

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS DE FREDERICO WESTPHALEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA:
AGRICULTURA E AMBIENTE

José Alcides Soares de Freitas

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E CARBONO DO SOLO APÓS
APLICAÇÕES SUCESSIVAS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE AVES E
SUÍNOS**

Frederico Westphalen, RS
2018

José Alcides Soares de Freitas

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E CARBONO DO SOLO APÓS
APLICAÇÕES SUCESSIVAS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE AVES E SUÍNOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva

Frederico Westphalen, RS
2018

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Freitas, José Alcides Soares de
Propriedades físico-mecânicas e carbono do solo após
aplicações sucessivas de resíduos orgânicos de aves e suínos
/ José Alcides Soares de Freitas.- 2018.
72 p.; 30 cm

Orientador: Vanderlei Rodrigues da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós
Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, RS, 2018

1. Adubação orgânica 2. Qualidade física do solo 3.
Dejetos 4. Matéria orgânica I. Rodrigues da Silva,
Vanderlei II. Título.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a José Alcides Soares de Freitas. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Linha Sete de Setembro s/n – BR 386, KM 40. Frederico Westphalen, RS, CEP 98400-000.

Fone: (0xx55) 99622 2651; Endereço eletrônico: agroalcides@gmail.com

José Alcides Soares de Freitas

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E CARBONO DO SOLO APÓS
APLICAÇÕES SUCESSIVAS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE AVES E SUÍNOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Agronomia**.

Aprovado em 01 de março de 2018:

Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)

Anderson Luiz Zwirtes, Dr. (IFSC)

Frederico Westphalen, RS
2018

Aos meus pais, irmãos e irmãs, pelos exemplos de honestidade, garra e fé na vida...

DEDICO...

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e pelo suporte espiritual para superar todas as dificuldades encontradas no caminho.

Aos meus familiares, minha mãe Horacélia, meu pai Luiz, meus irmãos Luiz Carlos, Júlio César e Paulo César e minhas irmãs Aline, Eva e Angelita, pelo apoio incondicional e incentivo durante toda esta caminhada.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM – FW) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Agricultura e Ambiente (PPGAAA), pela oportunidade de cursar a pós-graduação de forma gratuita e de qualidade. À Capes pela concessão da bolsa de estudo.

A todos os professores do PPGAAA, por estarem sempre dispostos a compartilhar seus conhecimentos e experiências.

Ao meu orientador, Vanderlei Rodrigues da Silva, por toda a orientação durante este trabalho, e especialmente pela amizade e confiança em meu trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Física do Solo e de Biologia e Microbiologia do Solo, pelo companheirismo de todos os dias, incluindo conversas divertidas, chimarrão, churrascos e futebol. Minha rotina de pesquisa foi menos tensa graças a vocês!

Aos amigos técnicos de laboratório, por todo o suporte nas análises laboratoriais.

Aos componentes da banca examinadora desse trabalho, pelas contribuições e críticas construtivas.

Enfim a todos que de alguma forma participaram e acompanharam minha jornada no desenvolvimento deste trabalho.

A todos vocês, muito obrigado.

RESUMO

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E CARBONO DO SOLO APÓS APLICAÇÕES SUCESSIVAS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DE AVES E SUÍNOS

AUTOR: José Alcides Soares de Freitas
ORIENTADOR: Vanderlei Rodrigues da Silva

A adubação das culturas agrícolas com resíduos orgânicos oriundos da suinocultura e da avicultura é uma prática bastante difundida entre os agricultores brasileiros e resulta em ganhos de produtividade principalmente em função do conteúdo de nutrientes presentes nesses materiais. Por outro lado, a adição continuada de resíduos orgânicos pode resultar em alterações nas propriedades físicas e no comportamento mecânico do solo, aumentando ou reduzindo a sua qualidade e influenciando no crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas. Nesse sentido, este estudo objetivou investigar a influência de aplicações de doses crescentes de dejetos líquidos de suínos e de cama de aves, ao longo de quatro anos, sobre as propriedades físicas, mecânicas e carbono orgânico de um Latossolo Vermelho muito argiloso da região do Médio Alto Uruguai, no Rio Grande do Sul. Para isso, conduziu-se um experimento em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições e com os tratamentos: 1-Testemunha (T1): sem aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS) ou cama de aves (CA); 2- DLS160: Aplicação superficial de $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de DLS; 3- DLS320: Aplicação superficial de $320 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de DLS; 4- DLS480: Aplicação superficial de $480 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de DLS; 5- CA6: Aplicação superficial de $6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CA; 6- CA12: Aplicação superficial de $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CA e; 7- CA18: Aplicação superficial de $18 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CA. Em todos os tratamentos, a dose anual foi dividida em quatro aplicações, sendo feita uma em cada estação do ano. Foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas nas camadas de 0,00 – 0,05 m, 0,05 – 0,10 m e de 0,10 – 0,20 m, nas quais foram avaliadas as variáveis: conteúdo de carbono orgânico, densidade do solo, densidade máxima, densidade relativa, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, resistência mecânica à penetração, pressão de preconsolidação, índice de compressão, estabilidade de agregados em água, argila dispersa em água, grau de flocculação e ainda, a taxa de infiltração de água no solo. As aplicações de DLS e de CA aumentaram os teores superficiais de carbono orgânico do solo, porém não foram observadas diferenças significativas entre os dois resíduos utilizados. Na camada de 0,00 a 0,05 m, a densidade do solo foi reduzida enquanto a porosidade total e macroporosidade foram aumentadas em função das adições de DLS e de CA. Não foram encontradas alterações significativas na resistência mecânica à penetração e na pressão de preconsolidação do solo. O DMG e o DMP dos agregados do solo não foram afetados pelas adições dos resíduos orgânicos, e o conteúdo de argila dispersa em água decresceu com o aumento dos teores de carbono orgânico, enquanto o grau de flocculação aumentou. Não foram verificados efeitos significativos sobre a taxa de infiltração de água no solo.

Palavras-chave: Adubação orgânica. Qualidade física do solo. Dejetos. Matéria orgânica.

ABSTRACT

PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES AND SOIL CARBON AFTER SUCESSIVE APPLICATION OF POULTRY AND SWINE ORGANIC WASTE

AUTHOR: José Alcides Soares de Freitas

ADVISOR: Vanderlei Rodrigues da Silva

The fertilization of agricultural crops with organic residues from swine and poultry farming is a widespread practice among Brazilian farmers and results in productivity gains mainly due to the content of nutrients present in these materials. On the other hand, the continued addition of organic residues can result in changes in the physical properties and mechanical behavior of the soil, increasing or reducing its quality and influencing the growth and development of agricultural crops. In this sense, this study aimed to investigate the influence of high dose applications of pig slurry and poultry litter over four years on the physical, mechanical properties and organic carbon of a very clayey Red Latosol of the Upper Middle Uruguay, in Rio Grande do Sul. For this, an experiment was carried out in a randomized complete block design with four replicates and treatments: 1- Control (T1): without application of pig slurry (DLS) or poultry litter (CA); 2- DLS160: Surface application of $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of DLS; 3- DLS320: Surface application of $320 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of DLS; 4- DLS480: Surface application of $480 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of DLS; 5- CA6: Surface application of $6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of CA; 6- CA12: Surface application of $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of CA e; 7- CA18: Surface application of $18 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of CA. In all treatments, the annual dose was divided into four applications, being made one in each season of the year. Deformed and undeformed soil samples were collected in the layers of 0.00 - 0.05 m, 0.05 - 0.10 m and 0.10 - 0.20 m, in which the following variables were evaluated: organic carbon content, soil density, maximum density, relative density, total porosity, macroporosity, microporosity, mechanical resistance to penetration, preconsolidation pressure, compression index, stability of aggregates in water, clay dispersed in water, flocculation degree and infiltration of water in the soil. The DLS and CA applications increased the soil organic carbon content, but no significant differences were observed between the two residues used. In the 0.00 to 0.05 m layer, soil density was reduced while total porosity and macroporosity were increased as a function of DLS and CA additions. No significant changes were observed in the mechanical resistance to penetration and soil preconsolidation pressure. DMG and DMP from the soil aggregates were not affected by the additions of the organic residues, and the clay content dispersed in water decreased with increasing organic carbon contents, while the degree of flocculation increased. No significant effects on soil water infiltration rate were observed.

Key words: Organic fertilization. Physical soil quality. Waste. Organic matter.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1-Relação entre a densidade e a macroporosidade do Latossolo Vermelho estudado.33
- Figura 2-Relações existentes entre a umidade gravimétrica e densidade do solo com a densidade máxima obtida no ensaio de compressão uniaxial na pressão de 1600 kPa.....35
- Figura 3-Relações do grau de compactação com a porosidade total (A), macroporosidade (B) e microporosidade (C) encontradas no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....38
- Figura 4-Resistência do solo à penetração após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.41
- Figura 5-Relações da resistência do solo à penetração com a densidade do solo (A); Porosidade total (B) e macroporosidade (C) encontradas no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....42
- Figura 6-Pressão de preconsolidação do Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....44
- Figura 7-Relações do índice de compressão com o teor de carbono orgânico do solo (A); Densidade do solo (B); Grau de compactação (C) e porosidade total (D) encontradas no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....49
- Figura 8-Distribuição da massa dos agregados por classes de diâmetro no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....51
- Figura 9-Relação entre carbono orgânico total e argila dispersa em água, no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....59
- Figura 10-Taxa de infiltração básica de água no Latossolo Vermelho após quatro anos de adição de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Estimativa da produção diária para cada animal em diferentes fases da produção.	14
Tabela 2-Teores de argila, silte e areia da camada de 0 – 20 cm do solo utilizado no estudo.	22
Tabela 3-Teores de carbono orgânico no Latossolo Vermelho após quatro anos sob aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....	29
Tabela 4-Densidade do solo, densidade máxima e densidade relativa para o Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicação de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....	31
Tabela 5-Matriz da correlação de Pearson entre algumas das variáveis estudadas no Latossolo Vermelho após quatro anos sob aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....	34
Tabela 6-Porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....	36
Tabela 7-Umidade gravimétrica e volumétrica do solo após equilíbrio na tensão de 6 kPa para a realização do ensaio de compressão uniaxial e da resistência à penetração.....	40
Tabela 8- Matriz da correlação de Pearson para a pressão de preconsolidação e índice de compressão após quatro anos sob aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....	45
Tabela 9-Índices de compressão no Latossolo Vermelho após quatro anos de adição de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....	47
Tabela 10-Coeficientes de correlação de Pearson para os parâmetros de agregação do Latossolo Vermelho.....	54
Tabela 11-Médias de argila dispersa em água e grau de floculação do Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.....	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:.....	14
2.1 PRODUÇÃO, TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS DEJETOS E RESÍDUOS NA SUINOCULTURA BRASILEIRA.....	14
2.2 PRODUÇÃO, TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS DEJETOS E RESÍDUOS NA AVICULTURA BRASILEIRA.....	16
2.3 A ADUBAÇÃO ORGÂNICA E OS ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO	17
2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS INFLUENCIADAS POR ADIÇÕES DE RESÍDUOS ORGÂNICOS	19
2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS SOLOS INFLUENCIADAS POR ADIÇÕES DE RESÍDUOS ORGÂNICOS	20
3 METODOLOGIA.....	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 CARBONO ORGÂNICO	29
4.2 DENSIDADE, DENSIDADE MÁXIMA E DENSIDADE RELATIVA DO SOLO.....	31
4.3 POROSIDADE TOTAL, MACROPOROSIDADE E MICROPOROSIDADE.....	36
4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP)	40
4.5 PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO E ÍNDICE DE COMPRESSÃO	43
4.6 ESTABILIDADE DE AGREGADOS EM ÁGUA.....	50
4.7 ARGILA DISPERSA EM ÁGUA E GRAU DE FLOCULAÇÃO.....	55
4.8 TAXA DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	60
5 CONCLUSÃO.....	62
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	63

1 INTRODUÇÃO

A produção brasileira de carnes e derivados de suínos e de aves se destaca no cenário mundial e apresentou crescimento acentuado nas últimas décadas, assumindo enorme importância econômica e social para o país. Atualmente o Brasil é o segundo maior produtor e maior exportador mundial de carne de frango, bem como é o quarto maior produtor e exportador mundial de carne suína, com destaque da região Sul em ambas as atividades (ABPA, 2017).

