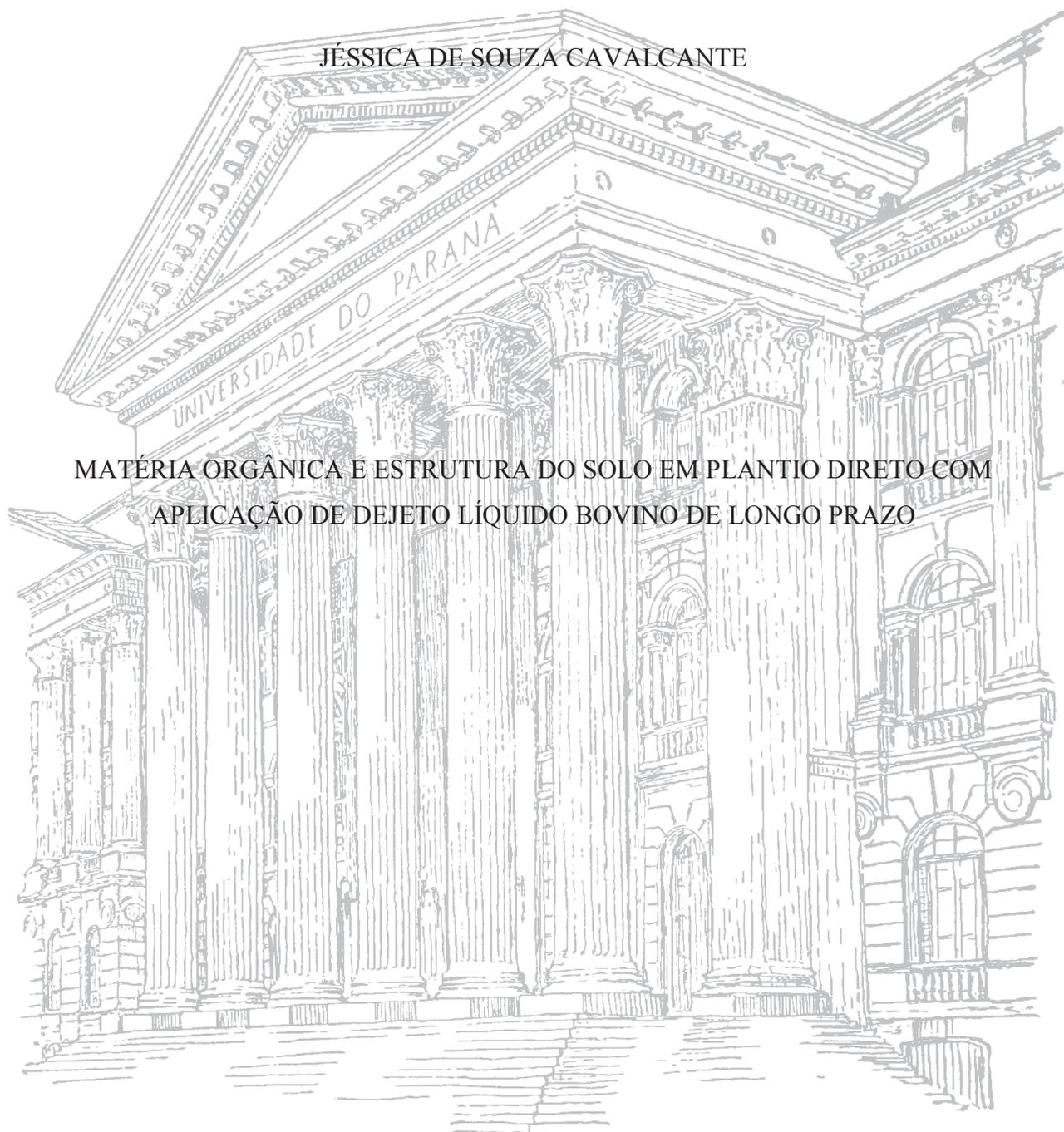


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JÉSSICA DE SOUZA CAVALCANTE



MATÉRIA ORGÂNICA E ESTRUTURA DO SOLO EM PLANTIO DIRETO COM
APLICAÇÃO DE DEJETO LÍQUIDO BOVINO DE LONGO PRAZO

CURITIBA

2018

JÉSSICA DE SOUZA CAVALCANTE

MATÉRIA ORGÂNICA E ESTRUTURA DO SOLO EM PLANTIO DIRETO COM
APLICAÇÃO DE DEJETO LÍQUIDO BOVINO DE LONGO PRAZO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo, no Curso de Pós Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Profa. Dra. Nerilde Favaretto
Co-orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

CURITIBA

2018

Cavalcante, Jéssica de Souza

C376m

Matéria orgânica e estrutura do solo em plantio direto com aplicação de dejetos líquido bovino de longo prazo / Jéssica de Souza Cavalcante. - Curitiba, 2018.
34 f.: grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo.

Orientadora: Nerilde Favaretto

Coorientador: Jeferson Dieckow

1. Bovino - Esterco. 2. Solos - Adubos e fertilizantes. 3. Plantio direto. I. Favaretto, Nerilde. II. Dieckow, Jeferson. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.862



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **Jéssica de Souza Cavalcante**, intitulada: **“Matéria orgânica e estrutura do solo em plantio direto com aplicação de dejetos líquido bovino de longo prazo”**, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição da candidata, emitem parecer pela **“APROVAÇÃO”** da referida Dissertação. A candidata atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 27 de fevereiro de 2018.

Prof. Dra. Nerilde Favaretto, Presidente

Dra. Josiléia Acordi Zanatta, Iº. Examinador

Prof. Dr. Jefferson Dieckow, IIº. Examinador

Prof. Dra. Fabiane Machado Vezzani, IIIº. Examinador



“A minha mãe Maria de Bonfim Soares Cavalcante, a quem eu devo a vida e que lutou comigo em cada batalha e hoje vencemos mais uma. E ao meu noivo Kleber por ter me incentivado em cada etapa para essa conquista.”

AGRADECIMENTOS

Ao Mestre dos Mestres, meu Senhor e Salvador, meu Deus que em cada luta enfrentada me trazia a memória “... que todas as coisas contribuem juntamente para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados segundo o seu propósito. (Romanos 8:28).

Sou infinitamente grata pelo apoio da minha família, a minha mãe Maria do Bonfim, meu pai Antônio Luiz, que a todo tempo torceram por essa conquista e se orgulham de cada uma, como sendo deles.

Ao meu noivo Kleber, que me apoiou desde o início deste sonho, que também se tornou seu, foram tantas as palavras de incentivo e perseverança que me fortaleceram e me permitiram chegar aqui, ao sonho do título de mestre.

Às minhas amadas irmãs Marília e Jaqueline por cada palavra de apoio e pela compreensão da minha ausência. Aos meus grandes amores, meus sobrinhos, Calebe, Levi e Luiz Otávio, por amarem a titia Jéssica, por cada abraço, beijo, mordidas e palavras de carinho, que me fizeram vencer e me ajudam a ser exemplo para eles, meus tesouros.

Agradeço especialmente a minha professora orientadora Dra. Nerilde Favaretto que tornou esse trabalho possível, por toda paciência, dedicação, conselhos, orientações que me permitiram obter mais essa vitória. Como também agradeço ao meu Co-orientador Dr. Jeferson Dieckow, pela prestatividade em cada dúvida.

As auxiliadoras nos laboratórios de Física e Mineralogia do solo, Josiane e Maria e a nossa querida secretária Denise, por serem sempre muito prestativas, com as orientações e palavras de auxílio sempre que precisava.

A Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de ingresso no Programa de Pós-Graduação. E agência financiadora pela disponibilidade da bolsa de estudos.

Essa caminhada se tornou mais gratificante com a amizade fortalecida entre as “Jessicas”, minha amiga irmã, Jéssica Pereira, que sempre foi paciente e perseverante com esta amizade, sempre pronta a me ajudar. E as novas amigas com Aline, Tatiana e Etiene, que juntas fizemos do nosso mestrado e doutorado mais gratificante, uma segurando a mão da outra, chegamos à reta final de mais uma etapa. Muito obrigada minhas amigas!

Agradeço também aos professores das disciplinas cursadas, os conhecimentos repassados são de grande valia. Agradeço também pelo conhecimento repassado pela amiga doutoranda Bruna Ramalho, pela paciência e prestatividade em ensinar.

RESUMO

A aplicação de dejetos líquidos bovinos (DLB) em longo prazo promove melhorias estruturais ao solo pela adição direta de carbono ao solo e pelo efeito benéfico no desenvolvimento das plantas e da microbiota do solo. O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do DLB aplicado em longo prazo (10 anos) em sistema de plantio direto, compreendendo as diferentes frações da matéria orgânica do solo, relacionando-as com a estrutura do solo. O experimento foi instalado em maio de 2006 na estação experimental da Fundação ABC, Castro-PR, sobre Latossolo Bruno Distrófico típico, textura muito argilosa (70 % de argila) com 10 % de declividade em área sob sistema de plantio direto estabelecido há mais de 15 anos. Os tratamentos foram quatro doses de DLB (0, 60, 120, 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), delineados em esquema de blocos ao acaso, com quatro repetições, totalizando 16 parcelas. O DLB foi aplicado em duas etapas, metade no plantio de inverno e metade no plantio de verão, em superfície. O manejo utilizado foi o de rotação de culturas com aveia preta e trigo no inverno e soja e milho no verão. Amostras de solo foram coletadas em outubro de 2015 em dois pontos por parcela, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm: (i) coletas em anel volumétrico de 5,6 cm de diâmetro e 3,1 cm de altura para determinação da densidade do solo, e macro e microporosidade; (ii) coletas de monólitos não deformados de 10 × 10 cm, para determinação da estabilidade de agregados; (iii) coletas de amostras deformadas até 100 cm de profundidade para o cálculo do estoque de carbono com fracionamento da matéria orgânica na camada 0-5 cm. As maiores doses de DLB incrementaram os teores e estoque de carbono orgânico do solo (COS) em superfície, em média 22 e 20 %, respectivamente. O DLB promoveu maior estoque de carbono na fração particulada, com acréscimo de 49 % e na fração estável associada ao silte, com aumento de 30 % para a maior dose de DLB (180), comparado ao tratamento testemunha na camada de 0-5 cm. A maior parte do COS foi constituído pelas frações mais estáveis (frações associadas aos minerais), beneficiando a proteção e permanência do carbono no solo, com valores aproximados de sequestro de C na camada superficial (0-10 cm) em média de 0,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, para as maiores doses de DLB, minimizando as emissões de CO₂ para a atmosfera. O uso de DLB de longo prazo (10 anos) proporcionou melhorias estruturais, com o aumento do diâmetro médio ponderado dos agregados, aumento na distribuição de agregados maior que 2 mm, aumento da macroporosidade e diminuição da densidade e da microporosidade, nas camadas superficiais do solo (0-10 cm). Essas melhorias proporcionam aumento na infiltração de água no solo, minimizando os riscos de poluição dos corpos hídricos, por escoamento superficial.

Palavras-chave: carbono orgânico do solo, estabilidade de agregados, fracionamento físico da matéria orgânica do solo.

