text{m}$), foi mantido no balde por 48 horas, até que todo o solo decantasse. A água foi cuidadosamente descartada e o solo foi transferido para uma bandeja de alumínio e colocado a secar a 65°C até peso constante.

Este procedimento separa quatro frações de tamanhos de agregados estáveis em água: macroagregados grandes (MG, $>2.000\mu\text{m}$), macroagregados pequenos (MP, $250-2.000\mu\text{m}$), microagregados (mi, $53-250\mu\text{m}$) e a fração silte+argila (s+a, $<53\mu\text{m}$). O procedimento foi realizado em duplicata, formando amostra dupla para cada repetição dos tratamentos. Porções com aproximadamente 2g de solo foram moídas manualmente com gral de ágata e posteriormente foram determinados os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo por combustão seca.

Outras porções de 2 a 4g foram utilizadas para a determinação do teor de areia nas classes de agregados maiores que $53\mu\text{m}$ (ELLIOTT et al., 1991). Para isso, as subamostras foram dispersas em 10-20mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) com agitação durante 4 h e o solo disperso foi peneirado a $53\mu\text{m}$ com auxílio de jatos de água destilada. A

fração de solo retida na peneira de 53 μ m, correspondendo a fração areia foi transferida para uma bandeja de alumínio e seca a 65°C até peso constante. O teor de areia foi utilizado para corrigir a massa e a concentração de carbono e nitrogênio de cada classe de agregados, obtendo-se agregados estáveis em água livres de areia.

Os dados foram submetidos a análise de variância, utilizando o pacote estatístico SAS 9.2 (SAS Institute, 2008), sendo avaliada a presença de interação entre o preparo do solo e fertilizantes. Quando não houve interação significativa foram avaliados separadamente o efeito do preparo do solo e o efeito dos fertilizantes pelo teste de Tukey a 5%.

6.3. RESULTADOS

Ao avaliar a interação entre os fatores preparo do solo e fertilizante, na camada de 0-5cm, não houve efeito significativo da massa de solo recuperada nas classes de agregados estáveis em água, livres de areia (AEA). No entanto, ao avaliar separadamente o efeito de cada fator, observou-se diferenças (Tabela 4). Não foram observadas diferenças na proporção da amostra recuperada dentro das frações de agregados estáveis em água em função dos tratamentos testados neste estudo, com média de 99,2% da amostra original (Tabela 4).

Na avaliação do efeito do preparo do solo, na camada 0-5cm, verificou-se que o PC teve as maiores recuperações de massa nas classes <53 e 53 -250. No entanto, na classe >2000 os sistemas de preparo PD e CN foram superiores, recuperando 65 e 78% da sua massa nessa classe de agregado, enquanto no PC a proporção foi de 50,7%. Ao avaliar o efeito da classe de agregados, dentro de cada sistema de preparo do solo, observou-se que a distribuição foi semelhante, tanto no preparo do solo quanto nos fertilizantes, tendo maior proporção nos macroagregados grandes (>2000), seguido dos macroagregados pequenos (250-2000), microagregados (53-250) e silta+argila (<53), independente do preparo do solo (Tabela 4).

Ao avaliar o efeito do fertilizante, na mesma camada, observou-se que dentro da classe <53 a maior recuperação de massa foi no controle e no NPK em relação ao campo natural. Já na classe de 53-250 somente o controle foi superior ao CN. Na camada 250-2000 não houve diferença entre os tratamentos, contudo, na classe >2000 observou-se o efeito inverso das classes anteriores, onde o CN foi superior ao NPK e ao CTR na distribuição de massa, porém o tratamento CAMA não diferiu dos demais (Tabelas 4). Na comparação do

efeito dos fertilizantes na classe de agregados (linha), a distribuição foi semelhante nos tratamentos NPK, CAMA e CN, onde a classe >2000 foi superior, seguido da 250-2000. Nesses tratamentos, as classes 53-250 e <53 foram semelhantes e inferiores as demais.

Tabela 4. Distribuição da massa dos agregados estáveis em água, livres de areia, na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes.

Preparo	Fertilizantes	Classes de agregados estáveis em água, sem areia			
		<53	53-250	250-2000	>2000
g kg^{-1} solo					
PC	CTR	20,36	77,32	228,59	262,07
	NPK	16,44	54,60	288,95	300,72
	CAMA	12,49	41,26	230,14	433,83
PD	CTR	12,19	39,74	275,78	409,04
	NPK	8,64	30,79	183,29	432,72
	CAMA	5,90	22,54	145,27	502,54
PC		16,43 cA	57,72 cA	249,23 bA	332,21 aB
PD		8,91 cB	31,02 cB	201,45 bAB	448,10 aA
CN		3,31 cB	8,31 cB	143,15 bB	551,95 aA
	CTR	16,28 bA	58,53 bA	252,19 a	335,55 aB
	NPK	12,54 cA	42,69 cAB	236,12 b	366,72 aB
	CAMA	9,19 cAB	31,90 cAB	187,71 b	468,19 aAB
	CN	3,31 cB	8,31 cB	143,15 b	551,95 aA

PC- Preparo convencional, PD- plantio direto, CN- campo natural, CTR - controle, NPK - adubação mineral, CAMA - cama de aves; ns: não significativo pela ANOVA. ¹ Médias seguidas de letras iguais maiúscula na coluna não diferem avaliando o efeito dos fatores dentro de cada classe de agregado. Letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si avaliando o efeito das classes de agregados dentro do método de preparo e fertilizantes, pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Na camada 5-10cm também não foi observada interação significativa entre os fatores preparo do solo e fertilizantes, no tamanho da classe de agregados em água estáveis, livres de areia (AEA) (Tabela 5).

Ao avaliar os fatores isoladamente observou-se que no sistema de preparo do solo, o PC foi superior na distribuição de massa em relação aos demais tratamentos nas classes <53 e 53-250. Na classe 250-2000 PC foi superior ao CN, mas o PD não diferiu dos demais tratamentos. E na classe >2000 não foi observado diferença. Ao avaliar o efeito da classe de agregados, dentro de cada sistema de preparo do solo, observou-se o mesmo efeito da camada 0-5cm, onde a distribuição teve efeito significativo e foi semelhante tanto nas formas de preparo como nos fertilizantes, tendo maior proporção nos macroagregados grandes (>2000), seguido dos macroagregados pequenos (250-2000) (Tabela 5).

Ao testar os fertilizantes, na classe <53 o tratamento CRT teve maior concentração de massa em relação a CAMA e ao CN, porém foi igual ao NPK, e este não diferiu dos demais tratamentos. Nas outras classes de agregados não foi observado diferença estatística entre os fertilizantes (Tabela 5).

Tabela 5. Distribuição da massa dos agregados estáveis em água, livres de areia, na camada 5-10cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes.

Preparo	Fertilizantes	Classes de agregados estáveis em água, sem areia			
		<53	53-250	250-2000	>2000
g kg ⁻¹ solo					
PC	CTR	14,72	50,01	240,10	392,09
	NPK	13,38	45,74	210,47	310,60
	CAMA	8,16	27,76	159,14	448,31
PD	CTR	11,14	20,46	162,43	517,40
	NPK	8,05	28,26	186,82	401,71
	CAMA	5,08	17,92	129,97	512,18
PC		12,09 cA	41,17 cA	203,24 bA	383,66 a
PD		8,09 cAB	22,21 cB	159,74 bAB	477,10 a
CN		5,23 cB	13,92 cB	130,38 bB	357,63 a
	CTR	12,93 cA	35,23 c	201,27 b	454,74 a
	NPK	10,72 cAB	37,00 c	198,65 b	356,15 a
	CAMA	6,62 cB	22,84 c	144,56 b	480,25 a
	CN	5,23 cB	13,92 c	130,38 b	357,63 a

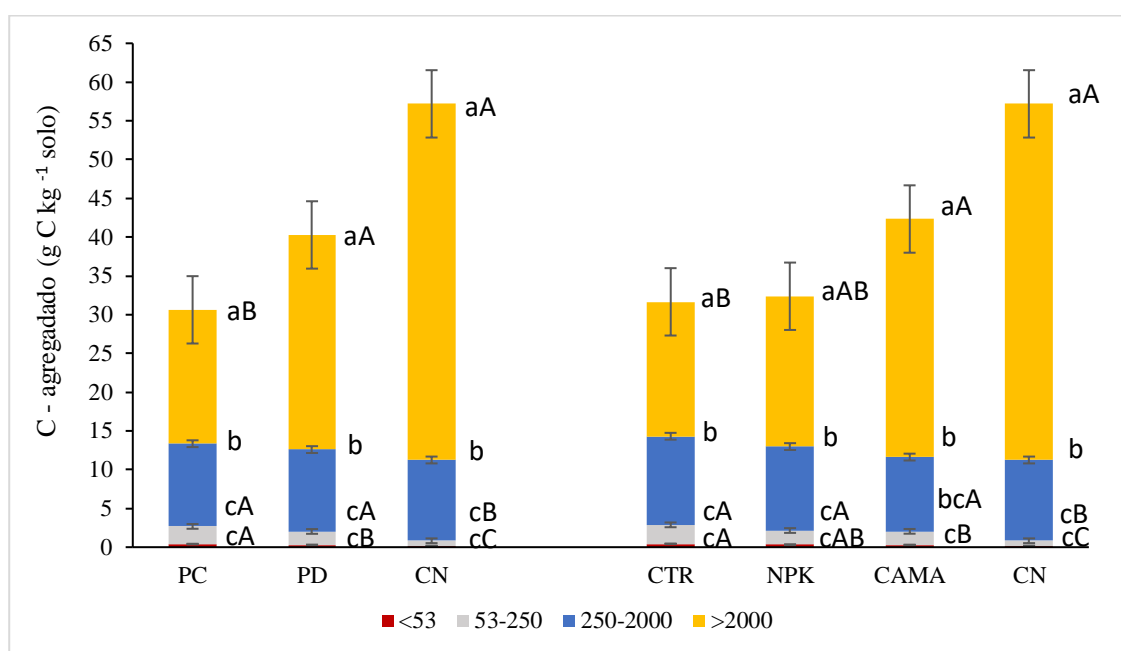
PC- Preparo convencional, PD- plantio direto, CN- campo natural, CTR - controle, NPK - adubação mineral, CAMA - cama de aves; ns: não significativo pela ANOVA. ¹ Médias seguidas de letras iguais maiúscula na coluna não diferem avaliando o efeito dos fatores dentro de cada classe de agregado. Letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si avaliando o efeito das classes de agregados dentro do método de preparo e fertilizantes, pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Nas classes de agregados estáveis em água livres de areia não houve interação significativa entre os fatores preparo do solo e fertilizante no teor de C, na camada 0-5cm. Contudo, observou-se diferenças nos efeitos principais, quando esses fatores foram avaliados individualmente (Figura 8). Nos sistemas de preparo do solo, o PC apresentou maior teor de C em relação ao PD e CN na classe <53 (Figura 8). Na classe 53-250 o preparo PC foi superior ao CN, porém o PD foi similar a ambos. Já na classe 250-2000 não foi observado diferenças entre os preparos do solo. No entanto, na classe >2000 o CN teve maior C diferindo dos dois preparos, enquanto, o PD foi inferior ao CN e superior ao PC. Já na distribuição das classes de agregados dentro de cada preparo do solo, os teores de C foram maiores no macroagregados grandes (>2000), seguidos do macroagregados pequenos

(250-2000), seguido das duas classes menores que não se diferiram entre si, em todos os preparos.

Figura 8. Teores de carbono (C) do solo em agregados estáveis em água, livres de areia, frações (< 53, 53-250, 250-2.000 e > 2.000 μm) na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes.