Diante do grande volume de dejetos e resíduos produzidos por essas cadeias produtivas, surge a preocupação com a correta destinação desse material de forma a minimizar os impactos ambientais possibilitando a continuidade da produção. Dessa forma, diversos estudos investigaram o uso de dejetos de suínos e de cama de aves na fertilização de culturas agrícolas como milho, feijão, soja, trigo (SARTOR et al., 2012; CASSOL et al., 2012), entre outras culturas, mostrando grande potencial de uso para essa finalidade, o que se justifica pelos teores de macro e micronutrientes encontrados nesses materiais (CQFS-RS/SC, 2016). Porém, são menos abundantes os estudos que investigaram os efeitos da utilização desses resíduos orgânicos sobre as propriedades físicas do solo (AGNE & KLEIN, 2014; COMIN et al., 2013), necessitando nesse sentido, de maior atenção das pesquisas agrícolas.

A adubação das culturas com dejetos animais proporciona ao longo do tempo melhorias nas propriedades físicas do solo, criando condições mais favoráveis ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas, que em função disso, expressam melhor seu potencial produtivo. As alterações mais pronunciadas incluem reduções na densidade do solo e aumentos na porosidade (MELLEK et al., 2010; HATI et al., 2006), reduções na resistência do solo à penetração (RAUBER et al., 2012), aumento na estabilidade dos agregados (COMIN et al., 2013; BANDYOPADHYAY et al., 2010) e com isso, aumento na taxa de infiltração de água no solo (BARZEGAR et al., 2002). Entretanto, a ocorrência ou não de modificações na estrutura do solo com a adubação orgânica, bem como a magnitude dessas modificações, dependem de fatores relacionados ao clima da região, ao tipo de solo e ao tipo e quantidade do material orgânico adicionado (HERENCIA et al., 2011), justificando a necessidade da realização de estudos em diferentes regiões, com diferentes solos e diferentes dejetos.

Além disso, poucos estudos abordaram a influência da adubação orgânica sobre as propriedades mecânicas do solo, como a pressão de preconsolidação e o índice de

compressão, o que indica deficiência de informações a respeito da interação entre adubação orgânica e a compactação do solo, que atualmente consiste em um grave problema em grande parte das áreas de produção agrícola. Tendo em vista que a adição frequente ao solo de dejetos de animais pode elevar o seu conteúdo de carbono orgânico (MAFRA et al., 2014), são esperados efeitos também sobre o comportamento compressivo do solo e consequentemente sobre o processo de compactação, visto que solos com maior conteúdo de carbono orgânico possuem maior elasticidade e resiliência (BRAIDA et al., 2010; BRAIDA et al., 2008).

Partindo da hipótese de que adições continuadas de resíduos orgânicos, oriundos de criações de animais, podem modificar a qualidade física e o comportamento mecânico do solo, desenvolveu-se o presente estudo, que teve como objetivo investigar a influência das aplicações de doses crescentes de dejetos líquidos de suínos e de cama de aves, ao longo de quatro anos, sobre as propriedades físicas, hídricas, mecânicas e conteúdo de carbono orgânico de um Latossolo Vermelho muito argiloso da região do Médio Alto Uruguai, no Rio Grande do Sul, cultivado com pastagem perene.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUÇÃO, TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS DEJETOS E RESÍDUOS NA SUINOCULTURA BRASILEIRA

A posição de destaque ocupada pelo Brasil no cenário da suinocultura mundial revela a grande relevância econômica e social desta cadeia produtiva no país. Atualmente o Brasil é quarto maior produtor e exportador mundial de carne suína (ABPA, 2017), com produção distribuída em todas as regiões. A região sul do Brasil se destaca entre as demais regiões, respondendo no ano de 2015 por 66,1% dos abates, dos quais o estado de Santa Catarina respondeu por 26,2%, seguido do Rio Grande do Sul com 20,2% e Paraná com 19,7% (IBGE, 2016). A suinocultura desta região se caracteriza pela produção integrada ou cooperada (81 % das granjas), contendo 96% das granjas de terminação e 95% dos crechários da suinocultura nacional (ABCS, 2016).

No sistema de criação predominante no Sul do Brasil os animais ficam confinados em galpões especiais, nos quais os dejetos são retirados por lavagem, sendo direcionados a esterqueiras onde ficam armazenados para estabilização anaeróbia e posterior descarte. Os dejetos suínos são constituídos por fezes, urina, água desperdiçada pelos bebedouros e de higienização, resíduos de ração, pêlos, poeiras e outros materiais decorrentes do processo criatório (DIESEL et al., 2002). Segundo Dartora et al. (1998) o volume de dejetos produzidos por cada suíno depende de fatores zootécnicos como o tamanho do animal, raça e atividade, fatores ambientais como a temperatura e umidade e ainda de fatores relacionados à dieta, como digestibilidade e conteúdo de fibras e de proteínas do alimento fornecido. Já Oliveira (1993) estimou a produção de dejetos para cada fase da produção (Tabela 1).

Tabela 1 - Estimativa da produção diária para cada animal em diferentes fases da produção.

Categoria de animal	Dejetos líquidos (L dia ⁻¹)
Suínos de 25 a 100 kg	7,0
Matrizes em gestação	16
Matrizes em lactação + leitões	27
Reprodutor	9,0
Leitões na creche	1,4
Média	8,6

Fonte: Adaptado de Oliveira (1993).

Diante do grande volume de dejetos gerados por essa cadeia produtiva, necessita-se de tratamentos e destinações adequados para evitar a poluição do meio ambiente. A utilização dos dejetos de suínos como fertilizante das culturas agrícolas consiste na alternativa mais praticada pelos suinocultores, o que é viabilizado pela presença de macro e micronutrientes utilizados pelas plantas (CQFS-RS/SC, 2016), permitindo complementar ou substituir a adubação com fertilizantes químicos industrializados, desde que sejam seguidos os critérios agronômicos e a legislação ambiental.

Para serem utilizados na adubação das culturas agrícolas os dejetos dos suínos precisam passar por algum processo de estabilização, o que, no caso dos dejetos líquidos, se dá pela fermentação enquanto os mesmos permanecem armazenados na esterqueira, sendo indicado o período de 90 dias para completar o processo. Sousa et al. (2014) mostraram a eficiência das lagoas de estabilização (esterqueiras) na redução do potencial poluidor dos dejetos de suínos, visto que após o período de estabilização as concentrações de metais pesados como o ferro, zinco e cobre e de nutrientes potencialmente poluidores de corpos d'água e do lençol freático, como o nitrogênio e o fósforo foram drasticamente reduzidas, comparados com os dejetos recém coletados nas instalações, atingindo valores abaixo dos estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, através da resolução número 430 de 13 de maio de 2011, para lançamento dos efluentes em corpos d'água.

Em relação ao uso dos dejetos na fertilização das lavouras, no estado de Santa Catarina a legislação ambiental permite a adição anual de até $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, seguindo as recomendações de adubação para cada cultura de acordo com laudo de análise química do solo (FATMA, 2000). Entretanto, de acordo com Scherer et al. (2010), neste mesmo estado a suinocultura é tipicamente realizada em pequenas propriedades, com relevo bastante ondulado e pequenas áreas agricultáveis, o que faz com que os dejetos sejam aplicados nas mesmas áreas em frequências e taxas superiores às recomendadas pela pesquisa agrícola e pela legislação ambiental, o que pode resultar em contaminação do solo e dos recursos hídricos. Nesse cenário justifica-se o estudo dos efeitos sobre o solo, da adição de taxas crescentes de dejetos de suínos, ampliando o conhecimento sobre os processos que podem causar problemas de ordem ambiental.

2.2 PRODUÇÃO, TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DOS DEJETOS E RESÍDUOS NA AVICULTURA BRASILEIRA

Atualmente o Brasil é o segundo maior produtor e maior exportador mundial de carne de frango (ABPA, 2017), demonstrando a magnitude desta cadeia produtiva no país, a qual adquiriu grande importância econômica, na geração de riqueza e renda, e social, com a geração de empregos diretos e indiretos. Além disso, o setor avícola nacional exerce importante papel na segurança alimentar mundial, visto que exporta carne de frango para mais de 140 países ao redor do mundo. Juntos os três estados da região Sul do Brasil responderam por 63,6% dos abates no ano de 2017, dos quais o Rio Grande do Sul foi responsável por 14,1% (ABPA, 2017).

A cama de aves é um resíduo gerado na produção de frangos ou outras aves, usada com a finalidade de proporcionar conforto as aves e reduzir lesões, proporcionando com isso melhores índices zootécnicos. No final de 4 a 6 ciclos de produção, quando é descartada, a cama será composta pelo material que foi utilizado (maravalha de madeira, casca de arroz, palhada de culturas, feno de gramíneas, entre outros), e ainda por penas, restos de ração, dejetos dos animais e descamações da pele (SILVA et al., 2011; HAHN, 2004), podendo ser aproveitada na adubação orgânica das culturas agrícolas em função do seu considerável conteúdo de macro e micronutrientes, que podem ser reaproveitados pelas plantas (CQFS – RS/SC, 2016).

Antes de ser aplicada nas lavouras, a cama de aves precisa passar pelo processo de compostagem, a partir do qual o potencial poluidor desse material é reduzido, possibilitando a sua reutilização como fonte de nutrientes para as plantas. A eficiência do processo de compostagem em reduzir o potencial poluidor da cama de aves está relacionada com o aumento brusco de temperatura que ocorre durante a fase termofílica do processo, atingindo temperaturas suficientemente altas para a eliminação de agentes patogênicos e de sementes de plantas daninhas (ORRICO JÚNIOR et al., 2010). Por outro lado, durante o processo de compostagem ocorrem perdas acentuadas de nitrogênio, reduzindo as quantidades desse nutriente fornecido às plantas via adubação orgânica com a cama de aves (VALADÃO et al., 2011; ORRICO JÚNIOR et al., 2010).

A adição ao solo do composto de cama de aves ocorre geralmente a lanco na superfície do solo e sem incorporação. O material possui potencial para uso como fertilizante (LIMA et al., 2007; SILVA et al., 2011) e pode ser usado também na recuperação física de

solos degradados por proporcionar melhorias na sua estrutura (COSTA et al., 2009). Nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina as doses a serem utilizadas variam de acordo com as exigências nutricionais da cultura e com o estado de fertilidade do solo avaliado por análise química, buscando suprir totalmente a demanda de nitrogênio, fósforo ou potássio, sendo utilizada a menor dose que supre integralmente um desses três nutrientes e complementa-se com adubação mineral o suprimento dos outros dois (CQFS – RS/SC, 2016). Apesar disso, semelhantemente ao que acontece no setor de suinocultura, muitos aviários estão instalados em pequenas propriedades ou com pequena área agricultável em função do relevo ondulado, fazendo com que a distribuição dos resíduos ocorra em taxas e intensidades maiores do que as recomendadas, justificando o papel da pesquisa na investigação dos efeitos de tal prática.

2.3 A ADUBAÇÃO ORGÂNICA E OS ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO

Com as expansões da suinocultura e da avicultura verificadas nas últimas décadas e o novo modelo de produção intensivo inserido, a disponibilidade de subprodutos, como os resíduos orgânicos foi aumentada. Por outro lado, o melhoramento genético das plantas e os avanços das tecnologias no campo possibilitaram alavancar a produtividade das culturas agrícolas, aumentando a sua demanda nutricional e encarecendo a produção em função do elevado custo dos fertilizantes minerais. Nesse cenário, a adubação orgânica passou a ser amplamente adotada, principalmente em regiões tradicionalmente produtoras de suínos e aves onde os produtores dispõem dos resíduos com baixo custo, unindo a demanda ambiental de descarte correto dos resíduos orgânicos, com a redução nos custos de produção das culturas agrícolas (SARTOR et al., 2012; CASSOL et al., 2012),

A manutenção e a elevação dos estoques de carbono do solo são atualmente consideradas importantes estratégias na mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO_2), um importante gás que, juntamente com outros gases (CH_4 , N_2O , O_3), interage com a radiação infravermelha emitida pela terra e ocasiona o chamado efeito estufa (MACHADO, 2005). Práticas de agricultura conservacionista como o Sistema de Plantio Direto contribuem para aumentar e manter os estoques de carbono no solo, tanto pela adição constante de palhada em superfície como também pelo não revolvimento do solo, reduzindo a exposição do material orgânico à ação dos microrganismos (MACHADO, 2005; MACHADO & SILVA, 2001; BAYER & BERTOL, 1999). As adições de fontes de matéria orgânica ao solo, como os

resíduos orgânicos provenientes de criações de animais, também contribuem para a elevação dos estoques de carbono no solo, seja de maneira direta pelo carbono contido no próprio resíduo ou de maneira indireta pelo aumento da produção de fitomassa em função dos efeitos nutricionais (MAFRA et al., 2014).