ABSTRACT

Long-term application of dairy liquid manure (DLM) improves soil structure by adding carbon in the soil and by the beneficial effect on the crops and soil microbial development. The aim of this research was to evaluate the effect of long-term application of DLM (10 years) in no-tillage system, considering the different fractions of soil organic matter and relating them to the soil structure. The experiment started in May 2006 at the experimental station of ABC Foundation, Castro-PR, Brazil, on a dystrophic Oxisol, clayey texture (70% clay) with 10% slope where the no-tillage system had been practiced for over 15 years. The treatments were four doses of DLM (0, 60, 120, 180 m³ ha⁻¹ year⁻¹), distributed in a randomized block design, with four replications, totaling 16 plots. Each annual rate was split into two applications on the soil surface: half in the winter crop and half in the summer. The crop rotation involved black oats and wheat in the winter, soybean and corn in the summer. Soil samples were collected in October 2015, two each plot at four depths (0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm) as follow: (i) soil cores with 5.6 cm of diameter and 3.1 cm of height for bulk density, macro and micro porosity; (ii) undisturbed monoliths of 10 × 10 cm for aggregate stability; (iii) disturbed soil samples up to 100 cm deep for carbon stock with physical fractionation of organic matter at 0-5 cm depth. The highest doses of DLM increased the concentration and stock of soil organic carbon (SOC) at surface by 22 and 20%, respectively. Compared to the control treatment, the DLM promoted a higher carbon stock in the particulate fraction, with an increase of 49%, and the stable fraction associated with silt increased by 30%. Most of the SOC was constituted by the stable fractions (fractions associated with minerals), promoting the protection and permanence of carbon in the soil minimizing CO₂ emissions into the atmosphere. The highest dose of DLM resulted on 0.7 Mg ha⁻¹ year⁻¹ of C sequestration at the soil surface (0-10 cm depth). The long-term application (10 years) of DLM provided soil structural improvements, with higher mean weight diameter of aggregates, higher percentage of aggregates greater than 2 mm, higher macroporosity and lower bulk density and microporosity in the soil surface (0-10 cm). These improvements lead to an increase in water infiltration into the soil, minimizing the risks of water pollution by surface runoff.

Keywords: soil organic carbon, aggregate stability, physical fractionation of soil organic matter.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	12
2.1	ÁREA EXPERIMENTAL	12
2.2	COLETA DO SOLO	14
2.3	CARBONO ORGÂNICO NO SOLO	15
2.3.1	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo	17
2.3.2	Índice de manejo de carbono – IMC	18
2.4	ESTRUTURA DO SOLO	18
2.4.1	Estabilidade de agregados	19
2.4.1	Densidade e porosidade do solo	19
2.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	20
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1	TEOR E ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO TOTAL NO SOLO	20
3.2	TEOR E ESTOQUE DE CARBONO NAS DIFERENTES FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	23
3.3	ESTRUTURA DO SOLO	25
4	CONCLUSÕES.....	32
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A região de Campos Gerais no estado do Paraná é considerada uma das regiões pioneiras do país por adotar o plantio direto, como também é a região do estado com maior índice em produção de leite (IBGE, 2015). Nessa região, o confinamento total ou semiconfinamento, altamente desenvolvidos, são os principais sistemas de produção adotados (Silva et al., 2008) gerando grande quantidade de dejetos líquidos, o qual é reutilizado nas lavouras agrícolas (Mellek et al., 2010), contribuindo para reduzir custos em fertilizantes minerais.

De modo geral, a aplicação de longo prazo de resíduos orgânicos beneficia a qualidade física do solo, reduzindo a densidade do solo e aumentando a estabilidade de agregados, macroporosidade, condutividade hidráulica e infiltração de água (Gilley e Risse, 2000; Mellek et al., 2010). A melhoria da qualidade física do solo é uma consequência do aumento no teor de carbono orgânico (CO) ao solo, o qual favorece a formação e estabilidade de agregados a partir das diferentes funções das frações da matéria orgânica (Maillard et al., 2015).

No entanto, o uso inadequado de dejetos pode potencializar problemas ambientais. Estudos indicam que a ocorrência de chuva logo após a aplicação, causa a formação do selo superficial pela obstrução dos poros, causando uma maior taxa de escoamento superficial e consequentemente perda de nutrientes e sedimentos, que são potenciais fontes de poluição das águas (Mori et al., 2009; Cherobim et al., 2015; Cherobim et al., 2017).

O uso em longo prazo de dejetos animais aumenta os teores de COT (Xie et al., 2014), consequentemente da matéria orgânica do solo (MOS), que compreende todo o CO presente no solo na forma de resíduos frescos ou em diversos estágios de decomposição, compostos humificados e materiais carbonizados associados ou não à fração mineral, bem como a porção viva, composta por raízes e pela micro, meso e macrofauna (Roscoe e Machado, 2002).

A MOS atua como agente cimentante, sendo que, os agentes transitórios (principalmente polissacarídeos), temporários (raízes e hifas) e persistentes (polímeros orgânicos fortemente adsorvidos) se ligam às partículas minerais do solo, formando diferentes tamanhos de agregados (macro e microagregados) (Tisdall e Oades, 1982). Portanto, a MOS influencia diretamente a formação e estabilidade de agregados do solo.

O fracionamento físico da MOS tem sido amplamente aplicado na ciência do solo sendo utilizado para relacionar a MOS com a agregação e estabilidade de agregados (Tripathi et al., 2014; Garcia-Franco et al., 2015). Este também permite a quantificação do estoque de carbono nas suas diferentes frações (Vieira et al., 2007). O fracionamento físico abrange duas

etapas, a dispersão e a separação (Dieckow et al., 2005), e permite a quantificação da matéria orgânica particulada (MOP), frações maiores que 53 μm e da matéria orgânica associada aos minerais (MOM), frações menores que 53 μm , as quais também são denominadas por alguns autores como frações lábeis e estáveis, respectivamente (Christensen, 1996).

A fração considerada lábil é a MOP, a qual pode apresentar menor tempo de residência no solo e atuar como fonte de nutrientes e energia. A MOM, devido principalmente as interações organo-minerais possui longo período de permanência no solo (Pinheiro et al., 2015) e representa a fração estável. No entanto a permanência da MOS é um atributo do ecossistema, o qual reflete as interações complexas entre a MOS e os componentes do sistema (fração mineral, planta e microrganismos), portanto a estabilização não é unicamente dependente da constituição química da MOS (Schmidt et al., 2011). A fração lábil constitui-se de material mais propenso ao ataque microbiano pela sua localização e composição química, já na fração estável atua a recalcitrância molecular e a proteção coloidal (Baldock e Broos, 2012).

A MOM representa de 52 a 98 % da MOS (Tisdall e Oades, 1982) sendo altamente estável pela proteção física por estar localizada no interior de agregados do solo menores que 53 μm , e devido sua interação organo mineral (Bayer et al., 2004). A interação organo mineral confere uma maior estabilidade química, atuando assim na estabilidade de microagregados (Bayer et al., 2004) o que é um pré-requisito para o sequestro de C a longo prazo (Yadav et al., 2017). A matéria orgânica protegida no interior de agregados apresenta um tempo de permanência no solo maior do que a matéria orgânica livre (Blanco-Moure et al., 2016), sendo esta proteção maior nos microagregados do que nos macroagregados (Six e Paustian, 2014).

Alguns estudos revelam que a adoção do sistema plantio direto (PD) proporciona maior acúmulo de carbono orgânico na MOP, sendo esta fração a mais sensível ao manejo do solo (Bayer et al., 2004; Costa et al., 2004; Conceição et al., 2014). A fração lábil tem maior influência sobre a agregação do solo, por ser uma fonte mais facilmente assimilável de carbono e energia pelos microrganismos heterotróficos (Chan, 1997). Os compostos do metabolismo microbiano atuam na estabilização de macroagregados do solo (Costa et al., 2004).

As alterações proporcionadas pela ação da MOS são potencializadas em sistemas de plantio direto (Bayer et al., 2004), principalmente quando associados ao uso de dejetos de animais, que ajudam a manter a estrutura do solo e a proteção físico química do COS,

melhorando o sequestro de carbono e conseqüentemente agindo na mitigação das emissões de CO₂ para a atmosfera (Dimassi et al., 2014; He et al., 2015 Garcia – Franco et al., 2015).

O carbono adicionado via dejetos e/ou via resíduo vegetal acumula-se principalmente em frações lábeis, como observado por Maillard et al. (2015). Estes autores concluíram que o comportamento da aplicação de dejetos líquidos bovino por dezessete anos em sistema plantio direto estimulou a agregação do solo e a estabilidade do carbono orgânico no solo em superfície, com maiores valores nas profundidades de 0-20 cm, tanto nas frações particuladas como as associadas aos minerais.

A MOS desempenha um papel crítico na formação e estabilidade de agregados, atuando como agente de ligação (Tisdal e Oades, 1982) e na formação da estrutura hierárquica de agregados (Tisdal e Oades, 1982; Six et al., 2004), bem como no armazenamento, proteção e sequestro de C no solo. Diante disso, a hipótese deste trabalho consiste que a aplicação de dejetos líquidos bovino durante 10 anos, sob sistema plantio direto, proporciona o aumento da matéria orgânica do solo, principalmente na fração particulada, melhorando a estrutura do solo, devido ao constante aporte de resíduos orgânicos oferecidos pelo dejetos e pela planta em crescimento, aliado ao não revolvimento do solo, que em conjunto, favorecem o funcionamento do sistema solo. Assim, o objetivo é avaliar o efeito dessa aplicação, compreendendo as diferentes frações da matéria orgânica do solo e suas influências na estrutura do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA EXPERIMENTAL

A área de estudo está inserida na estação experimental da Fundação ABC situada no município de Castro-PR, sobre Latossolo Bruno Distrófico típico, textura muito argilosa com 10 % de declividade (EMBRAPA/Fundação ABC, 2001). O clima da região é subtropical, com verões amenos, do tipo Cfb (Köppen), com precipitação anual média de 1554 mm, série histórica de 1945 a 2001 (IAPAR, 2017).

A instalação do experimento foi realizada em maio de 2006, em área sob sistema plantio direto estabelecido há mais de 15 anos. Os atributos físicos do solo antes da instalação do experimento, com média ponderada na profundidade de 0-20 cm são os seguintes: 701 g kg⁻¹ de argila; 111 g kg⁻¹ de silte e 188 g kg⁻¹ de areia; diâmetro médio ponderado= 2,92 mm; densidade do solo= 1,03 g cm⁻³; microporosidade= 43,6 %; macroporosidade= 16,5 %; condutividade hidráulica= 5,2 mm h⁻¹ (Abboud et al., 2018).

Os tratamentos foram quatro doses de DLB (0, 60, 120, 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹), delineados em esquema de blocos ao acaso, com quatro repetições, totalizando 16 parcelas. O dejetto foi aplicado em duas etapas, metade no plantio de inverno e metade no plantio de verão, em superfície, com uso de bomba elétrica acoplada a uma mangueira. A área foi cultivada em rotação de culturas com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) e trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glycine max* (L.) Merr.) e milho (*Zea mays* L.) no verão. O dejetto provinha de uma fazenda produtora de leite da região e continha em média 78,4 g L⁻¹ de matéria seca (Abboud et al., 2018) e 359 g kg⁻¹ de carbono orgânico total (Mori et al., 2009). As culturas agrícolas receberam adubação mineral de acordo com a recomendação de cada cultura (Tabela 01), além da quantidade de nitrogênio, fósforo e potássio aplicada via DLB (Tabela 02). As parcelas experimentais possuíam 8,5 m de comprimento por 3,5 m de largura, totalizando 29,75 m², delimitadas por chapas de zinco de 0,1 m de altura enterrada a 0,05 m no solo (Abboud et al., 2018).

Tabela 01. Quantidades de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) aplicadas via adubação mineral nas diferentes safras (inverno e verão) nas culturas de aveia preta, trigo, milho e soja, desde a instalação do experimento em Latossolo de textura muito argilosa, Castro - PR.