PC- Preparo convencional, PD- plantio direto, CTR - controle, NPK - adubação mineral, CAMA - cama de aves; Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula (preparo do solo ou fontes de N) e minúscula (tamanho de agregado), pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

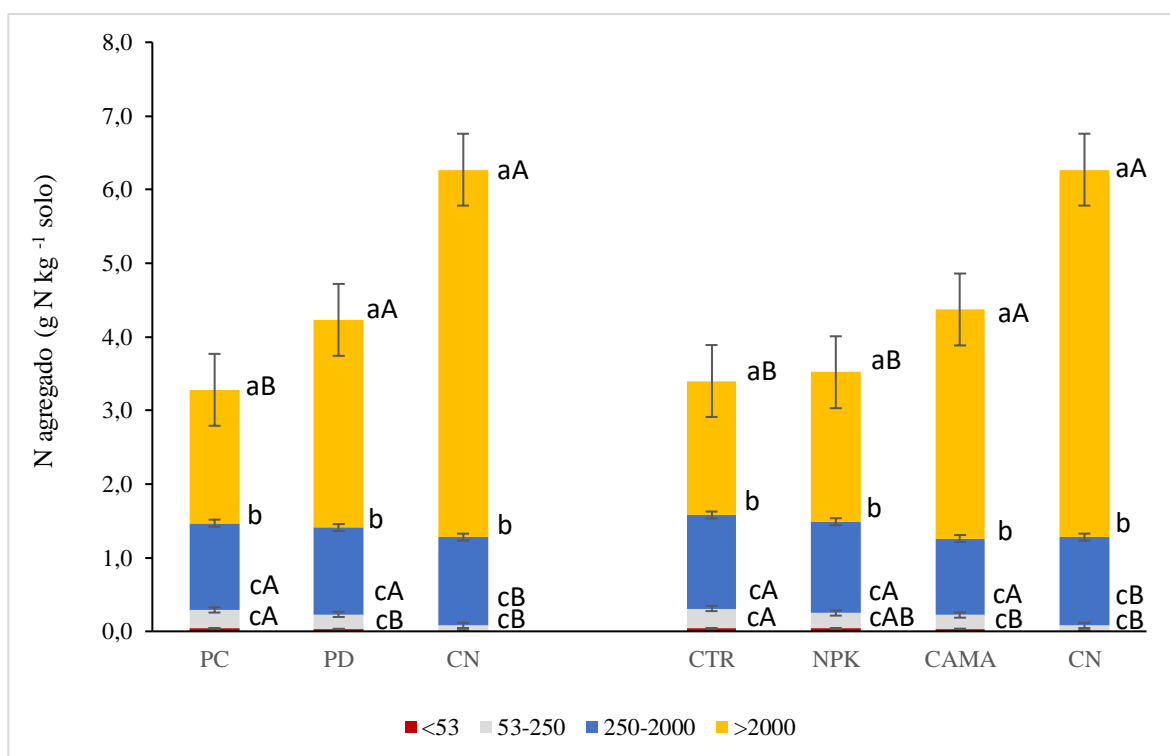
Na avaliação individual dos fertilizantes, na classe de agregado <53 o controle teve os maiores teores de C em comparação com a CAMA e o CN. Na classe 53-250, o CTR foi superior ao CN. Contudo, na classe de 250-2000 não foi observado diferença. Já na classe >2000 o CN apresentou os maiores de C, sendo superior aos demais tratamentos, com cerca de 2x mais que no CTR. Nesta mesma classe, os fertilizantes da CAMA e NPK foram inferiores ao CN e superiores ao CTR. Avaliando os teores de C em cada classe de agregados, dentro de cada fertilizante a maior concentração também foi observada no macroagregados grandes (>2000), seguidos do macroagregados pequenos (250-2000), seguido das duas classes menores.

Na avaliação da interação dos fatores preparo do solo e fertilizante quanto aos teores de N em agregados estáveis em água, na camada 0-5cm, também não foi observada diferença. No entanto, ao avaliar separadamente o efeito de cada fator (Figura 9), observou-

se diferença entre preparo do solo, na camada 0-5cm, nas classes <53, onde o PC foi maior que os demais tratamentos. Na classe 53-250, os teores de N foram mais altos no PC e no PD, em comparação com ao CN. Já na classe 250-2000 não foi observado diferenças. E na classe >2000 os teores de N foram maiores no CN, em comparação com o PD e o PC, porém o PD é também superior ao PC.

Ao avaliar o efeito de fertilizante, na mesma camada, nos teores de N, observou-se que dentro das classes <53 e 53-250, a maior teor de N ocorreu no tratamento controle diferindo do CN. Na classe 250-2000 não foi observado diferença entre os fertilizantes. Já na classe >2000, a maior % de N foi observada em CN, que foi superior em relação aos demais. Contudo, a CAMA foi superior ao CTR e ao NPK, mas inferior ao CN (Figura 9).

Figura 9. Teores de nitrogênio (N) do solo em agregados estáveis em água, livres de areia, frações (< 53, 53-250, 250-2.000 e > 2.000 μm), na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes.

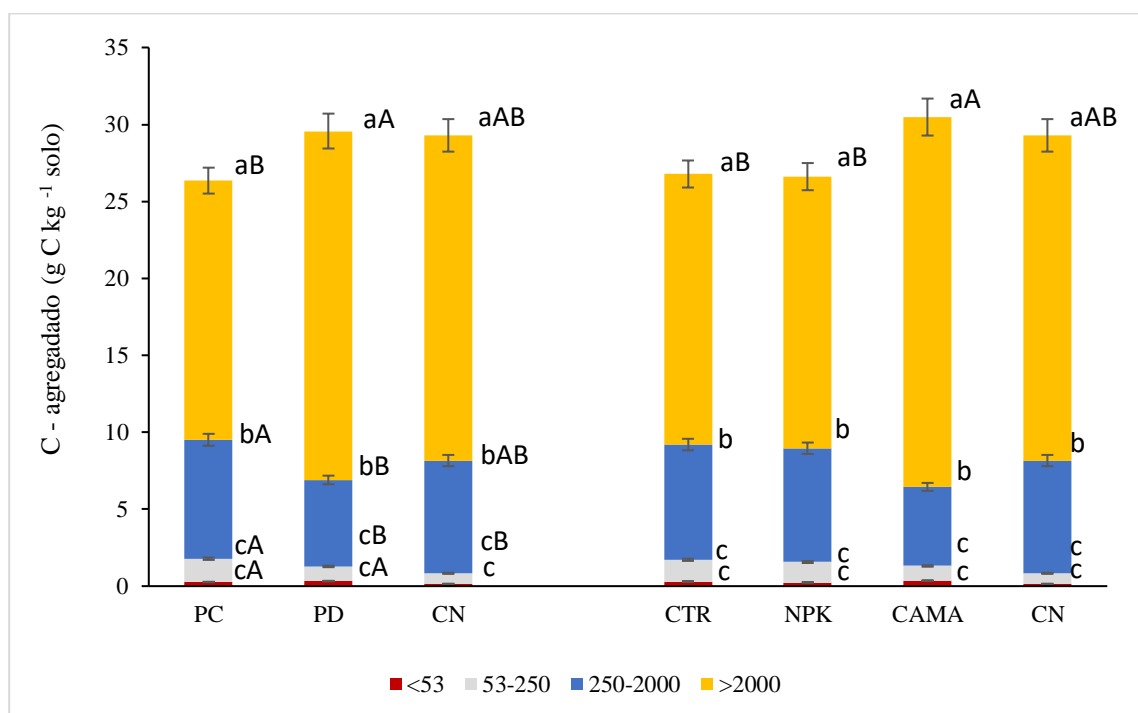


PC- preparo convencional, PD- plantio direto, CTR - controle, NPK - adubação mineral, CAMA - cama de aves; Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula (preparo do solo ou fertilizantes) e minúscula (tamanho de agregado), pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Não foram observados efeitos da interação dos sistemas de preparo do solo e fertilizantes nos teores de C e N, na camada de 5-10cm (Figura 10 e 11). Ao avaliar o fator preparo do solo, foi observado resultados significativos nas classes 53-250, 250-2000 e >2000, em que na classe 53-250 o PC foi superior ao PD e ao CN. Já na classe 250-2000 PC foi superior ao PD. Por outro lado, na classe >2000 o PD apresentou maiores teores de C e N em relação ao PC, (Figura 10). O mesmo resultado foi observado para os teores de N para os sistemas de preparo do solo (Figura 11).

Figura 10. Teores de carbono (C) do solo em agregados estáveis em água, livres de areia, frações (< 53, 53-250, 250-2.000 e > 2.000 μm), na camada 5-10cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes.

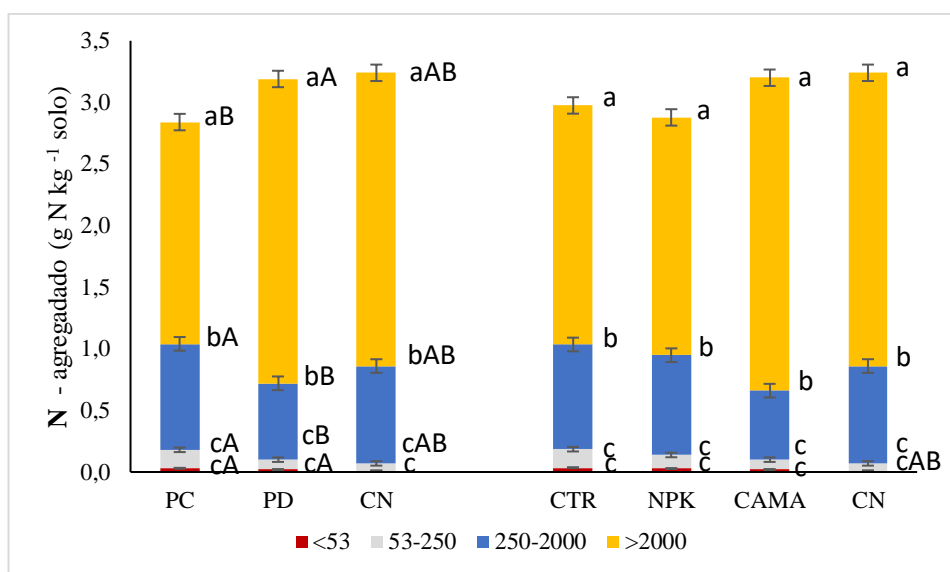


PC- preparo convencional, PD- plantio direto, CTR - controle, NPK - adubação mineral, CAMA - cama de aves; Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula (preparo do solo ou fertilizantes) e minúscula (tamanho de agregado), pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Na mesma camada (5-10cm) foi observado efeito significativo de fertilizante nos teores de C, mas apenas na classe >2000, onde a CAMA obteve maiores teores de C em relação ao controle e NPK (Figura 10). Já nos teores de N, a diferença foi observada na classe <53, onde o CTR apresentou quantidade maior de C em relação a CAMA (Figura 11).

Figura 11. Teores de nitrogênio (N) do solo em agregados estáveis em água, livres de areia, frações (< 53, 53-250, 250-2.000 e > 2.000 μm), na camada 5-10cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob nove anos contínuos de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes contrastantes.



PC- preparo convencional, PD- plantio direto, CTR - controle, NPK - adubação mineral, CAMA - cama de aves; Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula (preparo do solo ou fertilizantes) e minúscula (tamanho de agregado), pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

6.4. DISCUSSÃO

Os teores de C e de N nos agregados refletem o equilíbrio das entradas e perdas da MOS. Desta forma, esse componente do solo pode desempenhar um papel importante na formação de agregados do solo. Neste estudo os maiores teores de C e N nos agregados foram observados principalmente nos macroagregados do solo, independentemente da forma de preparo ou fonte de N. Esses resultados provavelmente ocorreram porque a matéria orgânica atuou como um dos agentes de ligação de partículas no solo.