Apesar disso, apenas uma pequena parcela de todo o material orgânico adicionado ao solo pelos resíduos orgânicos de origem animal ou vegetal é transformada em matéria orgânica estável, sendo a maior parte desse material degradado pelos microrganismos decompositores, que liberam para a atmosfera o carbono retido, na forma de dióxido de carbono (BRADY & WEIL, 2013). Ainda de acordo com esses autores, parte do carbono adicionado pelos resíduos orgânicos é transformada em húmus, uma substância protegida quimicamente da decomposição microbiana em função da complexidade da molécula, e protegida fisicamente por partículas de argila que se ligam fortemente, formando complexos argila-húmus.

Dessa forma, de todo o carbono adicionado pelos materiais orgânicos, apenas essa pequena fração que resistiu ao ataque microbiano permanecerá no solo incrementando o conteúdo de matéria orgânica. O incremento nos teores de matéria orgânica do solo resulta em benefícios agrônômicos consideráveis, como maior capacidade de troca de cátions e ciclagem de nutrientes, melhorias na agregação e na capacidade de retenção de água, além de aumentar a biodiversidade tanto da macrofauna quanto da microfauna do solo por ser fonte de alimento para esses organismos (BRADY & WEIL, 2013; ROSCOE et al., 2006). Entretanto, de acordo com Bayer & Mielniczuk (2008), o conteúdo de matéria orgânica do solo depende do balanço entre as entradas por humificação e as saídas por respiração microbiana, e esses dois componentes são significativamente afetados por fatores como temperatura, umidade, textura e mineralogia do solo e pelas práticas de manejo como o grau de revolvimento.

Dessa forma, enquanto em algumas condições as aplicações de resíduos orgânicos oriundos de criações de animais proporcionam respostas significativas, com aumentos nos níveis de carbono orgânico no solo (MAFRA et al., 2014; LOURENZI, 2010), em outras os efeitos são pequenos ou não significativos, precisando muitas vezes de longos períodos de aplicações para se manifestarem (AGNE & KLEIN, 2014; ARRUDA et al., 2010). Nesse contexto, ressalta-se a relevância de estudos relacionados à dinâmica da matéria orgânica em diferentes classes de solos, localizados em diferentes regiões e usando como fontes de carbono, resíduos orgânicos oriundos de diferentes criações de animais.

2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS INFLUENCIADAS POR ADIÇÕES DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

As importantes funções desempenhadas pela matéria orgânica do solo em processos físicos, químicos e biológicos, sinalizam que variações em seu conteúdo podem acarretar em modificações na qualidade do solo de tal forma que influencie no desenvolvimento das plantas. Na estrutura do solo, a matéria orgânica humificada tem participação essencial como agente cimentante no processo de formação e estabilização dos microagregados, atuando a partir da ligação com cátions polivalentes e, posteriormente, com as partículas de argila, formando complexos argila-húmus de alta estabilidade (BRADY & WEIL, 2013). A partir disso, agregados maiores são formados através da união de microagregados, seguindo a teoria da hierarquia de agregação proposta por Tisdall & Oades (1982).

A predominância no solo de agregados grandes e estáveis é sinônimo de qualidade estrutural e de ambiente adequado para o crescimento radicular das plantas, visto que a agregação influencia processos importantes como a aeração do solo, a infiltração e retenção de água e na resistência à compactação e à erosão hídrica (KLEIN, 2014; BRAIDA et al., 2011). A adoção de estratégias de manejo que possibilitem incrementos no conteúdo de carbono orgânico, juntamente com o emprego de práticas complementares de conservação do solo, são medidas eficientes para a melhoria da qualidade estrutural. Diversos estudos já mostraram a estreita relação entre o teor de carbono no solo e a estabilidade e tamanho dos agregados (VICENTE et al., 2012; SALTON et al., 2008). Dessa forma, a adoção do sistema de plantio direto em detrimento do plantio convencional possibilita ao solo maior acúmulo de carbono, melhorando a qualidade estrutural, o que é verificado por incrementos no diâmetro e na estabilidade dos agregados (LOSS et al., 2015).

A adição ao solo de resíduos orgânicos, como os oriundos de criações de suínos e aves, pode ser uma estratégia para melhorar a qualidade estrutural. Bandyopadhyay et al. (2010) na Índia e Barzegar et al. (2002) no Irã, obtiveram aumento no diâmetro médio dos agregados do solo com a adubação orgânica, o que culminou em uma série de melhorias na qualidade física, como redução da densidade e da resistência mecânica do solo à penetração e o aumento do volume de poros, da taxa de infiltração e da retenção de água no solo. Em solos brasileiros também foi identificada maior qualidade estrutural com o uso da adubação orgânica em alguns estudos (COMIN et al., 2013; COSTA et al., 2009). Já em outros, essas melhorias na agregação do solo não foram verificadas (AGNE & KLEIN, 2014; ARRUDA et

al., 2010) e alguns relataram, ainda, efeitos de dispersão da argila e redução da massa de macroagregados com a adição de dejetos de suínos (BARBOSA et al., 2015). Essa grande variabilidade de resultados obtidos se deve ao fato de que fatores relacionados ao clima e ao tipo de material orgânico adicionado influenciam diretamente na dinâmica da decomposição, além de que, é fato conhecido que a velocidade e a intensidade das modificações que ocorrem no solo com a adubação orgânica são inversamente proporcionais à qualidade estrutural inicial, de forma que solos argilosos, geralmente com maior estabilidade, respondem menos do que solos arenosos, geralmente com menor estabilidade (HERENCIA et al., 2011; COSTA et al., 2009; WEIL & KROONTJE, 1979).

As adições de resíduos orgânicos em taxas e condições adequadas resultam em reduções na densidade e na resistência do solo à penetração e em aumentos na porosidade total e na macroporosidade (CORRÊA et al., 2011; MELLEK et al., 2010; HATI et al., 2006). Densidades elevadas nos solos agrícolas resultam em elevada resistência à penetração, impondo restrições ao aprofundamento do sistema radicular das culturas, limitando a absorção de água e nutrientes (BEUTLER & CENTURION, 2004). Por outro lado, o aumento do volume total de poros, sejam eles microporos ou macroporos, é desejável agronomicamente, pois os primeiros estão diretamente ligados com a retenção de água e os segundos com a aeração, infiltração de água no solo e crescimento de raízes (KLEIN, 2014).

2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS SOLOS INFLUENCIADAS POR ADIÇÕES DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

A pressão de preconsolidação é um parâmetro bastante utilizado para estimar a capacidade de suporte de cargas do solo, ou seja, ela representa a máxima carga que pode ser aplicada ao solo sem causar um aumento no estado de compactação do mesmo (CASAGRANDE, 1936; DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995; IMHOFF et al., 2004), podendo ser utilizada no estabelecimento de estratégias de prevenção da compactação dos solos agrícolas (IMHOFF et al., 2004). O tráfego das máquinas agrícolas durante as operações de preparo do solo e manejo das culturas, bem como o pisoteio dos animais em áreas de pastagens, aplicam sobre o solo pressões que podem ser maiores ou menores do que a pressão de preconsolidação. Quando menores, as deformações causadas serão pequenas e recuperáveis, não acarretando em prejuízos para a qualidade estrutural, ao passo que quando as pressões aplicadas excedem a pressão de preconsolidação, as deformações são grandes e

não recuperáveis, ocasionando aumento do estado de compactação do solo o que pode significar comprometimento da qualidade estrutural (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995).

O índice de compressão é um indicativo da suscetibilidade do solo à compactação e, assim como a pressão de preconsolidação, é obtido através do estudo da curva de compressão do solo, construída a partir do ensaio de compressão uniaxial (IMHOFF et al., 2004; DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995). A facilidade com que um solo se deforma quando submetido a pressões pode ser definida como compressibilidade do solo (IMHOFF, 2002), e essa depende de fatores externos como tipo, intensidade e frequência da carga aplicada e de fatores internos como histórico de pressões sofridas, densidade, umidade, textura, estrutura e teor de carbono orgânico do solo (LEBERT & HORN, 1991). Em relação a este último, Braida et al. (2008) verificaram que um aumento nos teores de carbono orgânico no solo esteve relacionado a uma maior elasticidade e, conseqüentemente, a uma menor suscetibilidade à compactação. Nesse sentido, práticas de manejo que permitam maior acúmulo de carbono orgânico no solo podem ocasionar mudanças no comportamento do solo quando submetido a pressões externas, devendo ser adotadas como estratégias de prevenção da compactação.

O acúmulo de matéria orgânica pode aumentar ou reduzir a compressibilidade do solo. Maior compressibilidade e menor resistência à compactação são verificadas quando os efeitos predominantes da matéria orgânica sobre o solo são reduções na densidade e aumentos no volume de poros, enquanto menor compressibilidade e maior resistência à compactação ocorrem quando o efeito predominante sobre o solo é o aumento da coesão entre as partículas sólidas (BRAIDA et al., 2010; ZHANG et al., 1997). Cabe ressaltar que, de acordo com Horn & Lebert (1994), a resistência do solo às deformações é uma função do número de pontos de contato entre as partículas sólidas, o que justifica o aumento da compressibilidade do solo com as variações em sua porosidade.

A adição de resíduos orgânicos ao solo pode modificar a sua compressibilidade, através de incrementos nos teores de carbono orgânico, aumentando ou reduzindo a sua suscetibilidade à compactação. Stone & Ekwue (1996) testaram os efeitos da incorporação de lodo de esgoto sobre o comportamento mecânico do solo, verificando que esta prática aumentou a compressibilidade, reduzindo a resistência do solo à compactação. Já no estudo de Braida et al. (2010), utilizando amostras coletadas em experimentos com adição de dejetos de suínos e cama de aves, a relação entre índice de compressão e teores de carbono orgânico foi dependente da densidade e da umidade do solo, de forma que no grupo de amostras com densidades mais altas e equilibradas nos potenciais de 100 e 500 kPa, a suscetibilidade à compactação decresceu com o incremento dos teores de carbono orgânico do solo.

Diante disso, pode-se destacar a importância de estudos que relacionem a adição de resíduos orgânicos com o comportamento mecânico do solo, buscando complementar as estratégias de prevenção da compactação já existentes. Acredita-se que a integração de várias dessas estratégias, como a manutenção de palhada na superfície do solo (VISCHI FILHO et al., 2015), adequações na pressão de inflação dos pneus e na distribuição de carga nos eixos das máquinas agrícolas (MION et al., 2016; DISERENS, 2009; KELLER & ARVIDSSON, 2004), adoção do controle de tráfego (SOUZA et al., 2012) e incrementos nos teores de carbono orgânico do solo (BRAIDA et al., 2010; BRAIDA et al., 2008), podem trazer benefícios aos sistemas produtivos, reduzindo a compactação do solo e tornando o ambiente mais adequado para o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das culturas agrícolas.

3 METODOLOGIA

O estudo foi realizado em um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2013) muito argiloso (Tabela 2), localizado na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria, campus de Frederico Westphalen, no município de Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul.

Tabela 2 - Teores de argila, silte, areia e densidade de partículas da camada de 0 – 20 cm do solo utilizado no estudo.