Safra	Cultura	Cultivar	Semeadura	N	P kg ha ⁻¹	K
Inverno 2006	Aveia Preta	Iapar 61	26/04/2006	0	0	0
Verão 2006/2007	Milho	P3OF53	03/10/2006	175	37	93
Inverno 2007	Aveia Preta	Comum	03/05/2007	0	0	0
Verão 2007/2008	Soja	CD 206	02/11/2007	0	26	50
Inverno 2008	Trigo	Supera	26/06/2008	114	39	59
Verão 2008/2009	Soja	CD 206	27/11/2008	0	22	42
Inverno 2009	Aveia Preta	Comum	09/06/2009	0	0	0
Verão 2009/2010	Milho	P 30F53	18/06/2009	175	41	63
Inverno 2010	Trigo	Quartzo	14/06/2010	134	30	63
Verão 2010/2011	Soja	CD 206	10/12/2010	0	26	50
Inverno 2011	Aveia Preta	Comum	01/05/2011	0	0	0
Verão 2011/2012	Milho	AS 1555YG	20/10/2011	165	39	50
Inverno 2012	Trigo	Quartzo	14/06/2012	120	26	50
Verão 2012/2013	Soja	NA 5909RG	19/11/2012	0	26	50
Inverno 2013	Aveia Preta	Agro Coxilha	26/04/2013	0	0	0
Verão 2013/2014	Milho	P 30F53YH	07/10/2013	183	41	75
Inverno 2014	Trigo	Sinuelo	18/06/2014	120	26	50
Verão 2014/2015	Soja	NA 5909RG	19/11/2014	0	26	50
Inverno 2015	Aveia Preta	Agro Coxilha	15/04/2015	0	0	0
Total				1186	405	745
Média				66	23	41

Fonte: Abboud et al. (2018)

Tabela 02. Quantidades de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) aplicadas nas diferentes safras (inverno e verão) via dejetos líquido bovino, desde a instalação do experimento em Latossolo de textura muito argilosa, Castro – PR.

Safras	30 m ³ ha ⁻¹ safra ⁻¹			60 m ³ ha ⁻¹ safra ⁻¹			90 m ³ ha ⁻¹ safra ⁻¹		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
	kg ha ⁻¹								
Inverno 2006	54,6	23,1	103,8	109,2	46,1	207,7	163,8	69,2	311,5
Verão 2006/2007	52,2	18,3	70,5	104,4	36,7	140,9	156,6	55,0	211,4
Inverno 2007	28,5	12,3	44,3	57,0	24,6	88,7	85,5	36,9	133,0
Verão 2007/2008	60,5	21,5	91,3	121,0	43,0	182,5	181,4	64,4	273,8
Inverno 2008	52,5	18,4	85,5	105,0	36,7	170,9	157,6	55,1	256,4
Verão 2008/2009	33,1	9,6	47,1	66,1	19,2	94,2	99,2	28,8	141,3
Inverno 2009	28,2	16,8	36,1	56,3	33,7	72,1	84,5	50,5	108,2
Verão 2009/2010	78,0	27,5	57,3	156,0	55,0	114,6	234,0	82,5	171,8
Inverno 2010	46,9	21,1	96,7	93,9	42,1	193,3	140,8	63,2	290,0
Verão 2010/2011	52,2	25,2	124,3	104,5	50,5	248,5	156,7	75,7	372,8
Inverno 2011	68,8	24,9	125,8	137,6	49,7	251,6	206,5	74,6	377,4
Verão 2011/2012	55,6	20,6	111,2	111,1	41,1	222,4	166,7	61,7	333,6
Inverno 2012	66,8	19,6	122,8	133,6	39,1	245,7	200,4	58,7	368,5
Verão 2012/2013	46,9	16,1	3,9	93,7	32,2	7,7	140,6	48,4	11,6
Inverno 2013	49,8	18,4	117,4	99,7	36,9	234,8	149,5	55,3	352,2
Verão 2013/2014	43,3	12,9	98,1	86,6	25,7	196,2	129,9	38,6	294,3
Inverno 2014	156,0	26,2	82,2	312,0	52,4	164,4	468,0	78,6	246,5
Verão 2014/2015	126,0	21,0	104,6	252,0	41,9	209,2	378,0	62,9	313,8
Total	1099,8	352,8	1522,8	2199,6	705,6	3045,6	3299,4	1058,4	4568,4
Média	61,1	19,6	84,6	122,2	39,3	169,2	183,3	58,9	253,8

Fonte: Abboud et al. (2018)

2.2 COLETA DO SOLO

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2015, após o cultivo da aveia preta, data que esse experimento da Fundação ABC no município de Castro-PR foi encerrado. Foram abertas duas trincheiras por cada parcela. Três tipos de amostras foram coletadas, em cada trincheira, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm: (i) em anel volumétrico de 5,6 cm de diâmetro e 3,1 cm de altura, introduzido verticalmente até o centro da camada (2 anéis por profundidade e por trincheira) para determinação da porosidade e densidade do solo; (ii) em blocos não deformados de 10 × 10 cm de dimensões laterais, e com espessura equivalente ao da camada amostrada, coletados com o auxílio de espátulas (1 amostra em cada profundidade por trincheira) para determinação da estabilidade de agregados; (iii) em amostras deformadas para determinação do estoque de carbono até 100 cm de profundidade (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm) com fracionamento da matéria

orgânica na camada de 0-5 cm. Essas amostras foram coletadas pelo método de escavação com espátula até 30 cm de profundidade e nas demais profundidades foram coletadas com trado rosca, delimitado por um cilindro metálico (20 cm de altura e 20 cm de diâmetro). Cada amostra foi pesada em campo e retirada uma subamostra, a qual foi cuidadosamente embalada e armazenada para posteriores análises.

2.3 CARBONO ORGÂNICO NO SOLO

As amostras de solo foram secas ao ar, moídas e passadas em peneira de 2,00 mm. Uma alíquota de aproximadamente 40 mg foi moída até passar em malha de 0,50 mm para a determinação da concentração de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), pelo método de combustão seca, em analisador elementar (Vario EL III – Elementar).

A quantificação dos estoques de COT foi calculada com base nos valores de concentração do carbono e da densidade do solo, e posteriormente corrigidos pela massa equivalente do solo, tendo o tratamento sem aplicação de dejetos como referência (Sisti et al., 2004).

A adição anual de carbono via culturas (Tabela 03) foi estimada a partir de dados sobre o rendimento de grãos para soja, milho e trigo e produtividade da matéria seca acima do solo para a aveia preta (Tabela 03). A adição de C foi calculada de acordo com procedimento sugerido por Bolinder et al. (2007), com algumas modificações. Neste cálculo, considerou-se um índice de colheita de 0,43 para a soja, 0,41 para o milho e 0,3 para o trigo (Sisti et al., 2004). Para calcular o resíduo da raiz, foi considerado uma relação parte área/ raiz (P/R) de 4,4 para aveia preta (Pietola e Alakukku, 2005), 5,2 para soja, 5,6 para o milho e 6,5 para o trigo (Bolinder et al., 2007). A adição extra raiz, inclui os exsudatos radiculares e outros materiais derivados da raiz, que foi calculada, considerando o equivalente de 0,65 vezes a quantidade de resíduo radicular (Bolinder et al., 2007). A concentração de C no resíduo de superfície, radicular e extra raiz foi considerado de 400 g kg⁻¹ (Bayer et al., 2000). A adição de carbono pelo dejetos (Tabela 03), foi calculada considerando a concentração de matéria seca de cada aplicação e a concentração de carbono no resíduo seco de 359 g kg⁻¹ (Mori et al., 2009).

Tabela 03. Doses e matéria seca (MS) do dejetos líquido bovino (DLB), produtividade das culturas agrícolas e entradas de carbono orgânico total (COT) via DLB, parte aérea (PA), raiz e extra raiz (ER) sob plantio direto com aplicação por 10 anos de doses de DLB (0, 60, 120 e 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) em Latossolo de textura muito argilosa, Castro-PR.

Safr	Cul.	Dose DLB	MS g L ⁻¹	Prod. Mg ha ⁻¹	Entrada COT					Planta ---%---
		m ³ ha ⁻¹ safra ⁻¹			DLB	PA	Raiz	ER	Total	
Inverno 2006	AP	0	90,5	3,37	0,00	1,35	0,31	0,20	1,85	100
		30	90,5	3,39	0,97	1,35	0,31	0,20	2,84	66
		60	90,5	4,05	1,95	1,62	0,37	0,24	4,17	53
		90	90,5	3,65	2,92	1,46	0,33	0,22	4,93	41
Verão 2006/07	MI	0	75,5	12,61	0,00	7,26	2,20	1,43	10,89	100
		30	75,5	13,32	0,81	7,67	2,32	1,51	12,31	93
		60	75,5	13,72	1,63	7,89	2,39	1,55	13,46	88
		90	75,5	14,31	2,44	8,24	2,49	1,62	14,79	84
Inverno 2007	AP	0	43,3	0,68	0,00	0,27	0,06	0,04	0,37	100
		30	43,3	0,78	0,47	0,31	0,07	0,05	0,89	48
		60	43,3	0,77	0,93	0,31	0,07	0,05	1,35	31
		90	43,3	0,66	1,40	0,26	0,06	0,04	1,76	20
Verão 2007/08	SO	0	89,6	3,17	0,00	1,68	0,57	0,37	2,62	100
		30	89,6	3,46	0,96	1,83	0,62	0,40	3,82	75
		60	89,6	3,84	1,93	2,04	0,69	0,45	5,10	62
		90	89,6	3,70	2,89	1,96	0,66	0,43	5,95	51
Inverno 2008	TR	0	87,1	5,40	0,00	5,04	1,11	0,72	6,87	100
		30	87,1	6,01	0,94	5,61	1,23	0,80	8,58	89
		60	87,1	6,07	1,88	5,66	1,24	0,81	9,59	80
		90	87,1	5,88	2,81	5,49	1,21	0,78	10,29	73
Verão 2008/09	SO	0	46,7	3,60	0,00	1,91	0,64	0,42	2,97	100
		30	46,7	3,73	0,50	1,98	0,67	0,43	3,58	86
		60	46,7	4,05	1,01	2,15	0,72	0,47	4,35	77
		90	46,7	3,76	1,51	1,99	0,67	0,44	4,61	67
Inverno 2009	AP	0	51,0	0,58	0,00	0,23	0,05	0,03	0,32	100
		30	51,0	0,85	0,55	0,34	0,08	0,05	1,01	46
		60	51,0	0,95	1,10	0,38	0,09	0,06	1,62	32
		90	51,0	0,99	1,65	0,40	0,09	0,06	2,19	25
Verão 2009/10	MI	0	44,9	11,18	0,00	6,44	1,95	1,27	9,65	100
		30	44,9	11,20	0,48	6,45	1,95	1,27	10,15	95
		60	44,9	12,20	0,97	7,02	2,13	1,38	11,50	92
		90	44,9	12,74	1,45	7,33	2,22	1,44	12,45	88
Inverno 2011	AP	0	113,0	2,07	0,00	0,83	0,19	0,12	1,14	100
		30	113,0	2,90	1,22	1,16	0,26	0,17	2,81	57
		60	113,0	2,80	2,43	1,12	0,25	0,17	3,97	39
		90	113,0	2,59	3,65	1,03	0,24	0,15	5,07	28
Verão 2011/12	MI	0	94,0	13,40	0,00	7,71	2,33	1,52	11,56	100
		30	94,0	13,44	1,01	7,74	2,34	1,52	12,62	92
		60	94,0	13,01	2,02	7,49	2,27	1,47	13,25	85
		90	94,0	13,16	3,04	7,58	2,29	1,49	14,40	79