O preparo do solo interfere na proporção das diferentes frações de agregados, sendo que em solos com maior intensidade de cultivo, onde há o revolvimento, a proporção de macroagregados é menor, enquanto a quantidade de microagregados é maior (SIX et al., 2000; SIX; PAUSTIAN, 2014). Desta forma, a menor agregação também se reflete em menores teores de C e N orgânicos do solo (SIX et al., 1998). Esse efeito também foi observado no presente estudo, onde a proporção de macroagregados foi maior no plantio direto e equivalente ao campo natural, quando comparado com o preparo convencional. Resultado semelhante foi observado por Jagadamma & Lal, 2010, onde o plantio direto obteve maior proporção de macroagregados grandes (>2.000 μm) e os teores de carbono

foram 1,5-2,8 vezes maiores em todas as classes de tamanho de agregado (JAGADAMMA; LAL, 2010).

O aumento dos conteúdos de C e N dentro dos macroagregados grandes pode ser associado ao mecanismo de proteção física, pois a permanência da matéria orgânica no solo é favorecida por restrições espaciais e energéticas aos microrgânicos decompositores (DERRIEN et al., 2023).

Segundo SIX et al. (2004) a estocagem de C de um determinado solo pode estar relacionada à proporção de macroagregados grandes (>2000 μm) que, normalmente, contém a maior parte do C no solo. Neste estudo, o plantio direto e o campo natural tiveram as maiores proporções de macroagregados grandes estáveis (65 e 78%, respectivamente) na camada 0-5cm. Já, as parcelas com preparo convencional tiveram a maior proporção de microagregados (27%). Assim, o plantio direto favorece a formação e permanência de macroagregados devido à redução dos distúrbios do solo (SIX et al., 2000).

Assim, o PD pode promover o acúmulo de C ocluído nos agregados, o que também promove a associação organomineral (SIX et al., 2000; VELOSO; CECAGNO; BAYER, 2019). A oclusão de microagregados em estruturas maiores levaram a maiores teores de C nessas frações, indicando a contribuição dos macroagregados na preservação da MOS (SCHWEIZER et al., 2019). De acordo com Six et al. (2000), restos de plantas, raízes e matéria orgânica particulada interagregada (POM) estabilizam os macroagregados. Microagregados se desenvolvem dentro de macroagregados, sequestrando minúsculas partículas orgânicas (SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 2000).

Além disso, a textura do solo também pode influenciar na dinâmica da MOS e na formação e estabilização de agregados. Em solos com maiores teores de argila, podem conter maiores proporções de macroagregados e teores de C e N nessa fração, enquanto em solos com baixo teor de argila, essa proporção foi inversa (ERCOLE et al., 2023; SCHWEIZER et al., 2019).

Além disso, o uso de fertilizantes orgânicos pode aumentar a proporção de macroagregados e acelerar o acúmulo de C orgânico em todas as frações de agregados (KING et al., 2019; NICOLOSO et al., 2018). O aporte de fertilizantes com maiores conteúdos de C pode aumentar o armazenamento de C e contribuir para a agregação e sequestro de carbono no solo (NICOLOSO et al., 2018; KING et al., 2019;). Essas observações são corroboradas pelos resultados que foram observados neste estudo, demonstrando a importância da proteção de C e N em macroagregados grandes para promover a qualidade do solo e o armazenamento de C e N nas suas camadas superficiais

(FABRIZZI et al., 2009; De OLIVEIRA FERREIRA et al., 2018; NICOLOSO et al., 2018; WUADEN et al., 2020). Outro fator que tem contribuído com o aumento dos estoques de carbono e nitrogênio no solo é a rotação de gramíneas com leguminosas, como milho e soja, associado ao plantio direto, pois pode aumentar a formação de magroagregados e restaurar os teores de carbono do solo (DE OLIVEIRA FERREIRA et al., 2018; NICOLOSO; RICE, 2021).

Neste estudo todas as frações de classes de agregado foram sensíveis aos diferentes preparos e fertilizantes estudados. Em outro estudo, com mais anos de avaliação e em um ambiente diferente, as frações macroagregados e silte+argila foram as mais sensíveis ao uso de fertilizantes nos solos cinzentos (KING et al., 2019).

6.5. CONCLUSÃO

Os preparos do solo e os fertilizantes interferem na distribuição de massa de solo e conteúdo de C e N nas diferentes classes de agregados estáveis em água. A plantio direto, quando comparado com o preparo convencional, aumenta a proteção do C e do N em macroagregados grandes do solo (>2000) do solo, igualando-se ao campo natural.

Os manejos de solo em campo natural, plantio direto e a adubação com cama de aves preservam maiores teores de C e N em macroagregados grandes (>2000).

A camada de 0-5cm é mais afetada pelo preparo do solo e pela adubação comparativamente à camada. 5-10cm

O efeito esperado da adubação com fertilizante orgânico associada ao plantio direto no aumento do C do solo não foi observado no período de avaliação, sendo necessário futuras avaliações.

6.6. REFERÊNCIAS

AITA, C. et al. Decomposição de palha de aveia preta e dejetos de suínos em solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 149–161, 2006.

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B.V.; BAYER, C. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 679-686, 1999.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 189-197, 2001.

ANDRADE, A. P. Estoque e frações de carbono e atributos físicos em Nitossolo Vermelho relacionados à aplicação de esterco em sistemas de produção. 2013. 86 f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, 2013.

BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2174–2181, 2010

BARTHEL, L. Lagoas de alta taxa, maturação e aguapés em sistema de tratamento de dejetos suínos: avaliação de desempenho e dinâmica planctônica. 2007. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C.E. C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J.A.; NICOLOSO, R. S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na Agricultura Conservacionista. **Tópicos Ci. Solo**, v. 7, p. 55-118, 2011

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

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

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

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo – ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. Ed. Porto Alegre: Metrópole, p. 7-18, 2008.

BEARE, M. H.; CABRERA, M. L.; HENDRIX, P. F.; COLEMAN, D.C. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 3, p. 787-795, 1994.

BENITES, V.M.; CORREA, J.C.; MENEZES, J.F.S.; POLIDORO, J.C; CAMPOS, D.V.B. Production of granulated organomineral fertilizer from pig slurry and poultry litter in Brazil. Congress, Anais, 15th World Fertilizer Congress of the International Scientific Centre For Fertilizers (Ciec), 2010.

BERTOL, I.; MELLO, E. L.; GUADAGNIN, J. C.; ZAPAROLLI, A. L. V.; CARRAFA, M. R. Nutrients losses by water erosion. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 581-586, 2003.

DE OLIVEIRA FERREIRA, A. et al. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of The Total Environment**, v. 621, p. 1559–1567, 15 abr. 2018.

DERRIEN, D. et al. Current controversies on mechanisms controlling soil carbon storage: implications for interactions with practitioners and policy-makers. A review. **Agronomy for Sustainable Development 2023 43:1**, v. 43, n. 1, p. 1–28, 6 fev. 2023.

ERCOLE, T. M. et al. Aggregation Stability and Carbon Pools in Extremely Kaolinitic Soils from the East Coast of Brazil as Affected by Land Use Changes. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1204, 9 jan. 2023.

GULDE, S. et al. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 3, p. 605–612, 2008.

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

KING, A. E. et al. Quantifying the relationships between soil fraction mass, fraction carbon, and total soil carbon to assess mechanisms of physical protection. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 135, p. 95–107, 1 ago. 2019.

NICOLOSO, R. S. et al. Carbon saturation and translocation in a no-till soil under organic amendments. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 264, n. May, p. 73–84, 2018.

SCHWEIZER, S. A. et al. Soil microaggregate size composition and organic matter distribution as affected by clay content. 2019.

SINGH, P.; NAZIR, G.; DHERI, G. S. Influence of different management practices on carbon sequestration of agricultural soils – a review.

<https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2158326>, 2022.

SIX, J. et al. Aggregation and Soil Organic Matter Accumulation in Cultivated and Native Grassland Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 5, p. 1367–1377, 1998.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research**, v. 79, p. 7–31, 2004.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, 2000.

VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 139–146, 1 jul. 2019.

WUADEN, C. R. et al. Early adoption of no-till mitigates soil organic carbon and nitrogen losses due to land use change. **Soil and Tillage Research**, v. 204, n. June, p. 104728, 2020.

7. CAPÍTULO 3: MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DO CARBONO E NITROGÊNIO EM UM NITOSSOLO SOB SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E ADUBAÇÃO ORGÂNICA

7.1. INTRODUÇÃO

A emissão de gases do efeito estufa (GEE), notadamente o gás carbônico (CO₂) a partir de atividades antrópicas é a principal causa das mudanças no clima (IPCC,2014). Sendo assim, encontrar estratégias de mitigação a essas emissões é de fundamental importância. O solo tem um papel determinante na dinâmica desses gases, pois pode atuar como fonte ou dreno de GEE (LAL et al., 2018). Isso ocorre porque a matéria orgânica do solo (MOS) armazena carbono, porém quando é degradada, há a liberação de CO₂ para a atmosfera.

A formação da MOS e o grau em que é protegida da decomposição são processos importantes para determinar sua persistência no longo prazo (SIX et al., 2002). Entre as teorias que explicam a dinâmica desses processos, destaca-se a que foi proposta por Six e seus colaboradores (2002). Segundo esses autores, três mecanismos principais atuam na estabilização da MOS: proteção física, pela qual é protegida da decomposição por meio da agregação; interação físico-química, decorrente da associação com as partículas de silte e argila; e estabilização bioquímica, através da formação de compostos recalcitrantes (SIX et al., 2002).

Destaca-se que o fracionamento da MOS é importante para entender melhor os processos de sua decomposição e estabilização, pois o carbono (C) e o nitrogênio (N) contidos em diferentes frações no solo, apresentam tempos de rotatividade distintos. Além disso, mudanças no uso da terra, manejo do solo e aporte de fertilizantes podem ter efeitos diferentes nessas frações (TIEFENBACHER et al., 2021). Outros fatores também influenciam na dinâmica da MOS, como o clima, a quantidade e a qualidade do C aportado e a textura do solo (HADDIX et al., 2020).

O plantio direto (PD), por proporcionar uma mínima mobilização do solo e manter aporte contínuo de C na superfície do solo, pode aumentar a quantidade de agregados estáveis no solo, e conseqüente aumentar a proteção do C e N pelos agregados (SIX et al., 2002; GULDE et al., 2008; NICOLOSO et al., 2018). Assim, um dos mecanismos que mais contribui para o acúmulo de carbono orgânico total (COT) está relacionado ao não revolvimento do solo, porque reduz a decomposição da MOS e favorece a sua estabilização

pela formação de agregados maiores e mais estáveis (VEZZANI; MIELNICKZUK, 2011). O alto aporte de biomassa também se destaca como sendo fundamental para a acumulação de COT no solo.

A utilização de resíduos de animais, como a cama de aves (CAMA), a longo prazo, também favorecem o incremento de C, inclusive em frações estáveis da MOS (YANG et al., 2019). Isso ocorre especialmente pela proteção da MOS pelo acúmulo de C em complexos organominerais e pela oclusão de C em agregados (RODRIGUES, 2017).