Camada	Argila	Silte	Areia	Densidade de partículas
	-----g kg ⁻¹ -----			-----Mg m ⁻³ -----
0,00 - 0,05 m	637,2	296,7	66,2	2,8
0,05 - 0,10 m	644,0	299,5	56,4	2,8
0,10 - 0,20 m	662,0	281,9	56,2	2,8
Média	647,7	292,7	59,6	2,8

Fonte: Autor

O experimento teve início no ano de 2011, quando ocorreu o preparo do solo e a implantação da grama Tifton (*Cynodon spp.*), e foi conduzido sob Delineamento de Blocos Casualizados (DBC) em esquema 7x4, sendo sete tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram alocados em unidades experimentais com medidas de 2,5 m de comprimento e 2 m de largura. Os tratamentos utilizados foram: 1-Testemunha (T1): sem aplicação de dejetos líquidos de suínos (DLS) ou cama de aves (CA); 2- DLS160: Aplicação

superficial de $160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de DLS, divididas em quatro aplicações de $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ realizadas na metade de cada estação do ano; 3- DLS320: Aplicação superficial de $320 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de DLS, divididas em quatro aplicações de $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ realizadas na metade de cada estação do ano; 4- DLS480: Aplicação superficial de $480 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de DLS, divididas em quatro aplicações de $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ realizadas na metade de cada estação do ano; 5- CA6: Aplicação superficial de $6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CA, divididas em quatro aplicações de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ realizadas na metade de cada estação do ano; 6- CA12: Aplicação superficial de $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CA, divididas em quatro aplicações de $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ realizadas na metade de cada estação do ano e; 7- CA18: Aplicação superficial de $18 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CA, divididas em quatro aplicações de $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ realizadas na metade de cada estação do ano.

As coletas das amostras de solo foram realizadas no ano de 2016, quando o experimento contava com um histórico de quatro anos conduzido com os tratamentos acima descritos. Durante todo o período de condução do experimento a área foi mantida com grama Tifton (*Cynodon spp.*), sendo realizado o corte da mesma, utilizando roçadeira lateral à gasolina, sempre que a altura das plantas atingia próximo de 0,3 m. Após cada corte, o material vegetal foi retirado da área do experimento, de modo a não influenciar nos efeitos dos tratamentos.

Foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada nas camadas de 0,00 – 0,05 m, 0,05 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m, utilizando, para as amostras com estrutura preservada, 4 subrepetições para cada camada. As amostras com estrutura preservada foram destinadas para as determinações da densidade do solo, densidade máxima, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, pressão de preconsolidação e resistência à penetração. Já as amostras com estrutura não preservada foram destinadas para as determinações do teor de carbono orgânico, argila dispersa em água e densidade de partículas. Para a avaliação da agregação do solo foram coletados blocos de solo nas duas primeiras camadas descritas, os quais foram encaminhados ao Laboratório de Física do Solo para processamento posterior.

As amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em cilindros de aço inox medindo 0,05 m de diâmetro e 0,053 m de altura, introduzidos no solo com o auxílio de um extrator de cilindros e de um martelo pedológico. Após coletadas e preparadas em laboratório, as amostras de solo foram saturadas por capilaridade durante 24 horas e submetidas à sucção correspondente a 0,6 m de altura de coluna d'água, em mesa de tensão, momento em que foram pesadas e submetidas ao ensaio de compressão uniaxial e às medições da resistência do solo à penetração, utilizando duas subamostras para cada uma

dessas determinações. Após esses procedimentos as amostras foram levadas à estufa aquecida a 105°C permanecendo na mesma durante 24 horas para a obtenção da massa do solo seco (Donagema et al., 2011).

A umidade das amostras foi determinada a partir da pesagem das mesmas após a saída da mesa de tensão e após a secagem na estufa, utilizando a equação 1 para o cálculo da umidade gravimétrica. Para a obtenção da umidade volumétrica, multiplicou-se a umidade gravimétrica pela densidade do solo.

$$U_g = \left(\frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \right) \quad (1)$$

Em que, U_g = Umidade gravimétrica (kg kg^{-1}); M_{su} = Massa do solo úmido (kg); M_{ss} = Massa do solo seco (kg).

A densidade do solo foi obtida através da relação entre massa e volume, utilizando para cálculo a equação 2.

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad (2)$$

Em que, D_s = Densidade do solo (Mg m^{-3}); M_{ss} = massa do solo seco à 105 °C (Mg); V_t = volume total da amostra (m^3).

A densidade de partículas, usada para o cálculo da porosidade total do solo, foi determinada pelo método do balão volumétrico descrito em Donagema et al. (2011), o qual consiste em determinar o volume ocupado por determinada massa de solo, para através dessa relação massa/volume determinar a densidade das partículas do solo conforme a equação 3:

$$D_p = \left(\frac{M_{ss}}{50 - V_a} \right) \quad (3)$$

Em que, D_p = densidade das partículas do solo (g cm^{-3}); M_{ss} = massa do solo seco em estufa a 105°C (g); V_a = Volume de álcool gasto para completar os 50 cm^3 do balão volumétrico contendo a amostra de solo (cm^3).

A porosidade total foi determinada através da relação entre densidade do solo e densidade de partículas, utilizando para o cálculo a equação 4:

$$PT = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \quad (4)$$

Em que, PT = porosidade total ($m^3 m^{-3}$); D_s = densidade do solo ($Mg m^{-3}$); D_p = densidade de partícula ($Mg m^{-3}$).

A microporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão, sendo considerada igual ao volume de água que permaneceu na amostra de solo depois de equilibrada na tensão de 6 kPa (0,6 m de coluna d'água). O método consiste na pesagem das amostras depois de equilibradas neste potencial, sendo posteriormente secadas em estufa a 105°C e novamente pesadas para obtenção da massa seca da amostra (DONAGEMA et al., 2011). O cálculo da microporosidade do solo foi realizado através da equação 5:

$$\text{Microp} = \left(\frac{M_{su} - M_{ss}}{V_t} \right) \quad (5)$$

Em que, Microp = microporosidade do solo ($m^3 m^{-3}$); M_{su} = massa do solo após submetido a uma tensão de 6 kPa (Mg); M_{ss} = massa do solo seco (Mg); V_t = volume total do cilindro (m^3); Densidade da água = 1 $Mg m^{-3}$.

A macroporosidade do solo foi obtida através da diferença entre a porosidade total do solo e a sua microporosidade, conforme a equação 6:

$$\text{Macrop} = PT - \text{Microp} \quad (6)$$

Em que, Macrop = macroporosidade ($m^3 m^{-3}$); PT = porosidade total ($m^3 m^{-3}$); Microp = microporosidade ($m^3 m^{-3}$).

A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada nas amostras com umidade equilibrada na tensão de 6 kPa, utilizando para isso um penetrômetro de bancada marca Marconi, modelo MA933, com diâmetro de ponta de 4 mm, velocidade constante de penetração de 20 mm/ minuto e leitura a cada segundo. Já a pressão de preconsolidação e o índice de compressão foram determinados através do ensaio de compressão uniaxial, para o qual utilizou-se um consolidômetro automático, modelo CNTAIHM/BR-001/07 desenvolvido

por Silva et al. (2007). O equipamento é controlado através do software CA LINKER®, desenvolvido por Silva & Maschetto (2009). Foram aplicados sobre a amostra sete níveis de pressão: 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, sendo cada nível aplicado até que a amostra atinja 90% da sua deformação máxima (TAYLOR, 1971), passando para o próximo nível sem aliviar a carga. Na sequência, para o ajuste da curva de compressão do solo e cálculo da pressão de preconsolidação e do índice de compressão, utilizou-se o suplemento Excel (SCC) desenvolvido por Gubiani et al. (2014a). Para a estimativa da pressão de preconsolidação utilizou-se o procedimento de Casagrande (1936) operacionalizado matematicamente com a equação de Van Genuchten (1980).

Também a partir do ensaio de compressão uniaxial determinou-se a densidade máxima do solo, a qual foi considerada igual à densidade do solo no final da aplicação do nível de pressão de 1600 kPa. A densidade relativa ou grau de compactação foi obtida pela divisão da densidade do solo pela densidade máxima.

A distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água foi avaliada seguindo a metodologia descrita por Kemper & Chepil (1965). Para isso, inicialmente procedeu-se o preparo da amostra com a fragmentação manual do bloco de solo em agregados menores, de forma que os mesmos passassem pela peneira de 8 mm e ficassem retidos na peneira de 4,76 mm para formar a amostra, deixando-os secar ao ar. Após secos, três subamostras de 25g foram pesadas, das quais uma foi utilizada para a determinação da umidade e as outras duas são destinadas ao teste, sendo essas últimas umedecidas por capilaridade através do contato com uma lâmina de água por 10 minutos. Terminada a etapa de umedecimento as amostras foram colocadas na primeira peneira do conjunto, o qual é formado por quatro peneiras com diâmetros de 4,76; 2,00; 1,00 e 0,21 mm, e foram submetidas à oscilação vertical, com 32 oscilações/minuto, submersas em água em aparelho de Yoder durante 10 minutos. Na sequência o material retido em cada peneira foi transferido para latas de alumínio previamente pesadas e levados à estufa aquecida a 105°C por 24 horas para obtenção da massa de solo seco em cada peneira. Por último, para determinar o conteúdo de materiais não agregados (areias, pedras, materiais inertes e outros) retidos em cada peneira, o conteúdo da lata foi recolocado na sua respectiva peneira e submerso em solução de hidróxido de sódio a 6%, sendo novamente transferido para a lata de alumínio, secado em estufa e pesado o material que permanecer retido na peneira. Os cálculos dos índices de agregação diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) ocorreram respectivamente, com as equações 7 e 8.

$$DMP = \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_i) \quad (7)$$

Em que, DMP = diâmetro médio ponderado (mm); y_i = diâmetro médio entre classes (mm); x_i = proporção de cada classe em relação ao peso da amostra total.

$$DMG = EXP \frac{\sum_{i=1}^N y_p \log x_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad (8)$$

Em que, DMG = diâmetro médio geométrico (mm); y_p = peso dos agregados de cada classe (g); y_i = diâmetro médio entre classes (mm); x_i = proporção de cada classe em relação ao peso da amostra total.

A argila dispersa em água foi determinada usando o método de dispersão descrito por Suzuki et al. (2015). Para isso foram pesadas 20 g de solo e alocadas em um frasco snap cap juntamente com 60 ml de água destilada, transferindo-se o frasco para agitador horizontal onde as amostras foram agitadas durante quatro horas. Após isso, o conteúdo do frasco foi transferido para proveta de 1000 ml, completando-se o seu volume com água. Após medida a temperatura da água, esperou-se o tempo de sedimentação definido pela lei de Stokes e pipetou-se 50 ml a uma profundidade de 5 cm, transferindo-se essa solução para um béquer previamente pesado, o qual foi encaminhado à estufa aquecida a 105°C por 24 horas afim de determinar a massa da argila pipetada. Por fim o cálculo da argila dispersa em água foi realizado seguindo a equação 9.

$$ADA = \left(\frac{P_{arg}}{P_i} \right) \times 20 \times 100 \quad (9)$$

Em que, ADA = argila dispersa em água (%); P_{arg} = peso da argila (g); P_i = peso inicial da amostra (g).

A determinação do conteúdo de carbono orgânico foi realizada nas amostras deformadas coletadas e moídas manualmente em cadinho de porcelana, sendo seguido o método descrito por Yeomans & Bremner (1988). Para isso pesaram-se entre 0,20 e 0,50 g de solo, o qual foi transferido para tubo de vidro de 2,5 cm de diâmetro e 25 cm de altura. Em

seguida foram adicionados 10 mL de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ 0,067 mol L⁻¹) e, posteriormente, 15 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) já na capela de exaustão, onde os tubos foram colocados em bloco de digestão pré-aquecido a 150 °C, permanecendo neste por 30 minutos. Passado este tempo, aguardou-se 15 minutos para resfriamento dos tubos e verteu-se o conteúdo para erlenmeyer juntamente com 80 mL de água destilada. Na sequência as amostras foram tituladas com sulfato ferroso amoniacal $[Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O]$ 0,2 mol L⁻¹, na presença de três gotas da solução indicadora ferroína, até observar-se a mudança da cor verde para violeta. Para cada bateria de 40 amostras de solo utilizaram-se 3 provas em branco. Anotou-se o volume de sulfato ferroso amoniacal gasto e determinou-se o conteúdo de carbono orgânico do solo através da equação 10.

$$COT = \frac{(Vol_{SFA}BR - Vol_{SFA}Solo) \times MOL \text{ do SFA} \times 12.01}{3 \times MS_a \times 1.14} \quad (10)$$

Onde, COT = carbono orgânico total (g kg⁻¹); Vol_{SFA}BR = volume de sulfato ferroso amoniacal gasto para titular a amostra branco (cm³); Vol_{SFA}Solo = volume de sulfato ferroso amoniacal gasto para titular a amostra com solo (cm³); MOL do SFA = molaridade do sulfato ferroso amoniacal e MS_a = massa da amostra (g).