Continuação. Tabela 03

Safr	Cul.	Dose DLB	MS	Prod.	Entrada COT					
		m ³ ha ⁻¹ safr ⁻¹	g L ⁻¹	Mg ha ⁻¹	DLB	PA	Raiz	ER	Total	Planta
					-----m ³ ha ⁻¹ safr ⁻¹ -----					---%---
Inverno 2013	AP	0	79,1	9,51	0,00	0,67	0,15	0,10	0,92	100
		30	79,1	7,72	0,85	0,79	0,18	0,12	1,94	56
		60	79,1	5,16	1,70	0,86	0,19	0,13	2,88	41
		90	79,1	5,26	2,56	0,79	0,18	0,12	3,64	30
Verão 2013/14	MI	0	71,1	13,29	0,00	7,65	2,32	1,51	11,47	100
		30	71,1	14,01	0,77	8,07	2,44	1,59	12,86	94
		60	71,1	14,83	1,53	8,54	2,58	1,68	14,33	89
		90	71,1	14,63	2,30	8,42	2,55	1,66	14,93	85
Inverno 2015	AP	0	75,1	10,62	0,00	0,67	0,15	0,10	0,92	100
		30	76,9	9,51	0,00	0,79	0,18	0,12	1,09	100
		60	80,4	7,72	0,00	0,86	0,19	0,13	1,18	100
		90	81,6	5,16	0,00	0,79	0,18	0,12	1,08	100
Média anual geral									5,77	77

¹ Produtividade média de grãos para soja (SO), milho (MI) e trigo (TR) e produtividade de matéria seca para aveia preta (AP).

² Produtividade de matéria seca para aveia preta, média dos anos anteriores, para cálculo da entrada de carbono.

2.3.1 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

A separação das frações da matéria orgânica do solo foi realizada por dispersão, peneiramento e sedimentação. As classes de tamanho foram definidas de acordo com os limites das classes texturais, definindo os tamanhos das partículas para a fração areia com valores entre 50 - 2000 µm, silte entre 2 - 50 µm e argila menor que 2 µm (Roscoe e Machado, 2002).

O fracionamento físico da matéria orgânica foi feito somente na camada de 0–5 cm, utilizando o método adaptado de Christensen (1996) onde a dispersão foi realizada pela agitação com esferas e sonicação, e a separação das frações físicas por peneiração e sedimentação gravitacional.

O primeiro procedimento é a obtenção da MOP com o uso de esferas de poliacetal e agitação. Esse procedimento rompe os agregados maiores que 53 µm, não comprometendo a MOP. Após esta etapa foi realizada a separação das frações com o uso da peneira de 53 µm, onde o que ficou retido na peneira foi à fração de tamanho areia + MOP. A suspensão que passou pela peneira de 53 µm correspondeu às frações silte e argila + MOM. Para separação das frações silte e argila foi realizada a centrifugação. Ao sobrenadante foi acrescentado CaCl₂ 0,5 mol L⁻¹, que passou por um repouso de 12 horas, sendo o material conduzido para o aparelho de ultrassom, submetido a uma energia aproximada de 900 J mL⁻¹, para a total dispersão entre as frações silte e argila, as quais foram submetidas a ciclos de sedimentação

gravitacional, com o tempo de sedimentação calculado a partir da Lei de Stokes, obtendo nesta etapa a MOM associada as frações silte e argila, separadamente. Após esses procedimentos do fracionamento físico da matéria orgânica, as frações obtidas foram a MOP + areia; MOM + silte e MOM + argila.

Todas as frações obtidas foram secas em estufa a 45 °C, após secas foram moídas em gral de ágata e passados em peneira de 0,20 mm para determinação do teor de C orgânico e nitrogênio nas diferentes frações, pelo método de combustão em analisador elementar Vario EL III – elementar®, para análises do estoque de carbono em cada fração obtida.

2.3.2 Índice de manejo de carbono – IMC

Para o cálculo do índice de manejo de carbono (IMC) foi utilizado o método proposto por Blair et al. (1995) (Eq. 1, 2, 3 e 4), considerando como referência o tratamento sem aplicação de DLB (IMC=100).

$$\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{ILC} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{IEC} = \text{Est.C tratamento} / \text{Est.C referência} \quad \text{Eq.2}$$

Onde: IEC = índice de estoque de carbono; Est.C tratamento = estoque de C do tratamento avaliado (Mg ha^{-1}); Est.C referência = estoque de C do tratamento referência (Mg ha^{-1}).

$$\text{ILC} = \text{LC tratamento} / \text{LC referência.} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: ILC = índice de labilidade de C; LC tratamento = labilidade do C do solo no tratamento avaliado; LC referência = labilidade do C no solo no tratamento referência.

$$\text{LC} = \text{Est.C lábil} / \text{Est.C não lábil} \quad \text{Eq.4}$$

Onde: LC = labilidade do carbono; Est.C lábil = estoque de C da fração areia + MOP (Mg ha^{-1}); Est.C não lábil = estoque de C da fração silte e da fração argila (Mg ha^{-1}).

2.4 ESTRUTURA DO SOLO

Para avaliar a estrutura do solo foram realizadas as seguintes determinações: estabilidade de agregados; densidade do solo; porosidade total; macro e microporosidade.

2.4.1 Estabilidade de agregados

Para a avaliação da estabilidade de agregados foi utilizado o método proposto por Kemper e Rosenau (1986), com a obtenção do diâmetro médio ponderado seco (DMPs) e do diâmetro médio ponderado úmido (DMPu) e posteriormente do índice de estabilidade de agregados (IEA).

As amostras foram cuidadosamente peneiradas em malha de 8,00 mm, secas ao ar e separadas em frações de agregados utilizando-se peneiras de 4,00; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm, para determinação de agregados via seca. Com esses valores foi possível estimar o diâmetro médio ponderado seco (DMPs), de acordo com a expressão (Eq. 5) de Kemper e Rosenau (1986).

$$DMP = \sum_{i=1}^n (\mu_i \times w_i)$$

Eq.5

Onde:

DMP: diâmetro médio ponderado, mm;

μ : diâmetro médio entre classes, mm e;

w: fração em massa de solo da classe em relação a massa da amostra total, adimensional.

A determinação dos agregados via úmida (DMPu) consistiu na pesagem proporcional de 50 g de amostra composta obtida a partir da distribuição dos agregados via seca, a qual passou pelo mesmo conjunto de peneiras do DMPs, sendo agitada verticalmente em água durante 15 minutos, com 42 ciclos e após esse procedimento foram secas em estufa por 24 horas a 105°C. Tais procedimentos foram necessários para o cálculo da massa e a porcentagem de agregados estáveis nas suas diferentes classes. Com esses resultados foi calculado o DMPu (Eq. 5), semelhantemente ao DMPs.

Com os resultados do DMPu e DMPs foi calculado o índice de estabilidade de agregados (IEA), expresso na Eq. 6

$$IEA(\%) = \left(\frac{DMPu}{DMPs} \right) \times 100$$

Eq.6

2.4.1 Densidade e porosidade do solo

A avaliação da densidade do solo foi realizada pelo método do anel volumétrico com a secagem das amostras a 105 °C (EMBRAPA, 2011).

A porosidade total foi obtida pela umidade de saturação. A microporosidade determinada pela mesa de tensão a 60 cm, e a macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 2011).

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e a comparação de médias realizada pelo teste de Tukey ($P < 0,05$), exceto para a análise de estoque de C que foi realizada ao nível de 10 % de significância ($P < 0,1$). As análises foram realizadas no ambiente R (RStudio Team, 2016) com auxílio do pacote ExpDes (Ferreira et al., 2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 TEOR E ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO TOTAL NO SOLO

As aplicações de DLB, durante 10 anos, em superfície, sob sistema plantio direto promoveram o aumento significativo no teor de COT e NT na camada superficial (0–5 cm) do solo (Tabela 04). A maior dose de DLB (180) aumentou 23 % e 33 % os teores de COT e NT, respectivamente. A relação C/N foi o inverso, onde as maiores doses (120 e 180) tiveram menores valores (Tabela 04).

Esses resultados podem ser atribuídos ao C adicionado diretamente pelo DLB (Tabela 03), e ao C advindo das culturas agrícolas, pelo efeito positivo do DLB no aumento da produtividade das plantas e nos exsudados radiculares (Mellek et al., 2010; Xie et al., 2014; He et al., 2015; Wei et al., 2017; Li et al., 2018).

Embora o DLB seja aplicado na superfície, observa-se uma tendência de aumento nas concentrações de COT até a camada de 10 cm (Tabela 04). Acredita-se que isso pode ter ocorrido devido ao efeito de bioturbação no solo, onde organismos do solo podem transportar este carbono em maiores profundidades, o carbono solúvel oriundo do próprio DLB, como o produto da decomposição microbiana do solo pode ter sido lixiviado via caminhos de fluxo preferencial e ter sido adsorvido nas partículas de tamanho argila do solo (Mellek et al., 2010; Maillard et al., 2015). Além disso, a aplicação de dejetos aumenta os exsudados radiculares, por meio do fornecimento de nutrientes as plantas (Liang et al., 2012), o que pode contribuir no aumento das concentrações de COT em profundidade.

Tabela 04. Teores de carbono orgânico total (COT), e nitrogênio total (NT), relação C/N e densidade de solo (Ds) nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm em Latossolo Bruno Distrófico típico de textura muito argilosa, sob plantio direto com aplicação por 10 anos de doses (0, 60, 120 e 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) de dejetos líquido bovino (DLB).

COT (g kg ⁻¹)	Doses de DLB				p	CV
	0	60	120	180		
	-----m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----					%
0-5 cm	42,68 b	48,32 a	52,18 a	52,77 a	0,002	5,72
5-10 cm	33,94	36,02	37,71	37,82	0,21	7,43
10-20 cm	28,10	30,84	29,76	28,73	0,24	6,35
20-30 cm	22,89	23,41	23,00	23,05	0,96	6,42
30-45 cm	18,94	18,69	18,96	18,37	0,85	5,87
45-60 cm	17,53	17,31	17,56	16,99	0,94	8,36
60-80 cm	14,95	14,76	15,25	14,81	0,97	10,98
80-100 cm	12,84	11,81	12,53	12,21	0,77	11,76
NT (g kg⁻¹)						
0-5 cm	3,24 c	3,83 b	4,26 ab	4,32 a	0,0003	6,05
5-10 cm	2,47	2,64	3,02	2,99	0,13	12,36
10-20 cm	1,96	2,28	2,06	1,91	0,28	13,09
20-30 cm	1,39	1,42	1,50	1,41	0,80	11,65
30-45 cm	1,15	1,10	1,07	1,06	0,85	14,44
45-60 cm	1,00	0,96	0,98	0,91	0,88	16,94
60-80 cm	0,79	0,80	0,85	0,79	0,86	15,44
80-100 cm	0,72	0,67	0,80	0,66	0,13	11,25
C/N						
0-5 cm	13,22 a	12,67 ab	12,25 b	12,19 b	0,028	3,45
5-10 cm	13,83	13,73	12,47	12,86	0,10	6,02
10-20 cm	14,34	13,72	14,50	15,09	0,34	6,95
20-30 cm	16,49	16,58	15,40	16,61	0,37	6,62
30-45 cm	16,89	17,22	17,81	17,63	0,90	11,19
45-60 cm	17,60	18,24	18,09	19,08	0,83	12,50
60-80 cm	19,31	19,28	17,97	19,05	0,86	13,75
80-100 cm	18,61	17,81	15,82	18,77	0,16	10,31
Ds (g cm⁻³)						
0-5 cm	0,94	0,92	0,89	0,90	0,48	5,15
5-10 cm	1,23 a	1,21 a	1,08 b	1,14 ab	0,02	5,18
10-20 cm	1,20	1,20	1,15	1,19	0,29	3,66
20-30 cm	1,12	1,13	1,12	1,19	0,55	6,67
30-45 cm	1,10	0,96	0,99	0,96	0,16	9,45
45-60 cm	0,96	1,04	0,98	1,02	0,13	4,67
60-80 cm	0,95	1,01	0,99	0,97	0,30	4,74
80-100 cm	1,01	1,10	1,08	1,09	0,34	6,83

Letras minúsculas nas linhas comparam as doses de DLB pelo Teste de Tukey (p < 0,1).