A manutenção do PD e aporte contínuo de resíduos orgânicos ao solo favorece agregação e, conseqüentemente, a estabilização de C e N no solo pela proteção física da matéria orgânica nos agregados (SIX et al., 2002; BAYER et al., 2006; GULDE et al., 2008). A longo prazo, essa forma de manejo também pode promover significativo incremento dos estoques de C e N totais com reflexos positivos para a qualidade do solo e mitigação das mudanças climáticas (MAFRA et al., 2014; LAL et al., 2015; MINASNY et al., 2017; RODRIGUES, 2017).

A entrada de C nos sistemas agrícolas ocorre fundamentalmente pelos resíduos culturais e por fertilizantes orgânicos, sendo que a transformação do C dessas fontes em MOS é realizada principalmente pela ação de microrganismos decompositores (COTRUFO et al., 2013). Essa transformação também é influenciada pelo tamanho e localização do resíduo no solo, características físico-químicas do solo (textura, pH, porosidade, temperatura, umidade) e características bioquímica do material (FIERER et al., 2003, JOHNSON et al., 2007, COTRUFO et al., 2013, REDIN et al., 2014).

Os parâmetros que definem a qualidade do C aportado pelos resíduos são o teor de N (relação C/N), a fração solúvel e as concentrações de celulose, hemicelulose, lignina, lipídios e polifenóis. Resíduos com alto teor de N e ricos em fração solúvel são classificados como de alta fração lábil (PRESCOTT, 2010). Resíduos com menor relação C/N e menores concentrações de compostos, como lignina e taninos, são propensos a uma decomposição mais rápida, enquanto os com elevada relação C/N e altas concentrações desses compostos resistentes tendem a ter uma taxa de decomposição mais lenta, com baixa liberação de N mineral (POTTHAST et al., 2010; PUTTASO et al., 2011). Assim, resíduos com altas concentrações de lignina e de tanino, com alta recalitrância, podem incorporar maiores quantidade de C no solo através da estabilização bioquímica (STEVENSON, 1994).

Durante a decomposição, o que determina o destino do C é a interação de compostos orgânicos com a matriz mineral do solo, onde pode ser estabilizado no solo por mecanismos físicos, químicos e bioquímicos (SIX et al., 2002). Diversos estudos indicam que associação

mineral do C, é a forma mais eficaz de estabilização da MOS. Desta forma, a textura do solo influencia a estabilização do C através das forças das ligações organominerais que se estabelecem com os minerais de argila e, também, por propiciar a agregação do solo.

Os mecanismos de proteção física e química dos componentes orgânicos e minerais são controlados pela quantidade e qualidade das partículas de silte e argila (SIX et al., 2002; COTRUFO et al., 2013 VON LUTZOW et al., 2006). Solos com textura mais fina, ou seja, com teores maiores de argila, geralmente, possuem maior teor de C orgânico e N (CHIVENGE et al., 2011). Por outro lado, solos com maior fração de areia tendem a apresentar menor acúmulo de MOS, em função da menor proteção física e química desse componente (PUTASSO, 2011).

Entretanto, a contribuição dos diferentes processos de estabilização da MOS nos diferentes tipos de solos ainda não foi totalmente esclarecida. Além disso, outros fatores também podem influenciar a dinâmica da MOS, como cobertura vegetal, o clima local, os microrganismos presentes no solo, os tipos de solo e o uso do solo. Associada a esta variação, é importante considerar a grande diversidade de ecossistemas n, evidenciando a necessidade de estudos de longa duração em diversos locais, permitindo uma visão global mais acurada desta dinâmica.

Considerando a importância da estabilização da matéria orgânica do solo para retenção dos gases de efeito estufa e melhorar a qualidade do solo, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência de dois preparos do solo e três

tipos de adubações nos mecanismos de estabilização da matéria orgânica de um Nitossolo.

7.2. MATERIAL E MÉTODOS

7.2.1. Área experimental

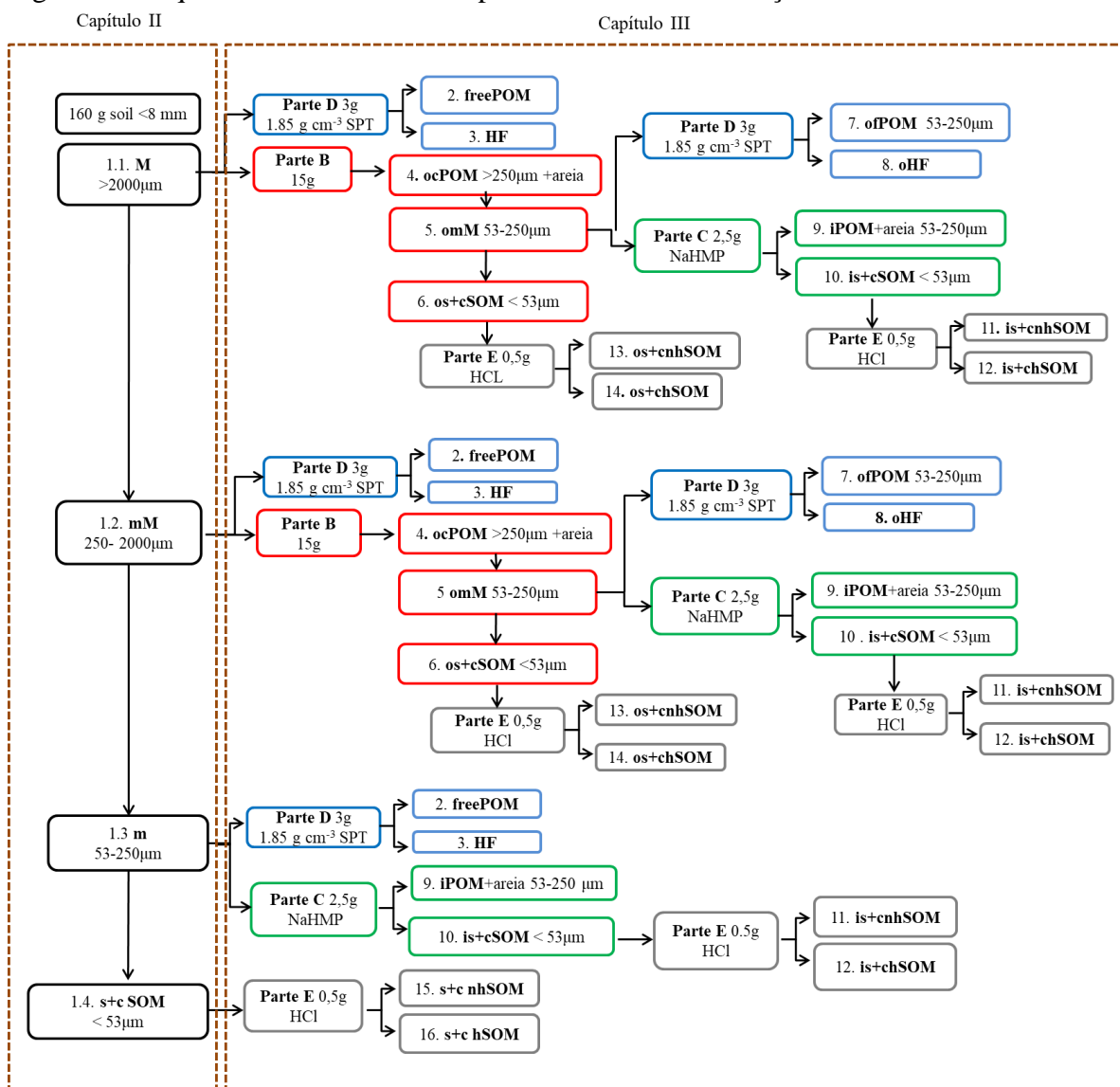
O estudo foi realizado no mesmo experimento descrito no capítulo I, no item 5.2.1, pg.22.

7.2.2. Amostragem e fracionamento do solo

A coleta de amostras indeformadas, na camada 0-5cm do solo, foram realizadas em agosto de 2020, nos tratamentos: preparo convencional: controle (PC CTR), mineral (PC NPK), e cama de aves (PC CAMA); e plantio direto: controle (PD CTR), mineral (PD NPK) e cama de aves (PD CAMA); além do campo natural (CN) como área de referência.

O fracionamento do solo foi realizado conforme a figura a seguir (Figura 12). A primeira etapa, o fracionamento dos agregados estáveis em água foi descrito no capítulo II, item 6.2.2., pg. 40.

Figura 12. Esquema de fracionamento para o isolamento de frações funcionais da MOS



M – macroagregado grande; **mM** = macroagregado pequeno; **m** = microagregado; **s+c** = silte + argila; **freePOM** = matéria orgânica particulada livre leve; **HF**= fração pesada; **ofPOM** = matéria orgânica particulada oclusa fina; **ocPOM** = matéria orgânica particulada grosseira ocluída; **omM** = microagregado dentro de macroagregados ocluso; **iPOM** = matéria orgânica particulada intramicroagregada; **os+cSOM** – silte+argila oclusos associados com a matéria orgânica do solo; **is+cSOM** = silte+argila intra-agregados associados com a matéria orgânica do solo; **s+cSOM** = silte+argila associada à matéria orgânica do solo; **s+cnhSOM** = silte não hidrolisável+argila associada à matéria orgânica do solo; **s+chSOM** = silte hidrolisável+argila associada à matéria orgânica do solo; **Cores** (etapas): Preto: fracionamento dos agregados estáveis em água (parte A); Vermelho: Isolamento de microagregados oclusos (Parte B); Azul: Isolamento das frações matéria orgânica particulada livre leve e matéria orgânica particulada oclusa fina (Parte D); Verde: Isolamento de matéria orgânica particulada intra-agregado associado a fração microagregada (parte C); Cinza: hidrólise ácida (parte E)

7.2.3. Isolamento de microagregados oclusos

Os microagregados oclusos, que estão dentro dos macroagregados grandes ($>2000 \mu\text{m}$) e dos macroagregados pequenos ($2000\text{-}250 \mu\text{m}$), foram isolados usando metodologia de Six et al. (2000). Para isso, tomou-se 10 g de subamostras de solo, oriundas do AEA, que foram colocadas sobre uma peneira de malha de $250 \mu\text{m}$. As amostras foram saturadas com água desionizada e rompidas manualmente até que todo o material $<250 \mu\text{m}$ fosse lavado em uma peneira de $53 \mu\text{m}$. O material que permaneceu no topo da peneira de $250 \mu\text{m}$ foi apenas areia e matéria orgânica particulada grossa oclusa (ocPOM). Na sequência, o material retido na parte superior da peneira de $53 \mu\text{m}$ foi peneirado por via úmida para separar os microagregados da fração silte mais argila, chamada de matéria orgânica oclusa associada ao silte + argila (os+cSOM). Todas as frações foram coletadas em uma bandeja de alumínio e secas no forno em 60°C . Desta etapa foram oriundas as frações ocPOM (>250), omM ($53\text{-}250$) e os+cSOM (<53).

7.2.4. Isolamento das frações matéria orgânica particulada livre leve (freePOM) e matéria orgânica particulada oclusa fina (ofPOM)

Para obter a fração freePOM foram utilizados cerca de 3g de subamostras das frações >2000 , $250\text{-}2000$, $53\text{-}250 \mu\text{m}$, oriundas do peneiramento úmido e para obter a fração ofPOM 3g de subamostras oriundas da fração microagregado ocluso ($53\text{-}250 \mu\text{m}$).

As amostras foram suspensas em 20mL de politungstato de sódio ($1,85 \text{ g cm}^{-3}$) em um tubo de plástico, agitando-se lentamente com a mão para misturar sem quebrar os agregados. Após, foram colocados sob vácuo de 10 minutos para retirar o ar aprisionado nos agregados. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas por 1 hora, a 20°C , a aproximadamente $1250 \times g$. O material suspenso foi aspirado para um filtro Whatman GC / B pré-pesado e enxaguado com água deionizada para remover o politungstato de sódio. Os filtros com as frações foram secos em estufa a 60°C , pesados e triturados para análise de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) (SIX et al., 1998).