Para a medição da taxa de infiltração de água no solo adotou-se o método dos cilindros concêntricos, descrita em Klein (2014). Para isso utilizaram-se dois cilindros, o maior com 0,4 m de diâmetro e o menor com diâmetro de 0,2 m, os quais foram inseridos no solo de forma concêntrica, a uma profundidade de aproximadamente 0,15 m para o cilindro interno e de 0,05 m para o cilindro externo. Após inseridos no solo, ambos os cilindros foram mantidos com uma lâmina de água de aproximadamente 0,03 m, usando para o cilindro interno um dispositivo reservatório para nivelar automaticamente a lâmina de água. A medida da taxa de infiltração de água no solo foi realizada no cilindro menor e a função do cilindro maior foi a de evitar a infiltração lateral da água. A duração de cada teste foi de aproximadamente 120 minutos ou o teste foi considerado encerrado quando a mesma leitura se repetiu pelo menos três vezes consecutivas, sendo essa leitura considerada a taxa de infiltração estável de água no solo.

Os dados gerados foram submetidos à análise de variância e quando o efeito dos tratamentos foi significativo foi realizada a comparação de médias por meio do teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Para a análise de variância, teste de Tukey e testes de correlação linear utilizou-se o software estatístico “R” (R Core Team, 2014).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARBONO ORGÂNICO

Os maiores teores de carbono orgânico (CO) foram verificados na camada superficial (0,00 – 0,05 m) em todos os tratamentos e diminuíram em profundidade (Tabela 3). O aumento dos teores de carbono na superfície do solo pode ser explicado através dos efeitos diretos, devido a aplicação dos resíduos orgânicos em superfície, e pelos efeitos indiretos, através da estimulação ao crescimento de raízes nessa camada, resultando em maior biomassa.

Tabela 3 - Teores de carbono orgânico no Latossolo Vermelho após quatro anos sob aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.

Camada	T1	DLS160	DLS320	DLS480	CA6	CA12	CA18	Média	CV (%)
-----Carbono orgânico total (g kg ⁻¹)-----									
0,00 - 0,05 m	19,69 b*	23,68 ab	28,42 a	27,82 a	24,95 ab	24,23 ab	24,77 ab	25,65	13,63
0,05 - 0,10 m	21,91 ab	21,00 ab	18,29 b	22,16 ab	25,51 a	20,96 ab	21,81 ab	21,62	11,14
0,10 - 0,20 m	12,79ns ¹	11,72	10,04	15,07	12,19	11,39	12,41	12,14	24,82
Média	18,13	18,80	18,92	21,68	20,88	18,86	19,66	-	-

*Médias na camada seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ¹ns = não significativo.

Fonte: Autor

O tratamento sem aplicação de DLS e CA obteve o menor teor de carbono orgânico após quatro anos de condução do experimento, comprovando que a adição ao solo de resíduos orgânicos ao longo dos anos é capaz de proporcionar um incremento nos teores de carbono estocados no solo. Lourenzi (2010) em um experimento com a aplicação de dejetos de suínos em um Argissolo durante oito anos verificou incremento nos teores de matéria orgânica do solo até uma profundidade de 0,6 m. Já Arruda et al. (2010) e Agne & Klein (2014) avaliando o efeito de doses crescentes de dejetos líquidos de suínos sobre Latossolos Vermelhos distroférricos de Santa Catarina não observaram incremento nos teores de carbono orgânico no solo com o aumento das doses aplicadas, porém esses autores também observaram maior acúmulo de CO na camada superficial do solo, estando esse efeito relacionado com a forma de aplicação superficial dos dejetos.

Mesmo com a aplicação de dejetos de suínos e de cama de aves, o uso da terra na produção agrícola, comparado com as condições naturais, reduziu os teores de carbono orgânico total do solo no estudo de Andrade et al. (2016). Diferentemente, Mafra et al. (2014) em Latossolo adubado com DLS e cultivado em plantio direto, observaram que as doses de 100 e 200 m³ ha⁻¹ adicionaram, respectivamente, 56 e 66 % a mais de carbono ao solo através da fitomassa do que a adubação com fertilizantes químicos solúveis, sugerindo que o incremento de carbono no solo pode se dar tanto a partir do carbono contido nos dejetos, como também pela maior produção de fitomassa.

Os tratamentos com a aplicação de cama de aves não proporcionaram, na camada superficial do solo, os maiores incrementos no conteúdo de carbono orgânico. Maiores incrementos no conteúdo de carbono orgânico com o uso da cama de aves eram esperados em função da maior relação C/N desse resíduo quando comparado com o DLS. No entanto a adição da cama de aves ao solo pode ter proporcionado maior atividade biológica nesses tratamentos, resultando em maior degradação do material orgânico e menor estocagem de carbono orgânico no solo. Comin et al. (2013), em um experimento com oito anos de duração, compararam os efeitos sobre o solo da adubação com DLS e cama sobreposta de suínos, e verificaram que a cama sobreposta proporcionou maior acúmulo de carbono no solo do que o DLS, o que, segundo esses autores, deveu-se à alta relação C/N da cama sobreposta, proporcionando uma menor taxa de decomposição e um maior acúmulo de carbono. Em um trabalho avaliando os efeitos da cama de aves crua e compostada sobre as propriedades físicas do solo, Valadão et al. (2011) verificaram que a cama de aves compostada proporcionou ao solo teores de carbono total e propriedades físicas semelhantes à condição natural do solo sob Cerrado nativo, indicando que não ocorreram prejuízo à qualidade física do solo pela utilização deste resíduo.

Os efeitos dos tratamentos sobre o teor de carbono orgânico do solo no presente trabalho puderam ser verificados somente até a profundidade de 0,10 m, de forma que na última camada do solo avaliada não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas para esta variável. Na média das três camadas estudadas o menor incremento no teor de carbono orgânico em relação à testemunha foi de 3,69% para o tratamento DLS 160, e o maior incremento foi de 19,58% para o tratamento DLS 480 (Tabela 3).

4.2 DENSIDADE, DENSIDADE MÁXIMA E DENSIDADE RELATIVA DO SOLO

A densidade do solo foi influenciada pelos tratamentos estudados apenas na camada de 0,00 a 0,05 m (Tabela 4). O tratamento sem adição de resíduos se manteve com a maior média demonstrando que a aplicação de DLS e de CA ao solo proporcionou redução significativa nos valores de densidade do solo.

Tabela 4 - Densidade do solo, densidade máxima e densidade relativa para o Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicação de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.

Camada	T1	DLS160	DLS320	DLS480	CA6	CA12	CA18	CV (%)
-----Densidade do Solo (Mg m ⁻³)-----								
0,00 - 0,05 m	1,28 a*	1,22 ab	1,26 ab	1,20 b	1,26 ab	1,23 ab	1,22 ab	5,67
0,05 - 0,10 m	1,26 ns ¹	1,26	1,26	1,28	1,23	1,27	1,29	5,07
0,10 - 0,20 m	1,28 ns	1,27	1,26	1,31	1,26	1,25	1,27	5,49
-----Densidade máxima (Mg m ⁻³)-----								
0,00 - 0,05 m	1,52 ns	1,45	1,50	1,49	1,48	1,50	1,48	3,79
0,05 - 0,10 m	1,50 ab	1,50 ab	1,52 ab	1,54 a	1,48 b	1,49 ab	1,54 a	2,23
0,10 - 0,20 m	1,50 ab	1,50 ab	1,47 b	1,54 a	1,49 ab	1,50 ab	1,48 ab	2,75
-----Densidade Relativa ou Grau de compactação-----								
0,00 - 0,05 m	0,84 ns	0,84	0,84	0,81	0,85	0,82	0,82	2,89
0,05 - 0,10 m	0,84 ns	0,84	0,83	0,83	0,83	0,85	0,84	3,13
0,10 - 0,20 m	0,85 ns	0,85	0,86	0,85	0,85	0,83	0,86	3,42

*Médias na mesma camada não seguidas por letras iguais diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. ¹ns = não significativo.

Fonte: Autor

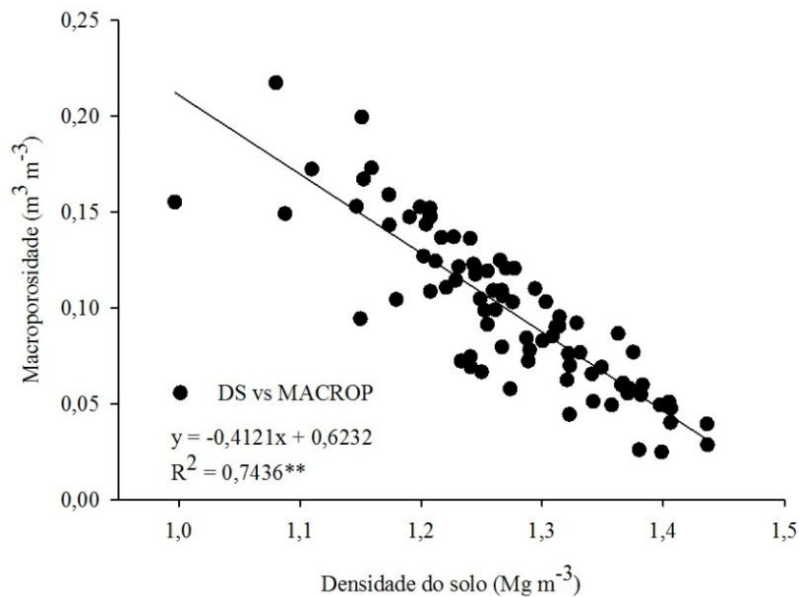
A redução na densidade do solo em função do aumento nos teores de matéria orgânica se deve às características da própria matéria orgânica, como a sua baixa densidade, e de seu efeito sobre o solo, elevando a porosidade e com isso reduzindo a densidade (HATI et al., 2006; BRAIDA et al., 2006). Diversos estudos encontrados na literatura também evidenciaram o efeito de fertilizantes orgânicos reduzindo a densidade do solo, e com isso promovendo melhorias na sua qualidade física (MELLEK et al., 2010; COSTA et al., 2009; HATI et al., 2006). Por outro lado, muitas vezes não são constatadas alterações na densidade do solo em função da aplicação de diferentes fertilizantes orgânicos em diferentes doses

(AGNE & KLEIN, 2014; ARRUDA et al., 2010). Fatores como o tipo de solo e suas características, clima da região, sistema de manejo adotado e o tipo e quantidade do material orgânico aplicado sobre o solo, definem a ocorrência ou não de alterações nas suas propriedades físicas (HERENCIA et al., 2011). Além disso, Costa et al. (2009) afirmam que alterações nas propriedades físicas do solo com a adição de resíduos orgânicos são mais evidentes em solos pobres e com algum grau de degradação e menos evidentes em solos originalmente bem estruturados e com boa qualidade física, justificando a variabilidade de respostas encontrada por diferentes autores.

A aplicação de $480 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de DLS, quando comparado com a testemunha sem aplicação, proporcionou uma redução na densidade do solo, na camada de 0,00 a 0,05 m, de 1,28 para $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$. Kaiser et al. (2009) e Silva (2003) consideram, para um solo argiloso, o valor de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ como o valor crítico de referência de densidade do solo a partir do qual as raízes das plantas cultivadas começam a enfrentar restrições para crescer e se desenvolver. No presente trabalho, esse valor de referência de densidade não foi atingido em nenhuma das camadas do solo analisadas, sendo a maior média obtida ($1,31 \text{ Mg m}^{-3}$) correspondente à camada de 0,10 a 0,20 m do tratamento DLS480. Apesar disso, a relação encontrada entre a densidade do solo e macroporosidade (Figura 1) sugere que para o solo estudado, valores de densidade acima de $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$ reduzem o volume de macroporos para valores abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que compromete a difusão de gases no solo, comprometendo o desenvolvimento do sistema radicular das plantas cultivadas (TORMENA et al., 1998; XU et al., 1992).