O aumento significativo nas concentrações de COT na camada 0–5 cm refletiu no aumento do estoque de carbono em superfície (camada 0–10 cm), onde o tratamento DLB (180) aumentou em aproximadamente 22 % o estoque de carbono, comparado com o tratamento testemunha (Tabela 05). O maior efeito do DLB na camada superficial do solo é

esperado devido ao sistema de preparo (sem revolvimento do solo) e da forma de aplicação (em superfície).

O aumento no estoque de COT com as maiores aplicações de DLB em longo prazo favoreceu o incremento significativo no sequestro de C na camada 0–10 cm, com valor aproximado de 0,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 05). O maior sequestro de carbono favorece a diminuição da liberação de CO₂ para atmosfera, minimizando os impactos da sua emissão na atmosfera (Carvalho et al., 2010; Garcia – Franco et al., 2015).

Tabela 05. Estoque e sequestro de carbono (C) nas profundidades de 0-5, 0-10, 0-20, 0-30, 0-100 cm em Latossolo Bruno Distrófico típico de textura muito argilosa, sob plantio direto com aplicação por 10 anos de doses (0, 60, 120 e 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) de dejetos líquido bovino (DLB).

Estoque de C (Mg ha ⁻¹)	Doses de DLB				p	CV -----%-----
	0	60	120	180		
	-----m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----					
0-5 cm	19,92 b	22,69 a	24,46 a	24,71 a	0,003	6,01
0-10 cm	40,80 b	44,69 ab	47,53 a	47,71 a	0,02	6,30
0-20 cm	74,48	81,56	82,27	83,12	0,09	5,85
0-30 cm	100,06	107,66	107,05	109,64	0,21	5,81
0-100 cm	210,80	214,73	215,43	217,59	0,91	6,48
Sequestro de C (Mg ha⁻¹ ano⁻¹)						
0-5 cm	-	0,28 a	0,45 a	0,48 a	0,003	-
0-10 cm	-	0,39 ab	0,68 a	0,69 a	0,02	-
0-20 cm	-	0,71	0,78	0,86	0,10	-
0-30 cm	-	0,76	0,70	0,96	0,21	-
0-100 cm	-	0,39	0,46	0,68	0,92	-

Letras minúsculas nas linhas comparam as doses de DLB pelo Teste de Tukey (p < 0,1).

Todas as doses de DLB nas diferentes profundidades proporcionaram valores positivos para o sequestro de C, confirmando o potencial da associação do PD com aplicação de DLB em mitigar as emissões de CO₂ para a atmosfera. No entanto, denota-se a importância da estabilidade da MOS como pré-requisito para esse sequestro (Yadav et al., 2017), uma vez que é mais benéfico que este carbono esteja protegido em frações mais estáveis da MOS, conferindo maior tempo de permanência no solo (Powlson et al., 2012; He et al., 2014).

3.2 TEOR E ESTOQUE DE CARBONO NAS DIFERENTES FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

O fracionamento físico da MOS permitiu a separação das frações particuladas ($> 53 \mu\text{m}$), que corresponde a $\text{MOP}_{\text{Areia}}$ e as frações de MOS associados as partículas minerais de solo, denominadas $\text{MOM}_{\text{Silte}}$ e $\text{MOM}_{\text{Argila}}$ ($< 53 \mu\text{m}$) na camada de 0-5 cm (Tabela 06).

As diferentes doses de DLB promoveram acréscimo significativo na concentração de COT e aumento no estoque e sequestro de carbono nas frações $\text{MOP}_{\text{Areia}}$ e $\text{MOM}_{\text{Silte}}$ (Tabela 06). A fração $\text{MOM}_{\text{Argila}}$ apresentou o mesmo comportamento, porém não de maneira significativa.

Na fração particulada da MOS ($\text{MOP}_{\text{Areia}}$) as diferentes doses de DLB promoveram um acréscimo significativo de aproximadamente 28 % na concentração de COT para as maiores doses de DLB (120 e 180), comparados ao tratamento testemunha. A aplicação de dejetos também proporcionou maiores valores para estoque e sequestro de carbono nesta fração, com acréscimo em média de 49 % para o estoque e valores médios de sequestro de C de $0,22 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, para a maior dose de DLB (180). Estes resultados confirmam a importância da MO particulada como indicador de qualidade do solo, indicando os efeitos de pequenas alterações exercidas em sistemas de manejo do solo (Dieckow et al., 2005).

A adição de dejetos animais promove o aumento nas concentrações de carbono, o qual é mantido nas frações particuladas da MOS (Whalen et al., 2013) influenciando diretamente a agregação do solo (Yan et al., 2012).

As frações da MO associadas aos minerais do solo ($\text{MOM}_{\text{Silte}}$ e $\text{MOM}_{\text{Argila}}$), apresentaram as maiores concentrações de COT comparado com a fração particulada (Tabela 06), por representarem a maior proporção no solo, podendo possuir maior capacidade de sequestro de carbono (Powlson et al., 2012). As maiores concentrações de C nas frações associadas aos minerais do solo, bem como maiores estoques de carbono podem ser explicados pela presença de compostos orgânicos mais recalcitrantes, em consequência de processos de decomposição e humificação mais prolongados (Coutier-Murias et al., 2013).

Das frações associadas aos minerais, apenas a fração $\text{MOM}_{\text{Silte}}$ apresentou melhorias significativas com as diferentes aplicações de DLB, comparado ao tratamento testemunha. Com acréscimo de 25 % nos teores de COT e com aumento de aproximadamente 30 % para o estoque de C e com sequestro de $0,17 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a maior dose de DLB (180). Os dados indicam que a $\text{MOM}_{\text{Silte}}$ é possivelmente menos estável que a $\text{MOM}_{\text{Argila}}$, uma vez que

em longo prazo as aplicações de DLB foram capazes de aumentar significativamente o carbono orgânico apenas nas frações particuladas e nas de tamanho silte.

O aumento do carbono nas frações particuladas com a aplicação de DLB pode ter contribuído para o significativo incremento na fração associada ao mineral silte ao longo do tempo. O carbono solúvel, oriundo do próprio dejetos ou oriundo da sua decomposição, pode ser diretamente adsorvido nas frações de tamanho silte do solo e, além disso, a fase sólida do DLB é progressivamente fragmentada, formando as partículas organo-minerais (Mailard et al., 2015), resultando no acúmulo significativo de carbono na fração associada ao silte e como tendência na fração associada a argila.

Tabela 06. Teores de carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (Estoque C) e sequestro de carbono (Sequestro C) nas diferentes frações de matéria orgânica do solo na camada 0–5 cm, em Latossolo de textura muito argilosa sob plantio direto com aplicação de doses (0, 60, 120 e 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) de dejetos líquido bovino (DLB).

Doses de DLB m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹	MOP _{Areia}		
	COT -----g kg ⁻¹ -----	Estoque C Mg ha ⁻¹	Sequestro C Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹
0	34,17 b	4,40 b	-
60	39,71 ab	5,94 ab	0,15 ab
120	44,10 a	6,40 a	0,20 a
180	43,85 a	6,58 a	0,22 a
p valor	0,05	0,02	0,02
CV (%)	11,99	14,58	
	MOM _{Silte}		
0	41,53 b	5,77 b	-
60	47,43 ab	6,87 ab	0,11 ab
120	49,19 a	7,26 a	0,15 a
180	52,12 a	7,52 a	0,17 a
p valor	0,03	0,03	0,03
CV (%)	8,66	10,25	
	MOM _{Argila}		
0	46,07	9,74	-
60	45,67	9,87	0,01
120	49,60	10,79	0,10
180	51,50	10,60	0,09
p valor	0,13	0,19	0,21
CV (%)	7,56	7,33	

MOP_{areia}: matéria orgânica particulada associada a fração areia > 53 µm; MOM_{silte}: matéria orgânica associada a fração mineral silte < 53 µm; MOM_{argila}: matéria orgânica associada a fração mineral argila < 53 µm. Letras minúsculas nas colunas comparam as doses de DLB pelo Teste de Tukey (p < 0,1)

O IMC fornece uma indicação das mudanças na dinâmica do carbono no solo em relação a tipos de sistemas avaliados e mostra uma resposta em relação a uma referência (Blair et al., 1995). Este foi significativamente influenciado pelas doses de DLB, promovendo maior IMC, comparado ao tratamento referência, com um incremento de 45 a 66 (Tabela 07). Tais resultados foram eficientes em mostrar as mudanças na qualidade do solo com o manejo adotado, indicando que este sistema de manejo do solo (PD com aplicações de DLB) minimiza a degradação do solo (Ghosh et al., 2016).

Tabela 07. Labilidade do carbono (LC), índice de estabilidade do carbono (IEC), índice de labilidade do carbono (ILC) e índice de manejo de carbono (IMC) na camada 0–5 cm, em Latossolo de textura muito argilosa sob plantio direto com aplicação de doses (0, 60, 120 e 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) de dejetos líquidos bovinos (DLB)

Doses de DLB m³ ha⁻¹ ano⁻¹	LC	IEC	ILC	IMC
0	0,29	1,00 b	1,00	100 b
60	0,36	1,14 a	1,27	145 ab
120	0,36	1,23 a	1,25	153 ab
180	0,36	1,24 a	1,32	166 a
p valor	0,18	0,00	0,23	0,06
CV (%)	15,77	6,35	18,19	21,65

Letras minúsculas nas colunas comparam as doses de DLB pelo Teste de Tukey ($p < 0,1$).

3.3 ESTRUTURA DO SOLO

A densidade do solo aumentou em profundidade (Figura 1a), apresentando maior valor na camada 5–10 cm, possivelmente devido à compactação pela mecanização, o que tem sido comumente observado em sistemas de manejo em plantio direto (Reichert et al., 2009). Nesta camada (5–10 cm), a aplicação de DLB foi eficaz em reduzir a densidade de maneira significativa. Comparado ao tratamento testemunha, as maiores doses de DLB (120 e 180) reduziram a densidade do solo de 1,23 para 1,08 g cm⁻³. Além da adição de MOS, o aumento do crescimento radicular e do rendimento das culturas (Courtier-Murias et al., 2013) bem como o aumento da atividade biológica (He et al., 2015) com a aplicação de DLB, possivelmente favoreceram no menor adensamento do solo (Mellek et al., 2010).

A densidade do solo variou de 0,89 a 1,23 g cm⁻³, alguns autores sugerem que valores ideais estejam no intervalo de 0,9 a 1,2 g cm⁻³, para solos de textura argilosa (Reynolds et al.,

2007). Resultados inferiores a 0,9 podem dificultar a correta ancoragem da planta, podendo diminuir a água disponível (Reynolds et al., 2008). Já valores acima do limite superior de 1,25 a 1,3 g cm⁻³ podem diminuir o rendimento da cultura devido à inadequada aeração (Tormena et al., 2008).