Ao final desta etapa, temos as seguintes frações freePOM e fração pesada (HF) e a ofPOM e a HF.

7.2.5. Isolamento de matéria orgânica particulada (POM) intra-agregado associado a fração microagregada

Nesta etapa foram utilizados 3 g de microagregados (53-250 μm) ou microagregados oclusos, que foram isolados dos macroagregados. As amostras foram dispersas por agitação com 20 mL de hexametáfosfato de sódio a 5 g L⁻¹ por 18 h e passados por uma peneira de 53 μm . O material retido na peneira foi coletado, seco e pesado e consiste na fração intra-microagregada de matéria orgânica particulada fina mais areia (iPOM+areia). O material que passou pela peneira foi coletado em uma bandeja de alumínio, seco, pesado e consiste na fração silte mais argila intra-microagregada (is+cSOM) (SIX et al., 1998).

7.2.6. Hidrólise ácida

Para isolar as frações da matéria orgânica associada ao silte + argila, as frações silte+argila, silte+argila oclusos e silte+argila intra microagregados, foram submetidas à hidrólise ácida pelo método descrito por Plante et al., (2006). Para isso, foi utilizada uma alíquota de 0,3 g de amostra em 25 ml de HCl 6 M. Esta amostra foi submetida ao aquecimento com refluxo em bloco digestor a 95 ° C, durante 16 horas. Após, a suspensão foi filtrada e lavada com água desionizada sobre um filtro de fibra de vidro. O resíduo foi seco em estufa a 60 ° C e pesado. A hidrolisabilidade da amostra foi expressa como a porcentagem de C ou N não hidrolisável (% NHC ou NHN) e foi calculada usando a seguinte equação, que é responsável pela perda de massa da amostra durante a hidrólise e recuperação incompleta durante a filtração:

$$\%NHN = \frac{\left(\frac{g\ C,\ N}{kg\ amostra}\right)_{depois} \times \frac{massa\ depois}{massa_{depois}}}{\left(\frac{g\ C,\ N}{kg\ amostra}\right)_{antes}}$$

Onde os termos representam as concentrações e massas de C orgânico da amostra antes e depois da hidrólise ácida (PLANTE et al., 2006). As frações da matéria orgânica associada ao silte +argila foram identificadas como: silte+argila oclusos associados com a matéria orgânica do solo (os+cSOM); silte+argila intra-agregados associados com a matéria orgânica do solo (is+cSOM); silte+argila associada à matéria orgânica do solo (s+cSOM); silte não hidrolisável+argila associada à matéria orgânica do solo (s+cnhSOM); silte hidrolisável+argila associada à matéria orgânica do solo (s+chSOM);

7.2.7. Carbono e nitrogênio total

Para determinar o teor de C e N de cada fração isolada, aproximadamente 1g de amostra foi finamente moída com gral de ágata e posteriormente analisadas por combustão a seco usando um analisador elementar C/N.

7.2.8. Análise estatística

A análise de variância foi realizada usando SAS para avaliar as diferenças entre os tratamentos. Os resultados foram considerados estatisticamente significativos em $P < 0,05$, a menos que indicado de outra forma. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

7.3. RESULTADOS

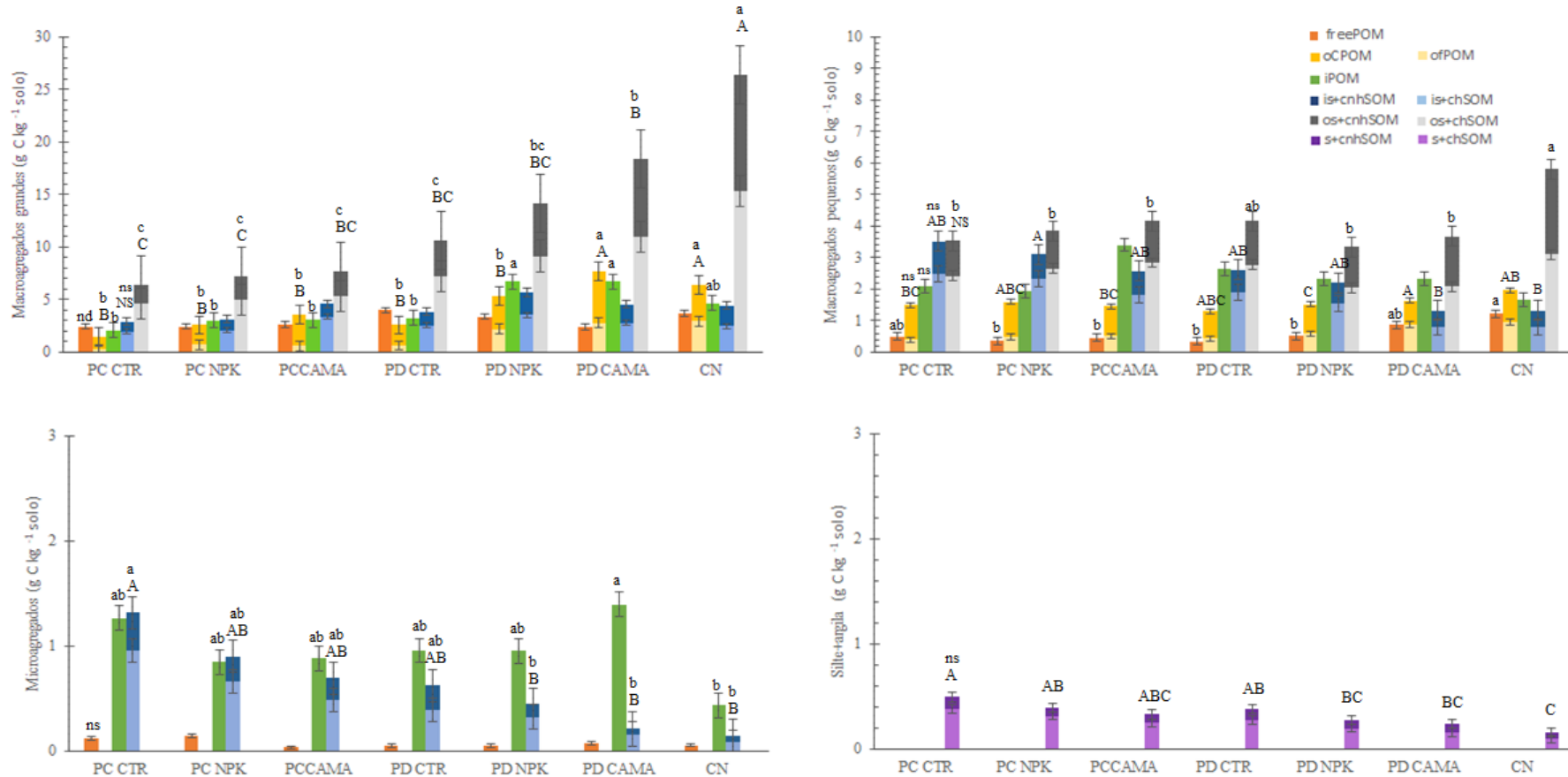
A figura 13 mostra o conteúdo de C de cada fração da matéria orgânica nas quatro classes de tamanho de agregados isoladas (>2000 , 250-2000, 53-250 e $<53 \mu\text{m}$). Na classe macroagregados grandes (>2000), nas frações ocPOM, ofPOM e iPOM intra, a menor intensidade do preparo do solo sob PD, associado a adubação orgânica (PD CAMA) aumentou significativamente o teor de C ficando equivalente ao CN, sendo superior aos demais tratamentos. Contudo, nas frações silte+argila ocluso, tanto hidrolizados com não hidrolizados, o teor de C foi maior no campo natural, seguido do PD CAMA, seguido dos outros tratamentos. Nas frações freePOM, silte+argila intra hidrolisado e não hidrolisado não foi observado diferença significativas.

Quanto ao conteúdo de C na classe magroagregado pequeno (250-2000), não foi observada diferença significativa nas frações ocPOM, iPOM, silte+argila intra não hidrolizado e silte+argila ocluso hidrolisado (Figura 13). No freePOM o CN teve os maiores teores de C em comparação ao PD NPK, PD CTR, PC CAMA e PC NPK. A fração ofPOM o maior teor foi observado em PD CAMA, e mais baixo em PD NPK, os outros tratamentos não tiveram muita diferença em si.

Na classe microagregado (53-250), o teor de C não teve variação na fração freePOM. Na iPOM o teor de C foi maior no PD CAMA e menor no CN. Os outros tratamentos não diferiram entre si (Figura 13). Já na classe silte+argila, os maiores teores de C, na fração hidrolisável foram observados no PC CTR e os mais baixos no CN. A fração não hidrolisável não teve diferença entre os tratamentos.

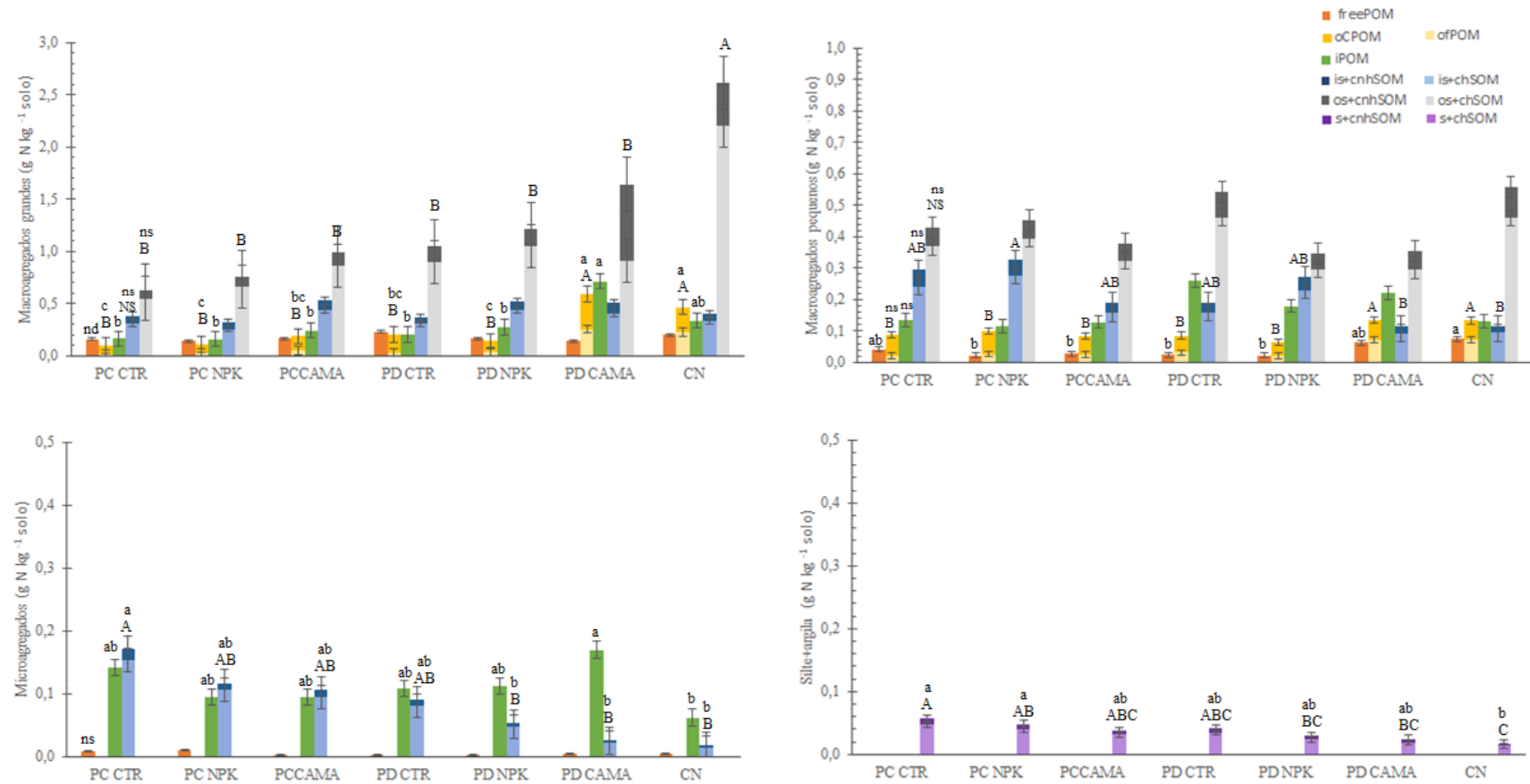
Na figura 14 são apresentados os teores de NT, nas 4 classes dos agregados estáveis em água (AEA) (>2000, 250-2000, 53-250 e <53 μm). Esse elemento seguiu o mesmo comportamento que o C, porém em proporções menores. Os maiores teores de N foram observados nos macroagregados grandes. Nesta classe (>2000), as frações ocPOM e ofPOM foram maiores no PD CAMA e no CN. Contudo, a fração iPOM foi maior em PD CAMA e a fração os+chSOM foi maior no CN. Nos macroagregados pequenos, foram observadas diferenças estatísticas apenas nas frações freePOM, ofPOM e is+chSOM. Onde os maiores teores de N foram observados em CN, CN e PD CAMA e PC NPK, respectivamente. Nos microagregados (53-250), na fração iPOM o PD CAMA foi significativamente superior ao CN, e não diferiu dos demais. Entretanto, nas frações is+chSOM e is+cnhSOM os maiores teores de N foram observados no PC CTR, que foi superior ao PD NPK, PD CAMA e ao CN. Resultado semelhante foi observado na classe silte+argila (<53).