Valores elevados de densidade do solo impõem restrições ao crescimento e aprofundamento do sistema radicular das plantas cultivadas, confinando o sistema radicular apenas em camadas menos compactadas (BEUTLER & CENTURION, 2004), o que reduz o volume de solo explorado e, conseqüentemente, limita o acesso a recursos essenciais como a água e os nutrientes. Dessa forma, valores elevados de densidade do solo já foram relatados como fator limitante à produtividade de forrageiras (VITÓRIA et al., 2012), soja (BEUTLER & CENTURION, 2004), feijão (COLLARES et al., 2008), milho (FREDDI et al., 2009), entre outras culturas. Apesar disso, nem sempre as culturas agrícolas cultivadas em um solo compactado e, conseqüentemente, com valores elevados de densidade, apresentarão produtividades baixas, visto que o principal fator que determina o efeito da compactação sobre a produtividade é a disponibilidade de água durante o ciclo da cultura.

Figura 1 - Relação entre a densidade e a macroporosidade do Latossolo Vermelho estudado. **significativo a 1%.



Fonte: Autor

Em trabalho com o objetivo de avaliar a ocorrência de interação entre disponibilidade de água e compactação do solo no rendimento de grãos da cultura do feijoeiro, Gubiani et al. (2014b) verificaram que o acréscimo no rendimento de grãos pelo uso da irrigação foi tanto maior quanto maior era o nível de compactação do solo, concluindo que os prejuízos da compactação podem ser dissipados com o aumento da disponibilidade de água no solo. Essa menor evidência dos efeitos deletérios da compactação do solo em anos sem déficit hídrico, pode levar o produtor rural a subestimar os problemas causados pela compactação do solo, porém trata-se de um problema de ordem ambiental, visto que reduz a infiltração de água no solo (BRAIDA et al., 2011), aumentando o escoamento superficial que carrega partículas minerais e orgânicas para dentro dos rios e córregos, degradando a qualidade do solo e da água.

Os valores de densidade máxima obtidos para o Latossolo estudado variaram de 1,45 a 1,54 Mg m^{-3} e foram estatisticamente diferentes entre os tratamentos, para duas das três camadas amostradas (Tabela 4). Fatores como o conteúdo de argila e de matéria orgânica do solo influenciam significativamente a densidade máxima do solo e frequentemente é relatada a existência de uma relação inversa entre essas variáveis (MARCOLIN & KLEIN, 2011; BRAIDA, 2006). Entretanto, no presente estudo, a correlação de Pearson (Tabela 5) não

mostrou relação significativa entre o teor de carbono orgânico do solo e a densidade máxima obtida.

Tabela 5 - Matriz da correlação de Pearson entre algumas das variáveis estudadas no Latossolo Vermelho após quatro anos sob aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.

	UG	UV	DS	DM	DR	PT	MICROP	MACROP	COT	RP
UG	1,000	0,572**	0,724**	0,796**	-0,341*	0,719**	0,572**	0,192 ns	0,143 ns	-0,377*
UV	-	1,000	0,228*	-0,358*	0,473**	-0,134 ns	1,000	-0,682**	-0,112 ns	0,272*
DS	-	-	1,000	0,688**	0,804**	-0,994**	0,228*	-0,809**	-0,250*	0,535**
DM	-	-	-	1,000	0,129 ns	-0,677**	-0,358*	-0,278*	-0,011 ns	0,017 ns
DR	-	-	-	-	1,000	-0,807**	0,473**	-0,879**	-0,338*	0,346*
PT	-	-	-	-	-	1,000	-0,134 ns	0,807**	0,253*	-0,520**
MICROP	-	-	-	-	-	-	1,000	-0,682**	-0,112 ns	0,272*
MACROP	-	-	-	-	-	-	-	1,000	0,259*	-0,506**
COT	-	-	-	-	-	-	-	-	1,000	0,029 ns
RP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,000

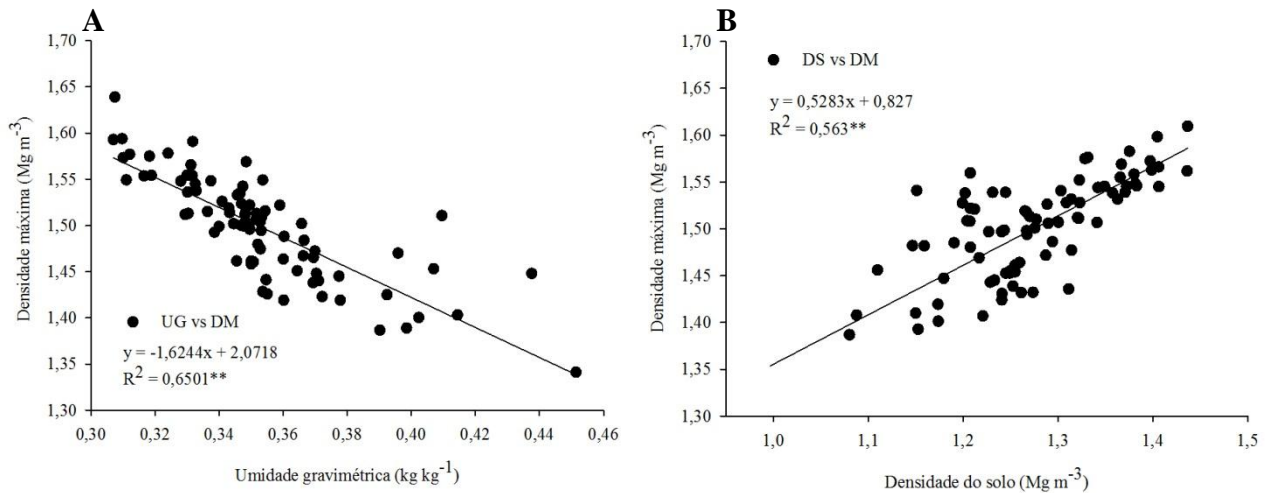
*significativo a 5%; **significativo a 1%; ns = não significativo; UG = umidade gravimétrica; UV = umidade volumétrica; DS = densidade do solo; DM = densidade máxima; DR = densidade relativa; PT = porosidade total; MICROP = microporosidade; MACROP = macroporosidade; PPC = pressão de preconsolidação; IC = índice de compressão; COT = carbono orgânico total; RP = resistência do solo à penetração.

Fonte: Autor

A densidade máxima apresentou correlação negativa com umidade gravimétrica da amostra (Figura 2-A), indicando que quando o conteúdo de água na amostra é maior, menores valores de densidade máxima são obtidos. Esse resultado pode estar associado ao aprisionamento de água no interior da amostra durante o teste de compressão uniaxial, dificultando a ocorrência da deformação da amostra (HORN & LEBERT, 1994).

Também foi observada no presente trabalho, a existência de correlação positiva significativa entre a densidade do solo e a densidade máxima (Figura 2-B), indicando que as amostras com densidade do solo inicial mais elevada, possibilitaram que valores mais elevados de densidade máxima fossem obtidos. De acordo com Marcolin e Klein (2011) a principal aplicação prática da densidade máxima é na obtenção da densidade relativa ou grau de compactação do solo, o qual permite comparar as respostas das plantas à compactação em solos de diferentes texturas.

Figura 2 - Relações existentes entre a umidade gravimétrica (A) e densidade do solo (B) com a densidade máxima obtida no ensaio de compressão uniaxial na pressão de 1600 kPa. **significativo a 1%.



Fonte: Autor

Para a variável densidade relativa ou grau de compactação, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos em nenhuma das camadas estudadas e as médias apresentaram pequena variação, sendo a menor 0,81 e a maior 0,86 (Tabela 4). Em estudo que avaliou a influência da aplicação de doses crescentes de dejetos líquidos de suínos sobre as propriedades físicas de um Latossolo, durante quatro anos, Agne & Klein (2014) também não verificaram alterações significativas na densidade relativa do solo em função das diferentes doses, somente verificaram diferença significativa para esta variável entre as camadas, sendo menor na camada de 0,00 a 0,05 m.

A densidade relativa de 0,87 representa um grau de compactação ótimo, no qual verificaram-se as melhores produtividades em diversas culturas e em diversos tipos de solo (HAKANSSON, 1990). Já Klein (2006), para um Latossolo Vermelho, determinou que 0,71 e 0,88 são, respectivamente, os valores de densidade relativa ótima e limitante para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Para a cultura da soja Beutler et al. (2005) encontraram densidade relativa ótima igual a 0,80 em um Latossolo Vermelho com características semelhantes ao solo do presente estudo e Reichert et al. (2009) encontraram maiores produtividades das culturas, em solos de clima tropical, na faixa de densidade relativa de 0,80 a 0,90. Essa variabilidade de resultados ótimos de densidade relativa encontrada na literatura pode ser explicada pelo fato de a produtividade das culturas agrícolas não depender unicamente das condições físicas dos solos, mas de uma série de fatores como condições

climáticas, manejo fitossanitário e adubação. No que se refere à compactação, Gubiani et al. (2014) demonstraram de forma clara e precisa que os efeitos sobre as plantas dependem da disponibilidade de água durante o ciclo produtivo, podendo ser mascarados em anos sem déficit hídrico.

4.3 POROSIDADE TOTAL, MACROPOROSIDADE E MICROPOROSIDADE

O sistema poroso do solo foi pouco afetado pelas aplicações de DLS e CA, variando de $0,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no tratamento sem adição de resíduos até $0,57 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no tratamento com maior dose de DLS (Tabela 6).

Tabela 6 - Porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.

Camada	T1	DLS160	DLS320	DLS480	CA6	CA12	CA18	CV (%)
-----Porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)-----								
0,00 - 0,05 m	0,54 b*	0,56 ab	0,55 ab	0,57 a	0,55 ab	0,56 ab	0,56 ab	4,50
0,05 - 0,10 m	0,55 ns ¹	0,55	0,55	0,54	0,56	0,55	0,54	4,16
0,10 - 0,20 m	0,54 ns	0,55	0,55	0,53	0,55	0,55	0,55	4,54
-----Microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)-----								
0,00 - 0,05 m	0,45 ns	0,45	0,45	0,44	0,45	0,45	0,45	4,31
0,05 - 0,10 m	0,44 ab	0,44 ab	0,44 ab	0,43 b	0,44 ab	0,45 a	0,44 ab	4,19
0,10 - 0,20 m	0,45 ns	0,44	0,45	0,44	0,44	0,45	0,44	4,90
-----Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)-----								
0,00 - 0,05 m	0,09 b	0,11 ab	0,10 ab	0,13 a	0,10 ab	0,11 ab	0,11 ab	29,70
0,05 - 0,10 m	0,11 ns	0,11	0,11	0,11	0,12	0,10	0,10	30,01
0,10 - 0,20 m	0,09 ns	0,11	0,10	0,09	0,11	0,10	0,11	38,58

*Médias na mesma camada não seguidas por mesma letra diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ¹ns = não significativo

Fonte: Autor

Na camada de 0,00 a 0,05 m a aplicação anual de $480 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de DLS proporcionou aumento de 5,5% no volume total de poros em comparação ao tratamento sem aplicação de DLS e de CA, sendo este o maior incremento no volume de poros encontrado entre os tratamentos. Foi possível perceber que todos os tratamentos proporcionaram, na camada mais superficial, uma tendência de aumentar o volume total de poros do solo, apesar de não haver diferenças estatísticas entre DLS e CA. Nas camadas do solo de 0,05 a 0,10 e de 0,10 a 0,20

m não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos para a porosidade total, porém em todos os tratamentos essa variável se manteve acima de $0,5 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ valor considerado ideal por Kiehl (1979) para o desenvolvimento das plantas.