O aumento da densidade do solo em profundidade é uma consequência da redução da porosidade total, sendo a macroporosidade reduzida e como consequência a microporosidade aumentada (Regelink et al., 2015), como observado nas Figuras 1b, 1c e 1d.

Os macroporos são responsáveis pela aeração do solo e valores ótimos para o crescimento de plantas consistem de 10 % ou mais do volume total de poros no solo (Xu et al., 1992; Reynolds et al., 2008, 2009). Valores próximos a 10 % foram atingidos na camada 5-10 cm com macroporosidade média de 9 e 8 % nos tratamentos de DLB-0 e DLB-60, respectivamente, camada essa que apresentou maior adensamento, possivelmente devido a ação do sistema plantio direto. No entanto, nessa mesma camada as maiores doses de DLB aumentaram de maneira significativa a macroporosidade de 9,6 % no tratamento DLB-0 para 12,7 % no tratamento DLB-180. Destacando o efeito positivo do DLB no aumento de macroporos em sistema plantio direto.

A disponibilidade de água para as plantas depende da microporosidade e valores ótimos são considerados aqueles iguais ou superiores a 20 % (Hall et al., 1977). Neste trabalho (Figura 1d), observa-se valores de microporosidade variando de 40 a 50 % nas diferentes doses de DLB e profundidade do solo. As aplicações de DLB nas maiores doses de DLB (120 e 180) reduziram a quantidade de microporos nas camadas 5-10 cm e 10-20 cm, sendo esta uma consequência do aumento dos macroporos nessas camadas (Regelink et al., 2015). Estes resultados também foram observados por Mellek et al. (2010) em solo de textura franco arenosa com aplicação de DLB em plantio direto por dois anos.

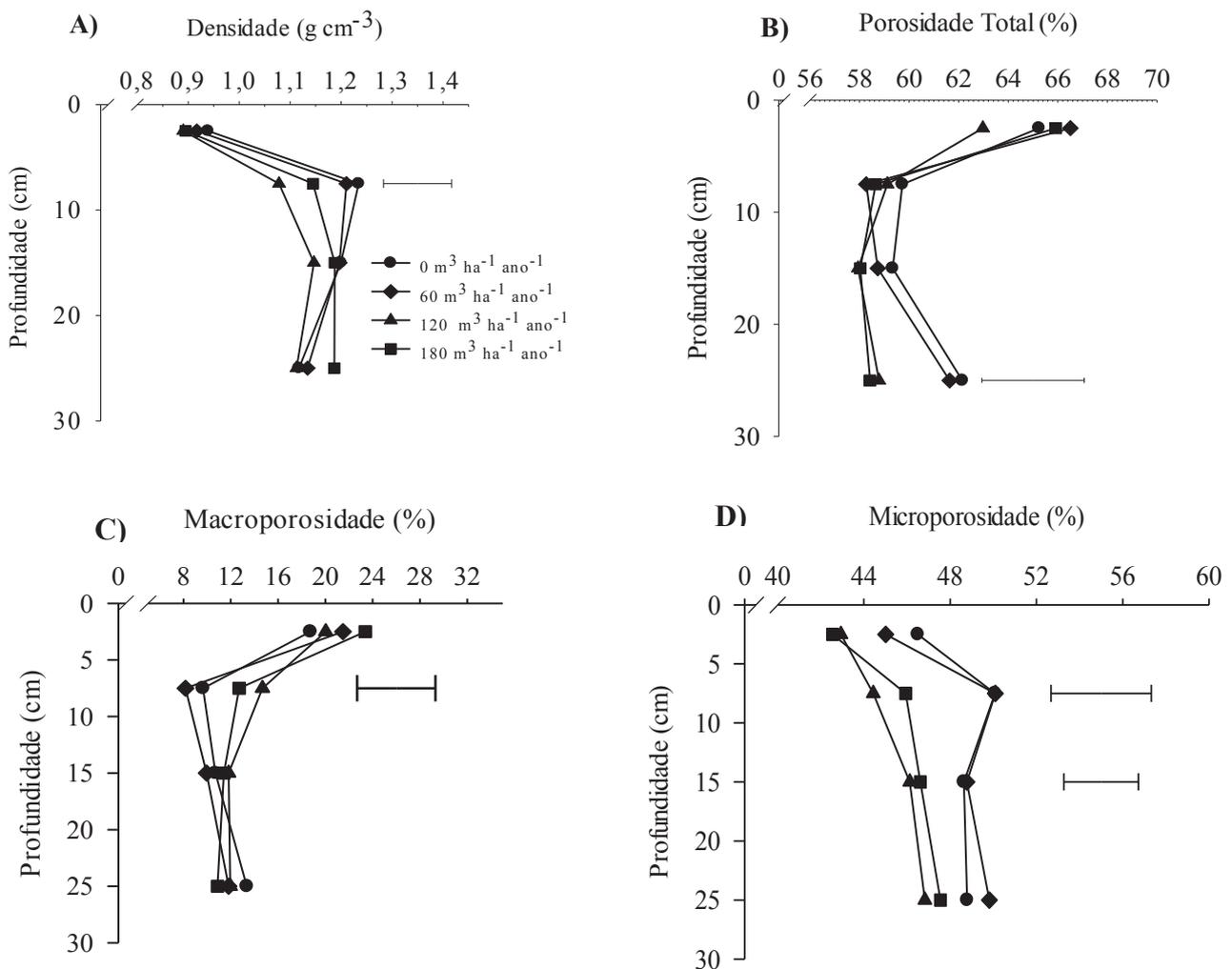


Figura 01. Atributos físicos do solo nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 cm em Latossolo Bruno Distrófico típico de textura muito argilosa, sob plantio direto com aplicação por 10 anos de doses ($0, 60, 120$ e $180 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) de dejetos líquidos bovinos (DLB). A) Densidade do solo (Ds); B) Porosidade Total (PT); C) Macroporosidade do solo; D) Microporosidade do solo. Barras horizontais correspondem à diferença mínima significativa de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,10$).

As aplicações de DLB proporcionaram aumento significativo no DMPs e DMPu (Figura 02) na camada superior do solo (0–5 cm) com médias de 1,67 para 2,10 mm no DMPs e de valores de 1,62 para 2,05 mm no DMPu, comparado ao tratamento testemunha (Figura 02). Esse significativo aumento pode ser atribuído ao efeito direto da adição de DLB no solo, onde a matéria orgânica presente no dejetos é fonte de compostos orgânicos, que podem agir na cimentação de partículas minerais do solo, aumentando o tamanho de agregados (Six et al., 2004). Outro fator que pode ser abordado é o efeito indireto proporcionado pela aplicação de

DLB, com fornecimento de nutrientes para o desenvolvimento das plantas, aumentando o crescimento radicular, que age no enredamento de agregados de solo, formando os macroagregados (Vezzani e Mielniczuk 2011; Maillard et al., 2015).

A maior estabilidade de agregados beneficia a proteção do carbono em frações associada aos minerais, comprovado pela correlação positiva do C da fração MOM_{Silte} com o $DMPu$ ($r = 0,63$, $p = 0,009$). Assim como observado por Courtier-Murias et al. (2013), em um experimento com aplicação de dejetos de gado e resíduos de culturas durante 44 anos, constaram que a maior parte do CO estava estabilizado na fração associada aos minerais do solo, devido adsorção de biomassa microbiana e subprodutos microbianos em superfícies minerais do solo.

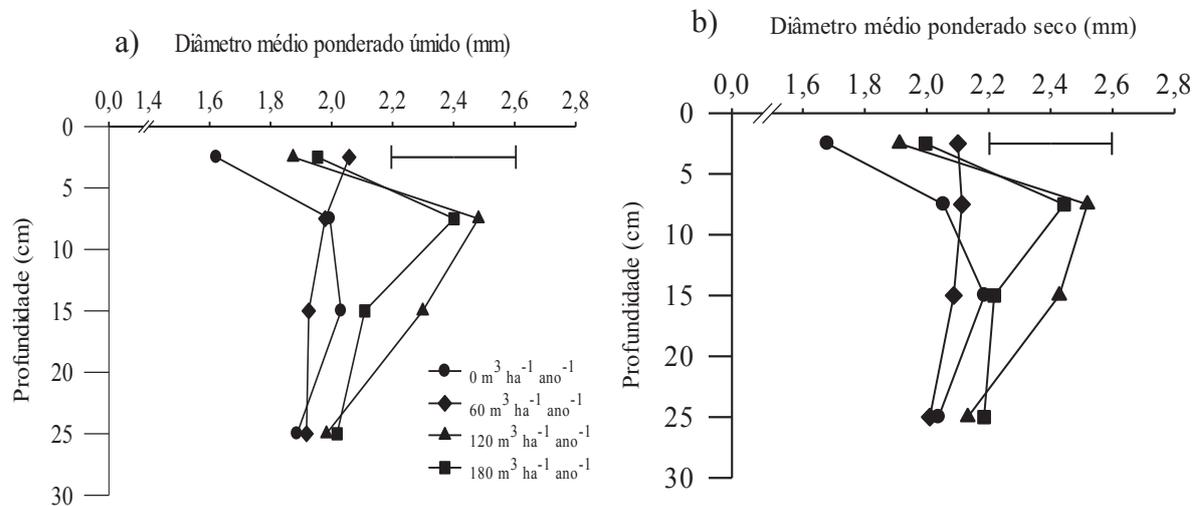


Figura 02. Estabilidade de agregados nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 cm em Latossolo Bruno Distrófico típico de textura muito argilosa, sob plantio direto com aplicação por 10 anos de doses (0, 60, 120 e 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) de dejetos líquido bovino (DLB). **a)** Diâmetro médio ponderado úmido (DMPu); **b)** Diâmetro médio ponderado seco (DMPs). Barras horizontais correspondem à diferença mínima significativa de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,10$).

O IEA variou de 0,92 a 0,98 (Figura 2c), mostrando que os agregados do solo são resistentes a ação dos impactos das gotas da chuva, e, portanto, apresentam elevada estabilidade mesmo no tratamento sem aplicação de DLB, comprovando a eficácia do sistema plantio direto na melhor estruturação do solo (Costa et al., 2004).

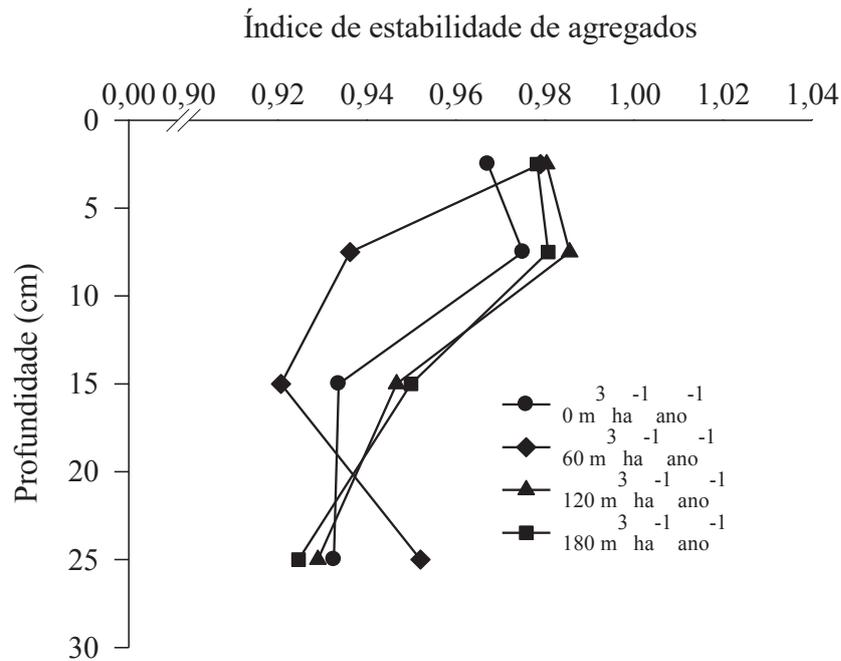


Figura 03. Índice de estabilidade de agregados (IEA) nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 cm em Latossolo Bruno Distrófico típico de textura muito argilosa, sob plantio direto com aplicação por 10 anos de doses (0, 60, 120 e 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) de dejetos líquidos bovinos (DLB). Barras horizontais correspondem à diferença mínima significativa de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,1$).