Figura 13. Conteúdo de C nas diferentes frações, em cada classe de agregado estável em água (>2000, 250-2000, 53-250, <53) na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e nove anos contínuos de cultivos com milho e aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sem adubação (CTR) e adubados com fertilizante mineral e orgânico.



PC: preparo convencional, PD: plantio direto, CTR: controle, NPK: adubação mineral, CAMA: cama de aves; **freePOM**: matéria orgânica particulada livre leve; **ofPOM**: matéria orgânica particulada oclusa fina; **ocPOM**: matéria orgânica particulada grosseira ocluída; **iPOM**: matéria orgânica particulada intramicroagregada; **os+cSOM**: silte+argila oclusos associados com a matéria orgânica do solo; **is+cSOM**: silte+argila intra-agregados associados com a matéria orgânica do solo; **s+cSOM**: silte+argila associada à matéria orgânica do solo; **s+cnhSOM**: silte+argila não hidrolisável associada à matéria orgânica do solo; **s+chSOM**: silte hidrolisável+argila associada à matéria orgânica do solo. * Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nos diferentes tratamentos, pelo teste de Tukey (<0.05).

Figura 14. Conteúdo de N nas diferentes frações, em cada classe de agregado estável em água (>2000, 250-2000, 53-250, <53) na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e nove anos contínuos de cultivos com milho e aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sem adubação (CTR) e adubados com fertilizante mineral e orgânico.



PC: preparo convencional, PD: plantio direto, CTR: controle, NPK: adubação mineral, CAMA: cama de aves; **freePOM**: matéria orgânica particulada livre leve; **ofPOM**: matéria orgânica particulada oclusa fina; **ocPOM**: matéria orgânica particulada grosseira ocluída; **iPOM**: matéria orgânica particulada intramicroagregada; **os+cSOM**: silte+argila oclusos associados com a matéria orgânica do solo; **is+cSOM**: silte+argila intra-agregados associados com a matéria orgânica do solo; **s+cSOM**: silte+argila associada à matéria orgânica do solo; **s+cnhSOM**: silte+argila não hidrolisável associada à matéria orgânica do solo; **s+chSOM**: silte hidrolisável+argila associada à matéria orgânica do solo. * Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nos diferentes tratamentos, pelo teste de Tukey (<0.05).

Avaliando a distribuição de C nas diferentes frações da matéria orgânica do solo, nos fatores combinados, preparo do solo e adubações, não houve diferenças nas frações freePOM, s+chSOM e is+c nhSOM (Tabela 6). De maneira geral, os maiores teores de C foram observados nos tratamentos PD CAMA, CN e PD.

Observando a distribuição do C nas frações da matéria orgânica mais lábil (oCPOM + ofPOM), os maiores teores estão no PD CAMA que foi semelhante ao CN, e superior aos demais, contudo o CN se equiparou com o PC CAMA e o PD CTR. Ao observar os fatores isoladamente, CN e CAMA foram iguais entre si e superiores ao CTR e ao NPK. Além disso, CN também foi semelhante ao PD, e esses resultaram em teores mais altos de C do que no PC.

Já a matéria orgânica particulada intra microagregada (iPOM) o PD CAMA foi superior a PC CTR e PC NPK, mas não diferiu do restante dos tratamentos, que foram semelhantes entre si.

Na fração silte+argila hidrolisável, as maiores concentrações de C foram observadas no PC CTR, que foi superior ao CN, PD NPK e PD CAMA. Dentro dos fertilizantes, o CTR e o NPK foram superiores ao CN, e CAMA foi semelhante a ambos. Já no preparo do solo, PC estocou mais C nesta fração quando comparado com o PD e o CN.

Na fração silte+argila intra microagregado hidrolisável (is+chSOM) o teor de C foi maior no PD NPK em relação ao CN, e o restante dos tratamentos foram semelhantes entre si. Isoladamente, observando o efeito principal de adubações, o NPK apresentou os maiores teores de C comparando com o CN, e não diferiu do CTR e da CAMA. Já em relação ao preparo do solo, a maior concentração de C foi observada no PC, que diferiu do PD e do CN.

Entretanto, nas frações silte+argila ocluso hidrolisado (os+chSOM) e não hidrolisado (os+cnhSOM), os maiores teores de C foram observados no CN, que diferiu dos outros tratamentos. Além disso, PD CAMA foi inferior ao CN, mas superior aos demais tratamentos. Ao observar os fatores individualmente, quanto às adubações, o CN foi superior aos demais tratamentos que não diferiam entre si. Já, em relação ao preparo do solo o CN também teve os maiores teores de C em relação ao PD e ao PC. Contudo, o PD foi inferior ao CN, mas foi superior ao PC.

Na soma de todas as frações da MOS o CN e a PD CAMA foram superiores aos demais. Quanto ao efeito da adubação, o CN foi superior ao CTR e ao NPK, sendo equivalente a CAMA, porém a CAMA não diferiu dos demais tratamentos. Em relação ao efeito do preparo do solo CN e PD foram iguais e superiores ao PC.

Tabela 6. Distribuição dos teores de C nas diferentes frações da matéria orgânica do solo na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e após nove anos contínuos de cultivos com milho e aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) e adubados com fertilizantes mineral (NPK e orgânico (CAMA)).

Frações	Free POM	oCPOM +ofPOM	iPOM	s+cnh SOM	s+ch SOM	is+cnh SOM	is+ch SOM	os+cnh SOM	os+ch SOM	soma
PC CTR	3,60	3,01 c	5,72 b	0,11	0,38 a	2,41	5,56 ab	2,72 c	6,49 d	30,02 b
PC NPK	2,95	3,51 c	5,13 b	0,08	0,31 ab	2,02	5,17 ab	3,21 c	7,58 cd	29,96 b
PCCAMA	3,33	4,65 bc	6,4 ab	0,08	0,24 abc	2,28	5,74 ab	3,92 c	8,53 cd	35,2 b
PD CTR	4,46	4,57 bc	7,5 ab	0,10	0,27 ab	2,08	4,22 ab	4,87 c	10,05 bc	38,14 b
PD NPK	3,26	3,55 c	6,99 ab	0,07	0,19 bc	2,61	5,88 a	4,72 c	9,6 bcd	36,89 b
PD CAMA	3,52	11,49 a	13,99 a	0,08	0,16 bc	2,91	4,27 ab	7,87 b	12,32 b	56,61 a
CN	4,71	8,46 ab	6,57 ab	0,05	0,09 c	2,32	3,12 b	13,83 a	17,96 a	57,15 a
CTR	4,03	3,79 b	6,62	0,11 a	0,33 a	2,25	4,89 ab	3,8 b	8,27 b	34,08 b
NPK	3,11	3,53 b	6,07	0,08 ab	0,25 a	2,31	5,53 a	3,96 b	8,59 b	33,43 b
CAMA	3,43	8,08 a	10,20	0,08 ab	0,2 ab	2,59	5,01 ab	5,89 b	10,42 b	45,91 ab
CN	4,71	8,47 a	6,58	0,05 b	0,09 b	2,32	3,12 b	13,83 a	17,96 a	57,15 a
PC	3,29	3,73 b	5,75	0,09	0,31 a	2,24	5,49 a	3,28 c	7,52 c	31,72 b
PD	3,75	6,54 a	9,50	0,08	0,21 b	2,53	4,79 a	5,82 b	10,65 b	43,88 a
CN	4,71	8,47 a	6,58	0,05	0,09 b	2,32	3,12 b	13,83 a	17,96 a	57,15 a

PC= preparo convencional, PD= plantio direto, CTR = controle, NPK = adubação mineral, CAMA cama de aves; **freePOM** = matéria orgânica particulada livre leve; **ofPOM** = matéria orgânica particulada oclusa fina; **ocPOM** = matéria orgânica particulada grosseira ocluída; **omM** = microagregado dentro de macroagregados ocluso; **iPOM** = matéria orgânica particulada intramicroagregada; **os+cSOM** – silte+argila oclusos associados com a matéria orgânica do solo; **is+cSOM** – silte+argila intra=agregados associados com a matéria orgânica do solo; **s+cSOM** = silte+argila associada à matéria orgânica do solo; **s+cnhSOM** – silte+argila não hidrolisável associada à matéria orgânica do solo; **s+chSOM** = silte hidrolisável+argila associada à matéria orgânica do solo; * Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Na distribuição do N nas diferentes frações da MOS (Tabela 7) não foi observado diferença entre tratamentos na matéria orgânica particulada livre leve (FreePOM).

Na soma das frações oCPOM+ofPOM o PD CAMA e o CN foram os tratamentos onde foram observados os maiores teores de N, quando comparado com os demais tratamentos. As avaliar individualmente o fator adubação, CN e CAMA foram superiores ao NPK e ao CTR. Já, em relação ao preparo do solo o CN teve mais que o dobro dos teores observado no PC. Já o PD teve um teor intermediário, sendo semelhante ao PC e ao CN.

Na matéria orgânica particulada intra microagregada (iPOM) o PD CAMA foi melhor que PC CTR, PC NPK, e PC CAMA, contudo não diferiu do CN, PD CTR e PD

NPK. Individualmente, apenas no fator preparo do solo foi observado diferença, onde o PD foi superior ao PC, e não diferiu do CN.

Na fração silte+argila não hidrolisável os maiores teores de N foram observados nos tratamentos PC CTR e PC NPK, sendo superiores ao CN, porém não diferiram dos demais tratamentos. Dentro dos fertilizantes, CTR, NPK e CAMA tiveram os melhores resultados em comparação com o CN e em relação ao preparo do solo, o PC foi superior em relação aos demais. Já, na fração silte+argila hidrolisável PC CTR foi superior ao PD NPK, PC CAMA e CN, e não diferiu de PC NPK, PC CAMA e PD CTR. Entre as adubações, no CTR foi observado os maiores teores de N que diferiu da CAMA e do CN, contudo NPK foi semelhante a ambos. No preparo, PC foi superior ao PD e ao CN.