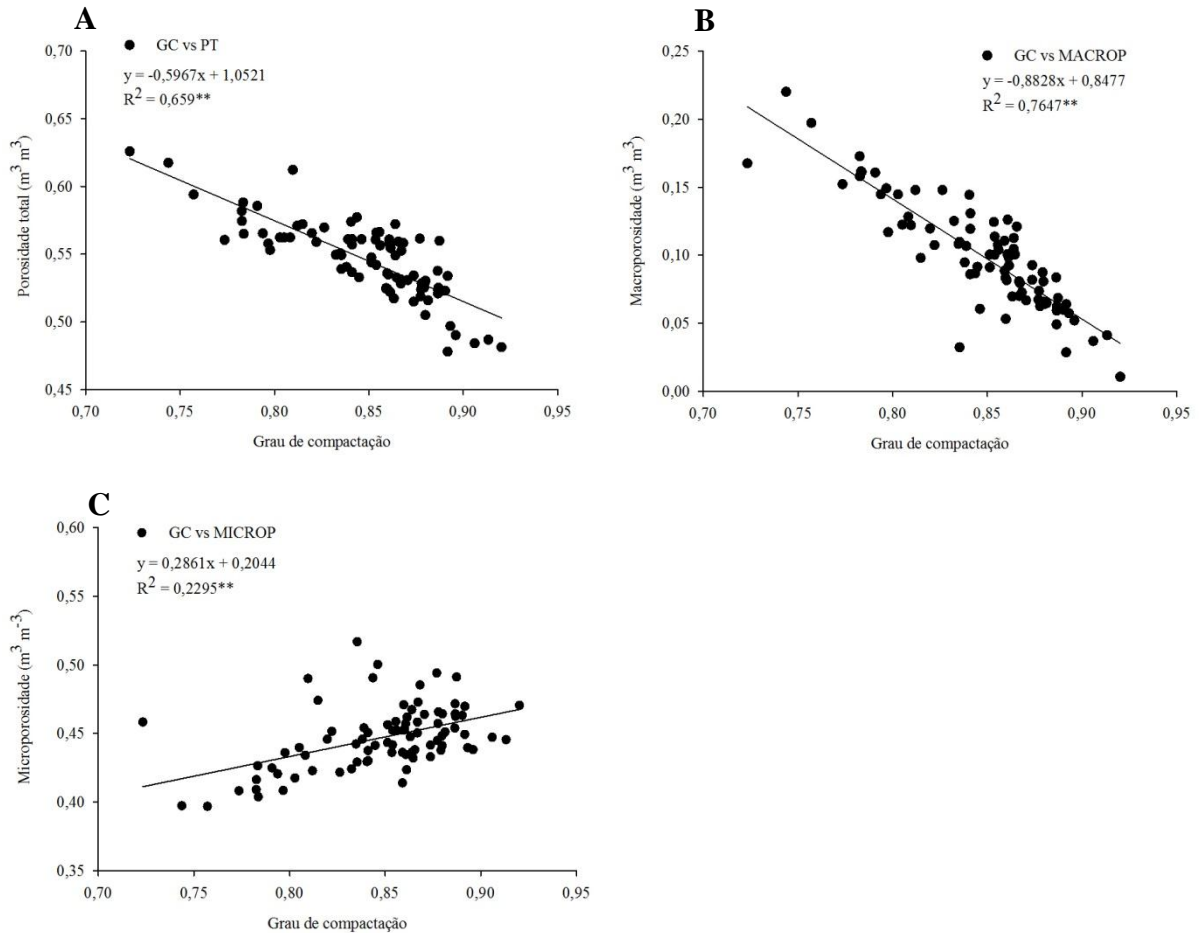
Em um experimento com a aplicação ao solo de diferentes compostos orgânicos em diferentes doses, no sudoeste do Irã, Barzegar et al. (2002) verificaram aumento significativo no volume total de poros do solo, além de uma série de melhorias na sua qualidade, como aumento da matéria orgânica, aumento da estabilidade estrutural e aumento na taxa de infiltração e retenção de água no solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Hati et al. (2006), que em um Vertissolo da Índia, observaram que a adição de dejetos de animais na adubação das culturas em comparação com a adubação somente com fertilizantes solúveis, proporcionou redução na densidade do solo, aumento na estabilidade de agregados e maior crescimento radicular da soja na camada superficial do solo, além de maior condutividade hidráulica, o que de acordo com os autores deve-se ao aumento no volume e continuidade dos poros do solo.

Por outro lado, Arruda et al. (2010) testaram diferentes doses de dejetos suínos e também combinações de dejetos com adubo solúvel, em um Latossolo Vermelho de Santa Catarina, e não verificaram alterações no sistema poroso do solo, atribuindo esse resultado à boa qualidade estrutural deste solo já existente no início do experimento, concordando com as afirmações de Costa et al. (2009) de que maiores respostas à adubação orgânica são verificadas em solos com algum grau de degradação. Da mesma forma, Agne & Klein (2014) após quatro anos de aplicação de doses crescentes de DLS, não verificaram nenhuma alteração significativa no sistema poroso de um Latossolo Vermelho com boa qualidade estrutural.

Diante do exposto, acredita-se que as alterações no sistema poroso com a adição dos resíduos orgânicos foram pequenas em função da boa condição estrutural inicial desse solo, que, mesmo no tratamento sem aplicação de resíduos orgânicos, apresentou um volume total de poros considerado alto e adequado para o desenvolvimento do sistema radicular das culturas agrícolas.

De forma semelhante à porosidade total, a microporosidade do solo apresentou diferença significativa somente na camada de 0,05 a 0,10 m (Tabela 6) e alterações neste parâmetro estão associadas às mudanças no grau de compactação do solo. O aumento do grau de compactação do solo afeta diretamente o espaço poroso, reduzindo drasticamente o volume total de poros e a macroporosidade e aumentando levemente a microporosidade (Figura 3).

Figura 3 - Relações do grau de compactação com a porosidade total (A), macroporosidade (B) e microporosidade (C) encontradas no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves. **significativo a 1%.



Fonte: Autor

A partir da equação que relaciona o grau de compactação com a macroporosidade do solo (Figura 3B) tem-se que, valores do grau de compactação inferiores a 0,85 não reduzem o volume de macroporos ao valor crítico de referência ($0,10 m^3 m^{-3}$), abaixo do qual a difusão de oxigênio no solo e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas cultivadas podem ficar comprometidos (TORMENA et al., 1998; XU et al., 1992).

Alterações significativas na macroporosidade do solo foram verificadas apenas na camada de 0,00 a 0,05 m, na qual foram observados pequenos incrementos nessa variável em função da aplicação de DLS e CA sobre o solo durante quatro anos. No entanto, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os dois resíduos utilizados (Tabela 6). O maior incremento no volume de macroporos foi verificado no tratamento com aplicação de $480 m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ de DLS, com média 44,4% superior à média do tratamento sem adição de

resíduos, o que pode estar relacionado ao aumento do conteúdo de carbono orgânico verificado neste tratamento, evidenciando aumento na matéria orgânica do solo, a qual devido às suas propriedades cimentantes melhora a agregação do solo, aumentando com isso a sua macroporosidade.

Entre as funções dos macroporos do solo estão o fluxo de gases entre o solo e a atmosfera, a infiltração rápida de água no solo, reduzindo o escoamento superficial, e servem ainda como rotas preferenciais para o crescimento de raízes e para a movimentação da fauna do solo. Diante disso, estabeleceu-se o valor crítico de referência de macroporosidade como $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, abaixo do qual a difusão de gases no solo e o desenvolvimento do sistema radicular das culturas podem ficar comprometidos (TORMENA et al., 1998; XU et al., 1992).

As médias de macroporosidade encontradas podem ser consideradas baixas, visto que se mantiveram próximas ao valor de referência e até, abaixo dele na camada de 0,00 a 0,05 m do tratamento testemunha e na camada de 0,05 a 0,10 m do tratamento com aplicação anual de 12 Mg ha^{-1} de CA. Arruda et al. (2010) trabalhando com a aplicação de DLS em um Latossolo Vermelho e encontraram volume de macroporos variando de 0,12 a $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, não havendo diferenças estatísticas significativas entre as doses testadas. Da mesma forma, Agne & Klein (2014) também não encontraram alterações significativas na macroporosidade de um Latossolo Vermelho com a aplicação de diferentes doses de DLS, e as médias também estiveram próximas ao valor de referência, variando de 0,10 a $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Por outro lado, influências significativas da aplicação de dejetos sobre a macroporosidade do solo foram registradas por Comin et al. (2013), de forma que a aplicação de dejetos aumentou o volume de macroporos do solo na camada de 0,00 a 0,10 m, o que, de acordo com os autores, ocorreu devido ao aumento do carbono orgânico total do solo. Não foram verificadas diferenças significativas na macroporosidade entre os tratamentos nas camadas de 0,05 a 0,10 e de 0,10 a 0,20 m.

4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP)

As condições de umidade em que as leituras de RP foram realizadas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Umidade gravimétrica e volumétrica do solo após equilíbrio na tensão de 6 kPa para a realização do ensaio de compressão uniaxial e da resistência à penetração.

Camada	T1	DLS160	DLS320	DLS480	CA6	CA12	CA18	CV (%)
-----Umidade gravimétrica (kg kg ⁻¹)-----								
0,00 - 0,05 m	0,36 ns ¹	0,37	0,36	0,37	0,36	0,37	0,37	7,58
0,05 - 0,10 m	0,35 ab*	0,36 ab	0,35 ab	0,34 b	0,36 a	0,35 ab	0,35 ab	6,16
0,10 - 0,20 m	0,35 ab	0,35 ab	0,36 a	0,33 b	0,35 ab	0,36 a	0,35 ab	5,15
-----Umidade volumétrica (m ³ m ³)-----								
0,00 - 0,05 m	0,45 ns	0,45	0,45	0,44	0,45	0,45	0,45	4,31
0,05 - 0,10 m	0,44 ab	0,44 ab	0,44 ab	0,43 b	0,44 ab	0,45 a	0,44 ab	4,19
0,10 - 0,20 m	0,45 ns	0,44	0,45	0,44	0,44	0,45	0,44	4,91

*médias na linha não seguidas de mesma letra diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ¹ns = não significativo.

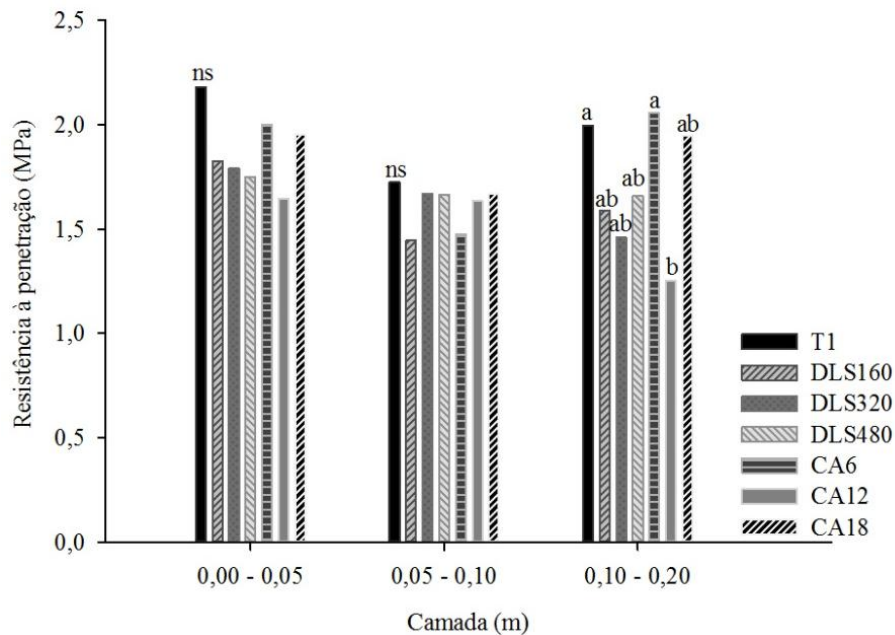
Fonte: Autor

Não foram verificadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos para a resistência à penetração nas camadas de 0,00 a 0,05 m e de 0,05 a 0,10 m, apesar da notável diferença das médias (Figura 4), o que pode ter ocorrido em função dos elevados coeficientes de variação obtidos para a RP nessas camadas, que foram, respectivamente, 29,5 e 27,4 %, os quais de acordo com Gubiani et al. (2011) são classificados como muito altos. Apesar disso, notou-se uma tendência de redução da resistência do solo à penetração em função da aplicação dos dejetos para as duas primeiras camadas do solo amostradas (Figura 4).