A distribuição dos agregados estáveis em água foi significativamente afetada pela aplicação de DLB, principalmente na camada superficial do solo de 0–5 cm (Figura 3a). A aplicação de DLB nas diferentes doses aumentou a proporção de macroagregados de 4 a 1 mm e diminuiu os macroagregados menores de 0,5 - 0,25 mm. Já para a camada 5–10 (Figura 3b) cm as diferentes doses de DLB foram eficientes em aumentar a proporção dos macroagregados de tamanho 2-1 mm e reduziram os de tamanho 1–0,5 mm, o que também ocorreu na camada 10–20 cm (Figura 3c). Indicando a atividade das raízes na formação e estabilização desses macroagregados (Vezzani e Mielniczuk 2011), pela ação indireta do DLB, como fornecedor de nutrientes as culturas agrícolas, promovendo o maior rendimento radicular.

Esses resultados evidenciam o efeito do DLB como agente cimentante, sendo fonte de carbono ou estimulando o desenvolvimento de raízes e hifas que ligam pequenas unidades estruturais (0,5-0,25 e <0,25 mm) em maiores (> 4,0 mm) (Tisdal e Oades, 1982). A secreção de substâncias mucilaginosas liberadas pela decomposição do DLB também pode contribuir, por meio da sua incrustação com os microagregados, aumentando assim a proporção de macroagregados (Tripathi et al., 2014).

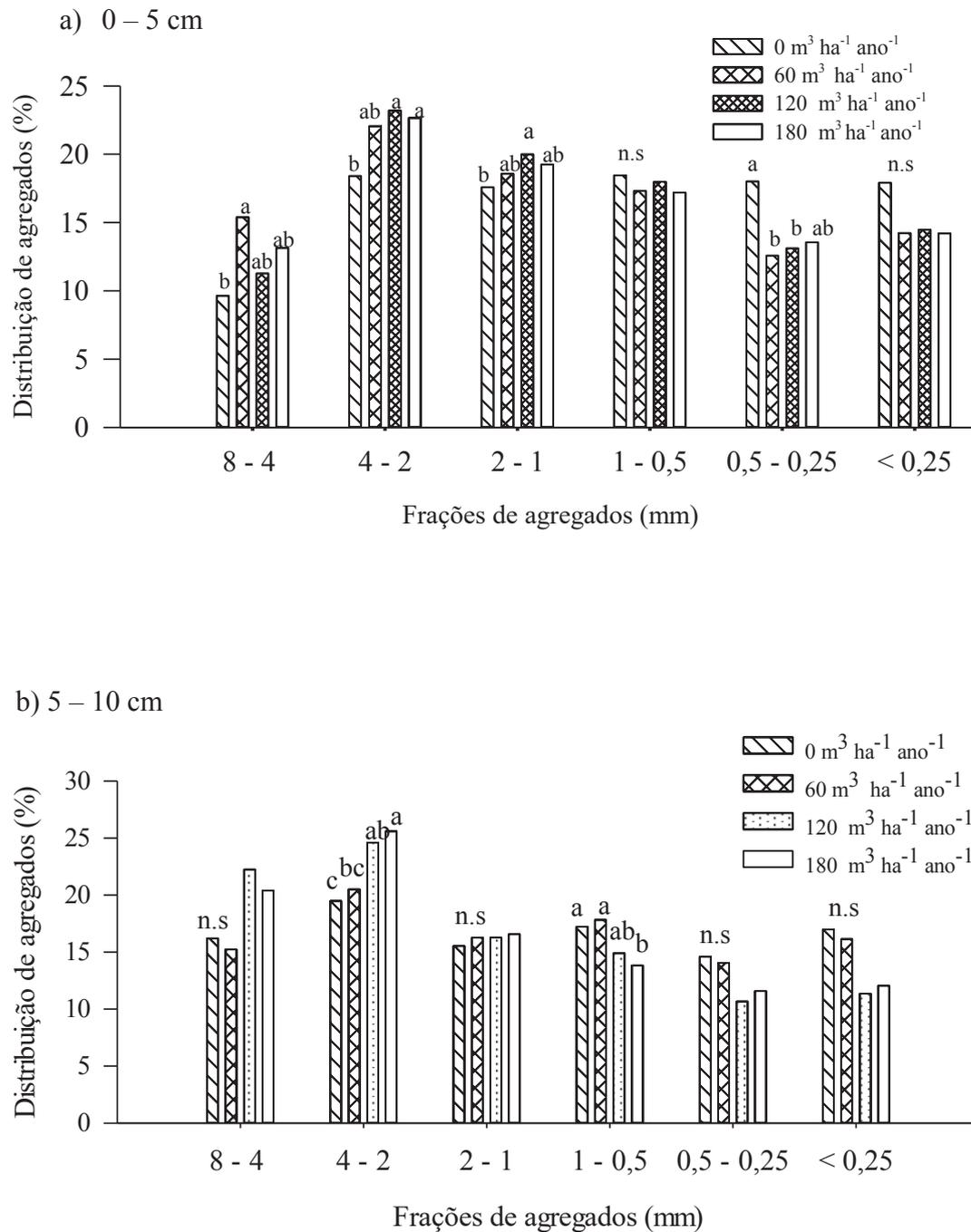
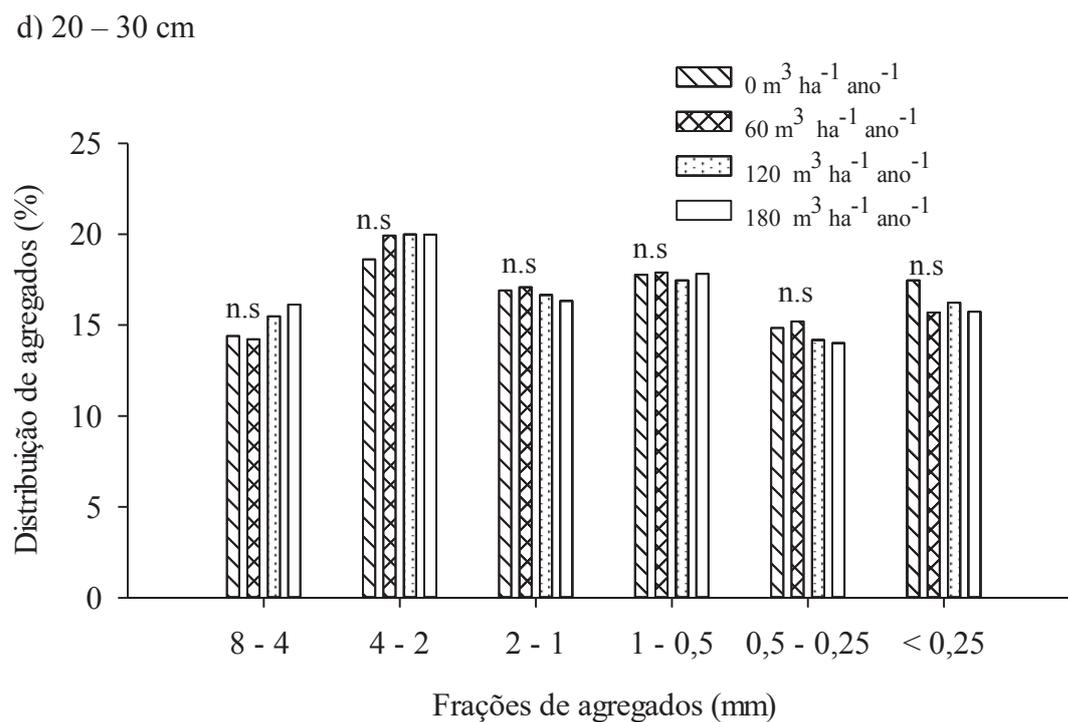
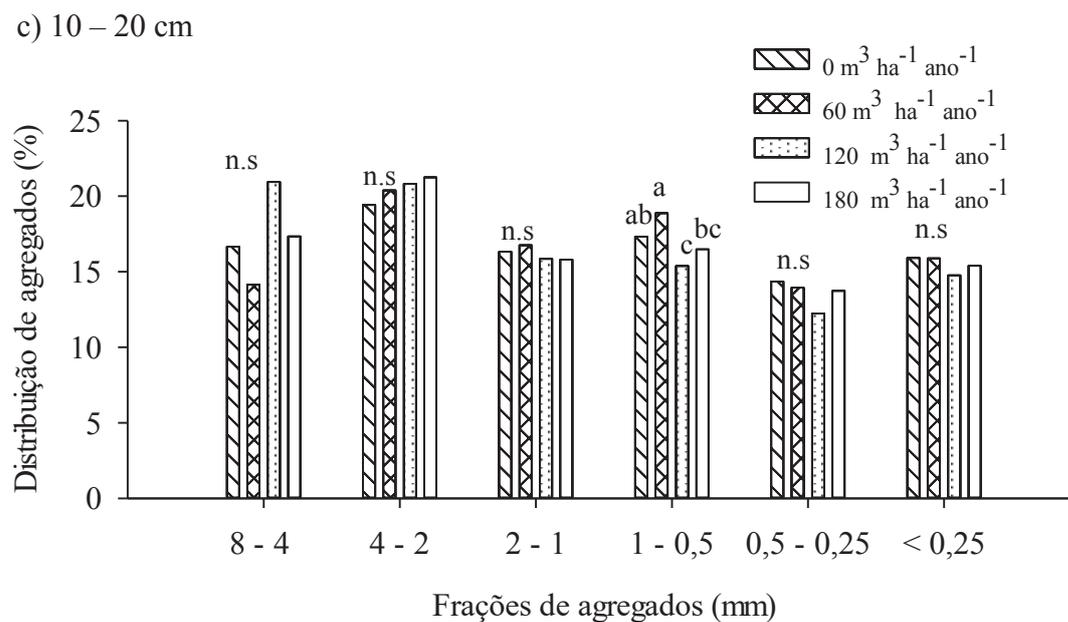


Figura 03. Distribuição dos agregados estáveis em água em classes de tamanho nas profundidades de 0-5(a), 5-10(b), 10-20(c), 20-30(d) cm em Latossolo Bruno Distrófico típico de textura muito argilosa, sob plantio direto com aplicação por 10 anos de doses (0, 60, 120 e 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) de dejetos líquido bovino (DLB). Letras minúsculas nas barras comparam as doses de DLB pelo Teste de Tukey ($p < 0,1$).