As frações silte+argila intra microagregado não hidrolizável (is+cnhSOM) e hidrolisável (is+chSOM) apresentaram diferença apenas no fator preparado do solo, onde no PC foi observado os maiores teores de N, que diferiram de CN. Contudo PD foi semelhante a ambos. Nas frações silte+argila ocluso não hidrolizável (os+cnhSOM) e hidrolisável (os+chSOM) não foi observado diferença entre tratamentos.

A soma das frações na distribuição de N teve comportamento semelhante ao observado no C. Onde, o CN e a PD CAMA foram superiores aos demais. Entre as adubações, o CN foi superior ao CTR e ao NPK, sendo equivalente a CAMA, porém a CAMA não diferiu dos demais tratamentos. Quanto ao efeito do preparo do solo CN e PD foram superiores ao PC, porém o PD foi inferior ao CN.

Para discriminar a participação de cada mecanismo de estabilização do C e do N no solo, as frações da matéria orgânica foram agrupadas de acordo com sua estabilidade e mecanismo envolvido na estabilização.

A fração matéria orgânica particulada livre leve (FreePOM) foi considerada desprotegida. As frações matéria orgânica particulada oclusa fina (ofPOM) e matéria orgânica particulada grosseira oclusa (ocPOM) foram consideradas fisicamente protegidas a curto prazo, pois são protegidas apenas por agregação, nos macroagregados (>2000 e de 250-2000) que possuem uma rotatividade mais rápida no solo e são mais vulneráveis ao preparo do solo (SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 2000). A fração matéria orgânica particulada intramicroagregada (iPOM) que foi protegida por microagregados (occlusos ou não em agregados maiores) foi considerada fisicamente protegida a longo prazo, uma vez que esses agregados são menos vulneráveis ao preparo do solo e têm uma renovação mais lenta no solo (DENEFF et al., 2004). As frações silte+argila associadas à matéria orgânica hidrolisável foram consideradas protegidas pela interação organomineral com a matriz do solo e as

frações silte+argila associadas à matéria orgânica não hidrolisável foram consideradas bioquimicamente estabilizadas (PLANTE et al., 2006).

Tabela 7. Distribuição de teores de N nas diferentes frações da matéria orgânica do solo na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e nove anos contínuos de cultivos com milho e aveia sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) sem adubação (CTR) e adubados com fertilizantes mineral (NPK) e orgânico (CAMA).

Frações	Free POM	oCPOM+ ofPOM	iPOM	s+cnh SOM	s+ch SOM	is+cnh SOM	is+ch SOM	os+cnh SOM	os+ch SOM	soma
----- g/kg -----										
PC CTR	0,212	0,186 b	0,442 b	0,011 a	0,047 a	0,144	0,707	0,131	0,92 b	2,801 b
PC NPK	0,17	0,208 b	0,371 b	0,009 a	0,039 ab	0,12	0,64	0,15	1,059 b	2,769 b
PCCAMA	0,20	0,272 b	0,468 b	0,007 ab	0,031 abc	0,13	0,69	0,18	1,185 b	3,164 b
PD CTR	0,26	0,288 b	0,574 ab	0,007 ab	0,035 abc	0,11	0,55	0,24	1,357 b	3,406 b
PD NPK	0,189	0,206 b	0,565 ab	0,005 ab	0,024 cb	0,14	0,72	0,21	1,342 b	3,399 b
PD CAMA	0,21	0,726 a	1,107 a	0,006 ab	0,018 bc	0,13	0,52	0,80	1,393 b	4,909 a
CN	0,28	0,598 a	0,53 ab	0,004 b	0,013 c	0,09	0,44	0,51	2,667 a	5,133 a
CTR	0,24	0,237 b	0,51	0,009 a	0,041 a	0,13	0,63	0,18	1,139 b	3,104 bc
NPK	0,18	0,207 b	0,47	0,007 a	0,032 ab	0,13	0,68	0,18	1,201 b	3,085 bc
CAMA	0,20	0,499 a	0,79	0,006 a	0,025 b	0,13	0,61	0,49	1,288 b	4,037 ab
CN	0,28	0,598 a	0,53	0,004 b	0,014 b	0,09	0,44	0,51	2,667 a	5,133 a
PC	0,19	0,222 b	0,427 b	0,008 a	0,039 a	0,132 a	0,679 a	0,16	1,057 c	2,912 c
PD	0,22	0,407 ab	0,749 a	0,006 b	0,026 b	0,124 ab	0,593 ab	0,42	1,365 b	3,905 b
CN	0,28	0,598 a	0,53 ab	0,004 b	0,014 b	0,092 b	0,444 b	0,51	2,667 a	5,133 a

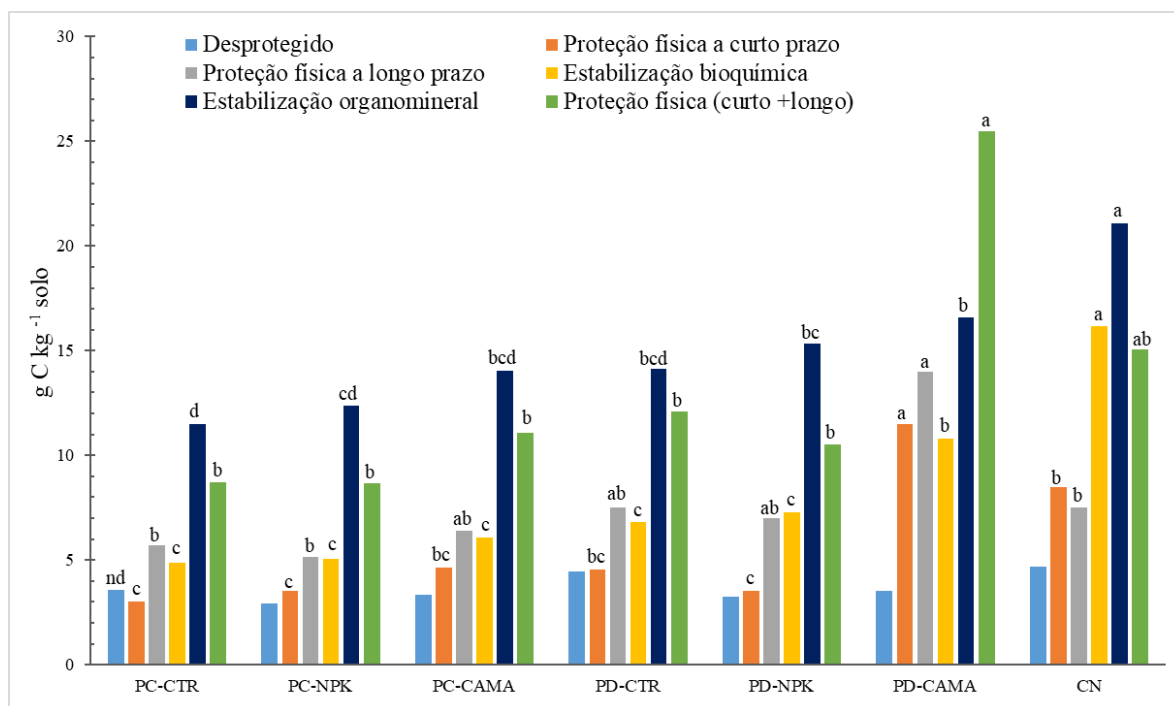
PC= preparo convencional, PD= plantio direto, CTR = controle, NPK = adubação mineral, CAMA = cama de aves; **freePOM** = matéria orgânica particulada livre leve; **ofPOM** = matéria orgânica particulada oclusa fina; **ocPOM** = matéria orgânica particulada grosseira ocluída; **iPOM** = matéria orgânica particulada intra microagregada; **os+cSOM** – silte+argila oclusos associados com a matéria orgânica do solo; **is+cSOM** – silte+argila intra=agregados associados com a matéria orgânica do solo; **s+cSOM** = silte+argila associada à matéria orgânica do solo; **s+cnhSOM** – silte não hidrolisável+argila associada à matéria orgânica do solo; **s+chSOM** = silte +argila hidrolisável associada à matéria orgânica do solo; * Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Na distribuição do C em compartimento da MOS com mecanismos distintos de estabilização (Figura 15) não houve diferença entre os tratamentos na fração desprotegida. Contudo, considerando a proteção física de curto prazo e longo prazo, os maiores teores de C foram observados no PD CAMA, que diferiram significativamente dos demais, efeito que também foi observado na soma dos dois compartimentos (curto e longo prazo). Já na estabilização bioquímica, o campo natural foi superior, sendo 1/3 maior que o PD CAMA e o dobro que os demais tratamentos. O campo natural também teve os maiores teores de C

relacionado com a estabilização organomineral. De maneira geral, a maior parte do C foi observado relacionado com a estabilização organomineral e a proteção física.

Figura 15. Distribuição do C em compartimentos da MOS com mecanismos distintos de estabilização, na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e após nove anos de cultivos com milho e aveia, sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), sem adubação (CTR) e adubados com fertilizantes mineral (NPK) e orgânico (CAMA).

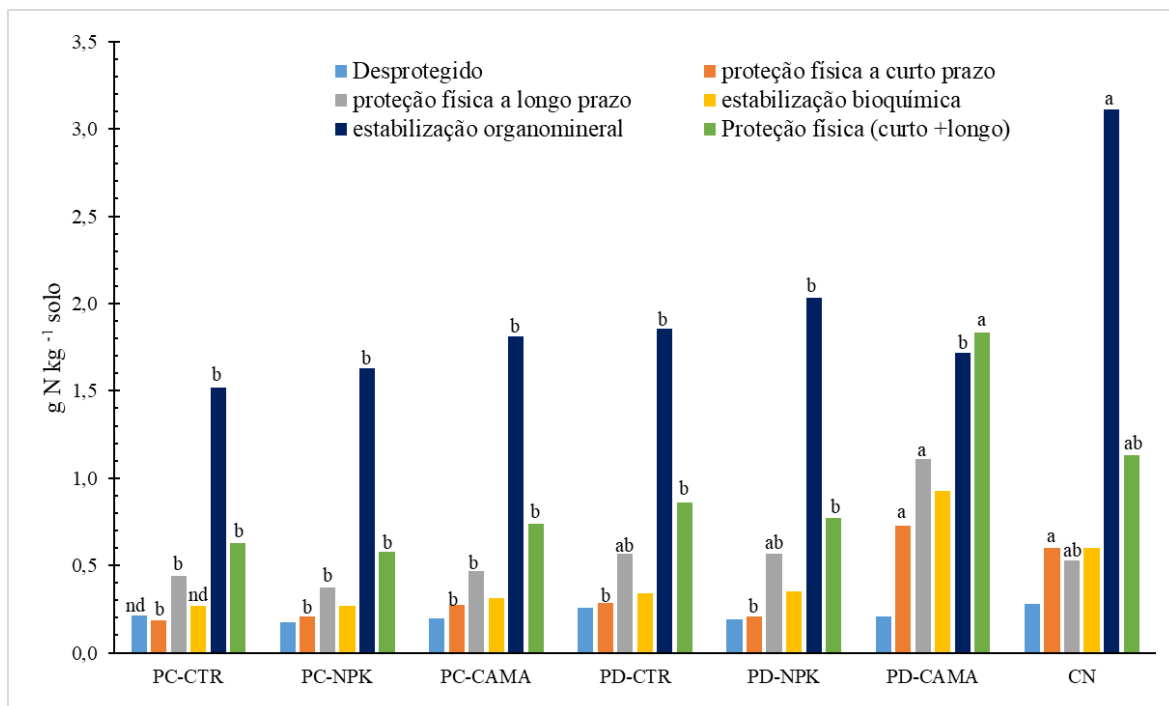


PC= preparo convencional, PD= plantio direto, CTR = controle, NPK = adubação mineral, CAMA = cama de aves; * Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, nos diferentes tratamentos, pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

Na distribuição do N nos compartimentos da MOS com mecanismos distintos de estabilização (Figura 16) não houve diferença entre os tratamentos nas frações desprotegido e estabilização bioquímica. Os maiores teores de N protegidos fisicamente a curto prazo foram observados no PD CAMA e no CN, que foram superiores aos demais tratamentos. A proteção física a longo também foi significativamente superior no PD CAMA em relação a todos os tratamentos do PC e a proteção física somada seguiu a mesma tendência. Contudo, o N relacionado com a estabilização organomineral foi maior no CN.