Continuação. Figura 03. Distribuição dos agregados em classes de tamanho nas camadas 0 – 5 cm (a), 5 – 10 cm (b), 10 – 20 cm (c) e 20 – 30 cm (d). Em função de diferentes aplicações de DLB de 0, 60, 120 e 180 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em um Latossolo Bruno Distrófico típico de textura muito argilosa em Castro – PR. Letras acima das barras comparam as doses dentro da mesma classe de tamanho, de acordo com teste de Tukey ($p < 0,10$).

4 CONCLUSÕES

A aplicação durante 10 anos de dejetos líquidos bovinos em Latossolo Bruno Distrófico típico de textura muito argilosa, sob sistema plantio direto aumentou os teores e o estoque de carbono orgânico do solo na camada de 0-5 cm, nas frações particuladas e associadas aos minerais do solo. O sequestro de carbono foi de aproximadamente $0,7 \text{ Mg de C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na camada 0-10 cm do solo, com aplicação de 120 e 180 m^3 de dejetos $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, indicando mitigação de emissões de CO_2 para a atmosfera e consequentemente redução dos impactos negativos nas mudanças climáticas globais.

O dejetos líquidos bovinos promoveu melhorias na qualidade estrutural do solo, por sua ação direta, no aumento da matéria orgânica do solo e indireta, fornecendo nutrientes e energia para o desenvolvimento das plantas e microrganismos. Tais ações favorecem o adequado funcionamento do sistema solo, reduzindo assim o risco potencial de degradação dos recursos naturais em sistemas agrícolas.

REFERÊNCIAS

- Abboud F. Y., Favaretto N., Motta A. C. V., Barth G., Goulart G. D. Phosphorus mobility and degree of saturations in oxisol under no-tillage after long-term dairy liquid manure application. *Soil & Tillage Research*. 2018; 177: 45-53.
- Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2004; 39: 677-683.
- Bayer C., Martin-Neto L., Mielniczuk J., Ceretta C.A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil and Tillage Research*. 2000; 53: 95-104.
- Blair GJ, Lefroy RDB, Lise L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1995; 46: 1459–1466. <http://dx.doi.org/10.1071/AR9951459>.
- Blanco-Moure N, Gracia R, Bielsa AC, López MV. Soil organic matter fractions as affected by tillage and soil texture under semiarid Mediterranean conditions. *Soil & Tillage Research*. 2016; 155: 381-389.
- Bolinder M. A., Janzen H. H., Gregorich E.G., Angers D. A., VandenBygaart A. J., Na approach for estimating net primary productivity na annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2007; 118: 29-42.
- Carvalho JLN, Avanzi JC, Silva MLN, Mello CR, Cerri CEP. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira Ciência Solo*. 2010; 34:277-89.
- Chan KY. Consequences of changes in particulate organic carbon in vertisols under pasture and cropping. *Soil Science Society of America*. 1997; 61: 1376-1382.
- Cherobim VF, Favaretto N, Armindo RA, Barth G, Dieckow J, Pauletti V. Water infiltration post-liquid dairy manure application in no-till Oxisol. *Soil and Tillage Research*. 2015; 153: 104-111.
- Cherobim VF, Huang CH, Favaretto N. Tillage system and time post-liquid dairy manure: Effects on runoff, sediment and nutrients losses. *Agricultural Water Management*. 2017; 184: 96-103.
- Christensen BT. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: Carter, MR, Stewart BA., eds. *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Boca Raton. 1996; CRC Press: p.97-165.

- Christensen BT. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: revision of model structure. In: Powlson DS, Smith P, Smith JV (Ed.). Evaluation of soil organic matter models. V. I, 38. Berlin: Springer-Verlag; 1996. 143-159.
- Conceição PC, Bayer C, Dieckow J, Santos DC. Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. *Ciência Rural*. 2014; 44: 794-800.
- Costa FS, Bayer C, Albuquerque JA, Fontoura SV. Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. *Ciência Rural*. 2004; 34: 587-589.
- Courtier-Murias D., Simpson A. J., Marzadori C., Baldoni G., Ciavatta C., Fernández J, M., López-de-Sá., Plaza C. Unraveling the long-term stabilization mechanisms of organic materials in soils by physical fractionation and NMR spectroscopy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2013; 171: 9-18.
- Dieckow J, Mielniczuk J, Knicker H, Bayer C, Dick DP, Kögel-Knaber I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. *Plant Soil*. 2005; 268: 319–328.
- Dimassi B., Mary B., Wylleman R., Labreuche J., Couture D., Piraux F., Cohan J.P. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. *Agric. Ecosys. Environ*. 2014; 188; 134–146.
- EMBRAPA / Fundação ABC. Mapa do levantamento semi-detalhado de solos: Município de Castro. Elaborado por: Fasolo PJ, Carvalho AP, Bognola IA, Potter RO. EMBRAPA - Fundação ABC, 2001.
- EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2. Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2011. 230 p.
- Ferreira E.B., Cavalcanti P.P., Nogueira D. A. ExpDes: Experimental Designs package. R package version 1.1.2. (2013). [internet]. [acesso em 10 out 2017] Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes>.
- García-Franco N., Albaladejo J., Almagro M., Martínez-Mena M. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem. *Soil e Tillage Research*. 2015; 153; 66-75.
- Ghosh B.N., Meena V.S., Alam N.M., Dogra P., Bhattacharyya R., Sharma N.K., Mishra P.K. Impact of conservation practices on soil aggregation and the carbon management index after seven years of maize–wheat cropping system in the Indian Himalayas. *Agriculture, Ecosystems e Environment*. 2016; 216: 247-257.
- Gilley JE, Risse LM. Runoff and Soil Loss as Affected by the Application. *Biological Systems Engineering*. 2000; 43(6): 1583-1588.
- Hall DGM, Reeve M.J, Thomasson AJ, Wright VF. Water Retention, Porosity and Density of Field Soils. *Soil Survey Tech*. 1977; 09: 340-349.

He Y. T., Zhans W. J., Xu M. G., Tong X. G., Sun F. X., Wang J. Z., Huang S. M., Zhu P., He X. H. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China. *Science of the Total Environmet*. 2015; 532: 635-644.

IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná. Cartas climáticas do estado do Paraná. 2000 [internet]. [acesso em 15 jan 2017]. Disponível em: http://www.iapar.br/Sma/Cartas_Climaticas/Cartas_Climáticas.htm.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produção pecuária municipal, Rio de Janeiro, v. 43, p.1-49, 2015.

Kemper WD, Rosenau RC. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A. *Methods of soil analysis*. Madison American Society of Agronomy, 1986. p. 425-442.

Li J., Wen Y., Li X., Li Y., Yang X., Lin Z., Song Z., Cooper J. M., Zhao B. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. *Soil e Tillage Research*. 2018; 175: 281-290.

Liang Q.L., Chen H., Gong Y., Fan M., Yang H., Lal R., Kuzyakov Y. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2012; 92: 21-33.

Maillard E, Angers D. A, Chantigny M, Bittman S, Rochette P, Lévesque G, Hunt D, Parent L.E. Carbon accumulates in organo-mineral complexes after long-term liquid dairy manure application. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2015; 202: 108-119.

Mellek JE, Dieckom J, Silva V. L, Favaretto N, Pauletti V, Vezzani F. M, Souza J. L. M. Dairy liquid manure and no-tillage: Physical and hydraulic properties and carbon stocks in a cambisol of southern Brazil. *Soil & Tillage Research*. 2010; 110: 69-76.

Mori H, F., Favaretto N., Pauletti V., Dieckow J., Santos W.L. Perda de água, solo e fósforo com aplicação de dejetos líquido bovino em latossolo sob plantio direto e com chuva simulada. *Revista Brasileira Ciência do solo*. 2009; 33: 189-198.

Pietola L., Alakukku L. Root growth dynamics and biomass input by Nordic annual Field crops. *Agriculture Ecosyst. Environ*. 2005; 108: 135-144.

Pinheiro EFM, Campos DVB, Balieiro FC, Anjos LHC, Pereira MG. Tillage systems effects on soil carbon stock and physical fractions of soil organic matter. *Agricultural Systems*. 2015; 132: 35-39.

Regelink IC, Stoof CR, Rousseva S, Weng L, Lair G, Kram P, Nikolaidis NP, Kercheva M, Banwart S, Comans RNJ. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma*. 2015; 247-248: 24-37.

- Reichert J.M., Suzuki L.E.A.S., Reinert D.J., Horn R., Hakansson. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*. 2009; 102:242-254.
- Reynolds WD, Drury CF, Tan CS, Fox CA, Yang XM. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*. 2009;152:252-263.
- Reynolds WD, Drury CF, Yang XM, Fox CA, Tan CS. Zhang TQ. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil & Tillage Research*. 2007;96:316-330.
- Reynolds WD, Drury CF, Yang XM, Tan CS. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*. 2008;146:466-474.
- Roscoe R, Machado PLOA. Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86 p.
- RStudio Team (2016). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL. [internet]. [acesso em 10 out 2017] Disponível em: <http://www.rstudio.com>
- Schmidt M. W. I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Knabner I.K., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Weiner S., Trumbore S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*. 2011; 478: 49-56.
- Silva HA, Koehler HS, Moraes A, Guimarães VD, Hack E, Carvalho PCF. Análise da viabilidade econômica da produção de leite a pasto e com suplementos na região dos Campos Gerais – Paraná. *Ciência Rural*, Santa Maria. 2008; 38: 445-450.
- Sisti CPJ, Santos HP, Kohhann R, Alves BJ, Urquiaga S, Boddey RM. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*. 2004; 76:39-58.
- Six J, Bossuyt H, Degryze S, Deneff K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*. 2004; 79: 7-31.
- Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology & Biochemistry*. 2014; 68: A4-A9.
- Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*. 1982; 33: 141-163.
- Tormena CA, Silva AP, Imhoff SDC, Dexter AR. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. *Scientia Agricola*. 2008;65:56-60.
- Tripathi R, Nayak A. K., Bhattacharyya P, Shukla A.K., Mohammad S, RajA, R, Panda B. B., Mohanty S., Kumar A., Thilagam V.K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions after 41 years long-term fertilizer experiment in tropical rice–rice system. *Geoderma*. 2014; 2013: 280-286.

- Vezzani FM, Mielniczuk J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo. *Revista Brasileira Ciencia do Solo*. 2011; 35: 213–223.
- Vieira FCB, Bayer C, Zabatta JA, Dieckow J, Mielniczuk J, He ZL. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. *Soil and Tillage Research*. 2007; 96: 195-204
- Wei M., Hu G., Wang H., Bai E., Lou Y., Zhang A., Zhuge Y. 35 years of manure and chemical fertilizer applications alters soil microbial community composition in a Fluvo-aquic in Northern China. *European Journal of Soil Biology*. 2017; 82: 27-34.
- Whalen JK, Hu Q, Liu A. Compost applications increase water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*. 2003; 67: 1842–1847.
- Xie H., Li J., Zhu P., Peng C., Wang J., He H., Zhang X. Long-term manure amendments enhance neutral sugar accumulation in bulk soil and particulate organic matter in a Mollisol. *Soil Biology e Biochemistry*. 2014; 78: 45-53.
- Xu X, Nieber JL, Gupta SC. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1992; 56: 1743–1750.
- Yadav R. K., Purakayastha T. J., Khan M.A., Kaushik S. C. Long-term impact of manuring and fertilization on enrichment, stability and quality of organic carbon in Inceptisol under two potato-based cropping systems. *Science of the Total Environment*. 2017; 609: 1535-1543.
- Yan Y., Tian J., Fan M., Zhang F., Li X., Christie P., Chen H., Lee J., Kuzyakov Y., Six, J. Soil organic carbon and total nitrogen in intensively managed arable soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2012; 150: 102–110.