Figura 16. Distribuição do N em compartimentos da MOS com mecanismos distintos de estabilização, na camada 0-5cm de um Nitossolo do Sul do Brasil, sob campo natural (CN) e após nove anos de cultivos contínuos de milho e aveis, sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), sem adubação (CTR) e adubados com fertilizantes mineral (NPK) e orgânico (CAMA).



PC= preparo convencional, PD= plantio direto, CTR = controle, NPK = adubação mineral, CAMA = cama de aves; * Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, minúscula está comparando o efeito do tratamento (preparo+adubação), pelo teste de Tukey (<0.05).

Fonte: elaborado pela autora, 2023.

7.4. DISCUSSÃO

O aumento dos teores de C e N na fração s+c ocluso no PD CAMA pode estar relacionado com a maior formação de macroagregados e maior aporte de MO desse tratamento. Essa proteção física também preservou frações mais lábeis, como o ocPOM, ofPOM e o iPOM. Estudos indicam que as interações entre matéria orgânica particulada e as frações silte+argila são altamente relevantes para a persistência de MO (WITZGALL et al., 2021). Vale destacar que essas reações são favorecidas pela proteção física conferida pelos macroagregados do solo (SIX; PAUSTIAN, 2014).

Em um experimento de incubação de solo artificial, a entrada de matéria orgânica (ocPOM e iPOM) promoveu predominantemente a formação de macroagregados grandes ricos em C. A matéria orgânica particulada favoreceu o crescimento de fungos, cujas hifas enredaram e estabilizam macroagregados (BUCKA et al., 2021). Os agregados de diferentes

tamanhos fornecem diferentes habitats para os microrganismos do solo. Em geral, os macroagregados contêm relativamente mais substratos frescos de serapilheira, em comparação com a fração do tamanho de silte e argila que contém compostos derivados de plantas altamente decompostos e detritos microbianos. Isso sugere que os macroagregados podem selecionar diferentes táxons microbianos (HOWE; SMITH, 2021), que provavelmente contribuem de forma diferente com os mecanismos estabilização da MO.

As superfícies da matéria orgânica particulada não são apenas pontos críticos para a atividade microbiana, mas também para a oclusão e formação de MO derivada de serapilheira associada a minerais, independentemente da textura do solo, contribuem com a regulação da persistência de MOS (WITZGALL et al., 2021). De acordo com Cotrufo et al. (2013) os constituintes vegetais lábeis são utilizados de forma mais eficiente pelos microrganismos. Esses produtos microbianos de decomposição são precursores da MOS estável, pois promovem a agregação e uma forte ligação química à matriz mineral do solo.

No CN, como esse processo já ocorre a mais tempo, os maiores teores de C já são observados na fração s+c oclusa. Além disso, em solos não perturbados, como em regiões de vegetação nativa, há um equilíbrio entre as entradas de material orgânico e as perdas de C, promovendo uma maior estabilidade deste elemento (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

Observando os mecanismos de estabilização, o uso de CAMA associado ao PD favoreceu a proteção física, a estabilização organomineral e bioquímica em relação aos tratamentos com o PC, contribuindo com acúmulo de C e N em um Nitossolo do sul do Brasil. Desta forma é possível afirmar que a adoção de práticas conservacionista de manejo do solo, como o PD, são importantes para a manutenção do C e do N no solo, pois o não revolvimento do solo evita a destruição dos agregados (TAN et al., 2007). Além disso, frações granulométricas do solo mais finas (s+c) protegem a MOS em virtude de suas superfícies reativas, conferindo uma proteção pela interação organomineral. Já as frações silte e argila que resistem à dispersão por métodos mais rigorosos, podem conter MOS altamente protegida e, portanto, altamente resistente, devido à proteção bioquímica (PLANTE et al., 2006). A oclusão de C e a associação organomineral são consideradas os principais mecanismos de estabilização de C e N em solos tropicais e subtropicais (CONCEIÇÃO et al., 2013 ; DENEFF et al., 2007 ; ZOTARELLI et al., 2007).

Os macroagregados grandes possuem uma rotatividade mais rápida, onde a proteção física do C e no N é mais dinâmica (GULDE et al., 2008; PENG et al., 2017). Entretanto, a proteção física (curta e longo prazo) também contribui para a estabilização organomineral e estabilização bioquímica da MOS. Estudos recentes indicam que a proteção mineral pode

estabilizar tanto compostos lábeis como recalcitrantes, sendo que qualquer um deles pode se tornar estabilizado por partículas de argila e persistir no solo. A quantidade e a diversidade dos compostos orgânicos no solo evoluem com o tempo, e a sua permanência vai depender da força de ligação que aumenta com o tempo quando o C e o N são protegidos (HEMINGWAY et al., 2019). Portanto, formas de manejo do solo e adubação que, de um lado, aportem maiores quantidades de C e, de outro, inibam a degradação da MOS, são indicadas para se elevar os estoques de C e N no solo. Assim, o manejo e a adubação adequadas do solo, contribuem para a mitigação dos GEE. Além disso, o aumento da MOS melhora as condições gerais do solo, contribuindo para a produção sustentável de alimentos (HADDIX et al., 2020).

A adoção de PD é uma estratégia eficaz para aumentar o armazenamento de C, especialmente nas frações lábeis, como nas formas orgânicas particuladas grossa, leve e intra-microagregada. O aumento no armazenamento de C lábel sob PD é atribuído a alta proteção física conferida por macroagregados nessas frações (SIX; PAUSTIAN, 2014). Além disso, a alta proteção física em solos sob PD contínuo pode permitir tempo suficiente para fortalecer a interação das frações de C com as superfícies das partículas minerais. Assim, esses processos em conjunto contribuem decisivamente para a estabilização e acúmulo de carbono orgânico no solo, assim como, para aumentar a saturação efetiva desse componente em solos altamente intemperizados (BRIEDIS et al., 2018).

Destaca-se que o fracionamento do MOS é importante para entender melhor os processos de decomposição e estabilização, pois o C pode estar localizado em diferentes frações, com tempos de rotatividade distintos. Além disso, mudanças no uso da terra, manejo agrícola, aporte de fertilizantes podem ter efeitos diferentes nessas frações (TIEFENBACHER et al., 2021).

7.5. CONCLUSÃO

O plantio direto, associado a adubação com cama de aves aumenta a proteção física do C em grau igual ou, até mesmo, superior ao que ocorre no campo natural. Entretanto, a estabilização bioquímica e organomineral é maior em solo sem qualquer preparo, como no campo natural.

A adubação com cama de aves, associada ao plantio direto promove maiores acúmulos de C e N no solo quando comparado com o PC, e com o fertilizante mineral, confirmando a hipótese inicial desse estudo de que a maior proteção física da matéria

orgânica do solo sob plantio direto e uso contínuo de adubação orgânica aumenta a proteção do C e nitrogênio do solo, principalmente pela interação físico-química com as frações silte e argila, quando comparados ao preparo convencional e adubação mineral;

7.6. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. I. de; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, T. S. de; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO FILHO, J. A. de. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v. 37, n.3, p270-278, 2006.
- BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C.E. C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J.A.; NICOLOSO, R. S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na Agricultura Conservacionista. **Tópicos Ci. Solo**, v. 7, p. 55-118, 2011
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK J.; PAVINATO, A.; DIECKOW J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, v.86, p. 237-245, 2006.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C. N. & SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical No-Till cropping systems. **Soil Science Society of American Journal**, v. 65, p. 1473-1478. 2001.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.54, p. 101-109, 2000.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo – ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. Ed. Porto Alegre: Metrópole, p. 7-18, 2008.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. E A. Manual De Métodos. In: MAPA/SDA/CGAL (Ed.). Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. Brasília: MAPA/SDA/CGAL, 2014. p. 1–220.
- BRIEDIS, C. et al. How does no-till deliver carbon stabilization and saturation in highly weathered soils? *Catena*, v. 163, n. December 2017, p. 13–23, 2018.
- BUCKA, F. B. et al. Disentangling the effects of OM quality and soil texture on microbially mediated structure formation in artificial model soils. *Geoderma*, v. 403, p. 115213, 1 dez. 2021.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1 maio 1992.
- COTRUFO, M. F. et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience* 2019 12:12, v. 12, n. 12, p. 989–994, 18 nov. 2019.
- DENEF, K. et al. Carbon Sequestration in Microaggregates of No-Tillage Soils with Different Clay Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, n. 6, p. 1935–1944, 1 nov. 2004.
- EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2a ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 26

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3a ed. Brasília: [s.n.].

HADDIX, M. L. et al. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, v. 363, n. October 2019, p. 114160, 2020.

HEMINGWAY, J. D. et al. Mineral protection regulates long-term global preservation of natural organic carbon. *Nature* 2019 570:7760, v. 570, n. 7760, p. 228–231, 12 jun. 2019.

LAL, R. et al. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 73, n. 6, p. 145A-152A, 2018.

MAFRA, M. S. H. et al. Acúmulo de carbono em Latossolo adubado com dejetos líquidos de suínos e cultivado em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, n. 8, p. 630–638, 2014.

NICOLOSO, R. S. et al. Carbon saturation and translocation in a no-till soil under organic amendments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 264, n. May, p. 73–84, 2018.

NICOLOSO, R. S.; RICE, C. W. Intensification of no-till agricultural systems: An opportunity for carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, v. 85, n. 5, p. 1395–1409, 1 set. 2021.

PLANTE, A. F. et al. Acid hydrolysis of easily dispersed and microaggregate-derived silt- and clay-sized fractions to isolate resistant soil organic matter. *European Journal of Soil Science*, v. 57, n. 4, p. 456–467, 2006.

SIX, J. et al. Aggregation and Soil Organic Matter Accumulation in Cultivated and Native Grassland Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 62, n. 5, p. 1367–1377, 1998.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, v. 79, p. 7–31, 2004.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000.

SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 68, p. A4, 2014.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. Manual de Adubação e Calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10a ed. [s.l.] Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004.

TAN, Z. et al. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil and Tillage Research*, v. 92, n. 1–2, p. 53–59, jan. 2007.

TIEFENBACHER, A. et al. Optimizing carbon sequestration in croplands: A synthesis. *Agronomy*, v. 11, n. 5, 1 maio 2021.

WITZGALL, K. et al. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nature Communications*, v. 12, n. 1, p. 1–10, 5 jul. 2021.

YANG, W. et al. CO₂ emission and soil carbon sequestration from spring- and fall-applied poultry litter in corn production as simulated with RZWQM2. *Journal of Cleaner Production*, v. 209, p. 1285–1293, 1 fev. 2019.