Na camada de 0,00 a 0,05 m as médias de resistência mecânica do solo à penetração variaram de 1,7 MPa a 2,2 MPa . Já na camada de 0,05 a 0,10 m as médias foram menores e variaram de 1,4 MPa até 1,7 MPa. Agne & Klein (2014) também não verificaram diferenças estatísticas significativas para a RP em função da aplicação de doses crescentes de DLS em um Latossolo Vermelho, porém verificaram média menor de RP na camada de 0 a 0,05 m, o que, segundo os autores, deve-se à menor densidade, maior macroporosidade e maior conteúdo de matéria orgânica nesta camada. Moura et al. (2012) avaliaram a influência da adição de DLS e de CA sobre a resistência mecânica à penetração em um Latossolo

Vermelho do estado de Goiás e concluíram que a RP não foi influenciada pela aplicação de nenhum dos dejetos estudados.

Figura 4 - Resistência do solo à penetração após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves. Médias na mesma camada não seguidas por letras iguais diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ns = não significativo.

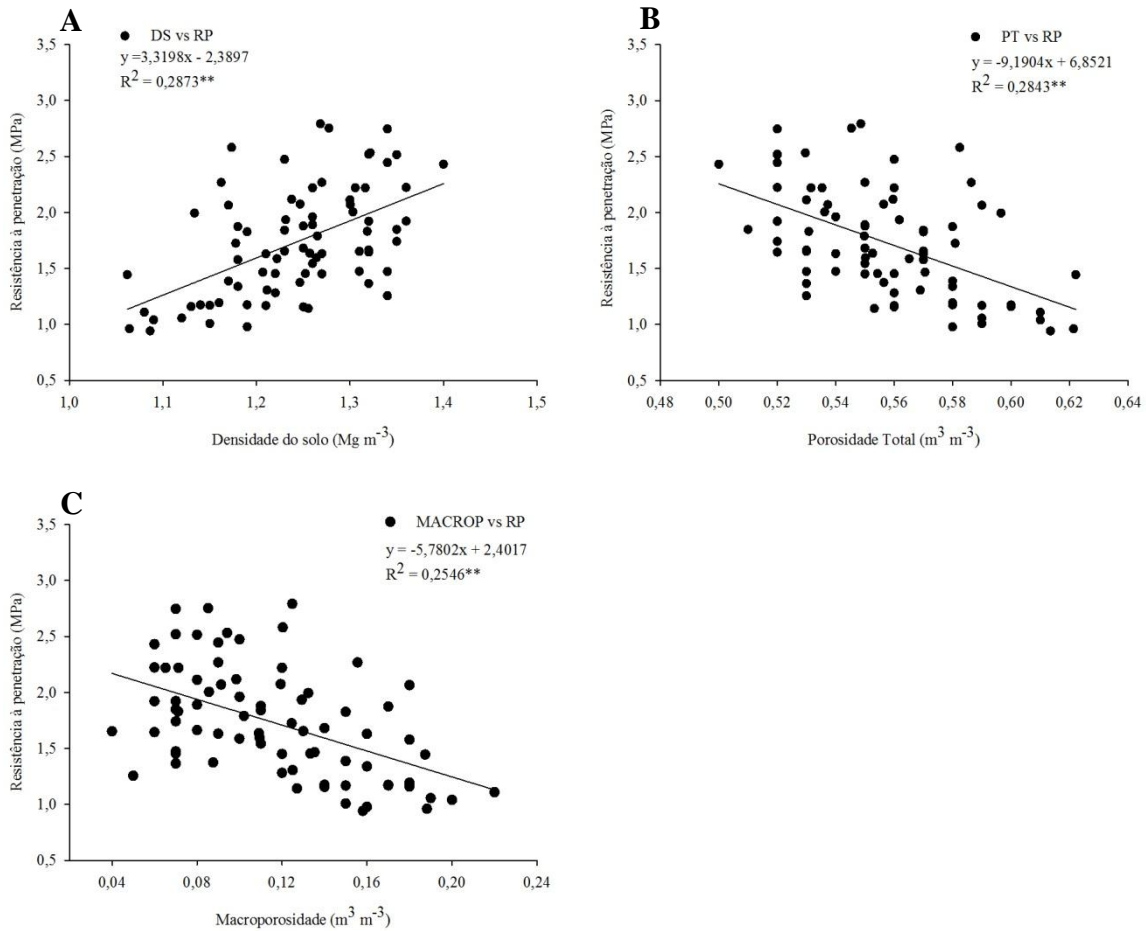


Fonte: Autor

Diferenças estatísticas significativas para a RP do solo foram encontradas entre os tratamentos na camada de 0,10 a 0,20 m na qual o tratamento testemunha e o tratamento com a aplicação anual de 6 Mg ha⁻¹ de CA apresentaram as maiores médias, diferindo estatisticamente do tratamento com aplicação anual de 12 Mg ha⁻¹ de CA, o qual apresentou média 37% inferior à média do tratamento testemunha.

Modificações na estrutura do solo, como alterações na densidade, porosidade total e macroporosidade ajudam a explicar as variações encontradas na resistência do solo à penetração, visto que essas variáveis mostraram-se significativamente correlacionadas (Tabela 5). Embora com baixos valores de R², a relação da resistência à penetração do solo com a densidade, porosidade total e macroporosidade foi significativa, indicando que variações nesses três parâmetros do solo resultam em variações também na RP (Figura 5).

Figura 5 - Relações da resistência do solo à penetração com a densidade do solo (A); Porosidade total (B) e macroporosidade (C) encontradas no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves. **significativo a 1%.



Fonte: Autor

Resultados semelhantes foram observados por Rauber et al. (2012) que, trabalhando em solo com diferentes usos e sob diferentes períodos de aplicação de dejetos, verificaram valores de resistência à penetração com correlação positiva com a densidade do solo e negativamente correlacionados com o volume de macro e bioporos. Considerando a equação que relaciona a densidade do solo com a resistência do solo à penetração (Figura 5-A), tem-se que, valores de densidade do solo menores que $1,32\ Mg\ m^{-3}$ não elevam a resistência do solo à penetração até o valor crítico de referência (2 MPa), acima do qual as raízes de culturas como a soja podem enfrentar restrições para se aprofundarem no solo (TAYLOR et al., 1966).

O valor crítico de referência de resistência do solo à penetração, a partir do qual as raízes das plantas não conseguem se desenvolver normalmente, ainda não está bem estabelecido na literatura científica, visto que cada espécie de planta pode apresentar níveis

diferentes de tolerância à compactação. Taylor et al. (1966) trabalharam com a cultura da soja e determinaram o valor de RP de 2 MPa como limitante e os valores acima de 3,5 MPa como severamente limitantes ao crescimento das raízes. Já Klein & Câmara (2007) não consideraram o valor de RP de 2 MPa como limitante, visto que observaram crescimento do sistema radicular da soja em valores de RP maiores que 2 e menores que 3 MPa. Couto et al. (2016) trabalharam com sistemas agroflorestais e classificaram os valores de resistência mecânica do solo à penetração em três faixas: sem restrição à penetração de raízes (valores de $RP < 2\text{MPa}$), restritiva à penetração de raízes (valores de RP entre 2 e 3,5 MPa) e impeditiva à penetração de raízes (valores de $RP > 3,5\text{MPa}$). Já Moraes et al. (2014) sugerem que o valor de RP de 2 MPa seja mantido como crítico para o sistema de preparo convencional do solo. No entanto de acordo com esses autores, para o sistema de preparo mínimo do solo com escarificação e no sistema de plantio direto os valores críticos de resistência à penetração devem ser aumentados, respectivamente, para 3 e 3,5 MPa.

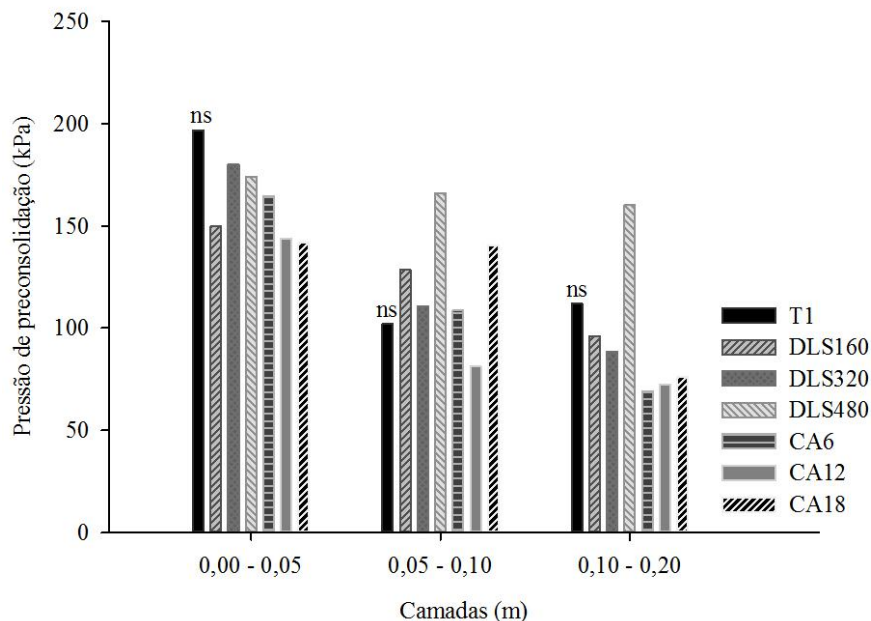
Valores de RP acima de 2 MPa foram observados no tratamento sem adição dos dejetos e no tratamento com aplicação anual de 6Mg ha^{-1} de CA, e valores muito próximos a esse valor de referência foram obtidos para o tratamento CA18. No entanto, o tratamento com aplicação anual de 12Mg ha^{-1} de cama de aves não apresentou valores elevados de RP, mostrando não ser possível relacionar os maiores valores de RP unicamente à adição de cama de aves ao solo. A alta variabilidade da resistência à penetração já é conhecida e citada na literatura e atrapalha a análise estatística (GUBIANI et al., 2011), não permitindo muitas vezes a detecção de diferenças entre os tratamentos estudados. De maneira geral os tratamentos com a adição de DLS ao solo não apresentaram médias elevadas de RP, indicando não haver restrição ao crescimento do sistema radicular das culturas no solo destes tratamentos.

4.5 PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO E ÍNDICE DE COMPRESSÃO

Para a pressão de preconsolidação (Figura 6), a análise estatística não identificou diferenças entre os diferentes resíduos e quantidades aplicadas e também, em relação a testemunha sem adição de resíduos orgânicos. A ausência de diferença estatística está relacionada aos elevados coeficientes de variação tipicamente encontrados para essa variável, os quais foram 32,3; 45,6 e 58,6%, respectivamente para as camadas de, 0,00 a 0,05; 0,05 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m. Elevados coeficientes de variação para dados de pressão de preconsolidação também foram relatados prejudicando a análise estatística no trabalho de

Fidalski et al. (2015), os quais encontraram coeficientes de variação entre 25 a 79%, e ainda no estudo de Baumgartl & Köck (2004).

Figura 6 - Pressão de preconsolidação do Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves. ns = não significativo.



Fonte: Autor

A pressão de preconsolidação representa a máxima pressão que pode ser aplicada ao solo sem que ocorra compactação adicional (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995). Diante disso, alterações na estrutura do solo podem aumentar ou reduzir a suscetibilidade à compactação, o que pode ser verificado a partir da correlação de Pearson (Tabela 8), que mostrou correlação positiva significativa da pressão de preconsolidação com a densidade do solo e densidade relativa e correlação negativa com a umidade gravimétrica, porosidade total e macroporosidade. Braida et al. (2010) salientam que solos mais porosos possuem menor número de pontos de contato entre as partículas sólidas e consequentemente, oferecem menor resistência à ocorrência de deformações quando sujeitos a pressões externas, resultando em menor resistência à compactação.

As variações no conteúdo de carbono orgânico do solo ocasionadas pelas adições de resíduos orgânicos explicam as tendências de redução e aumento da pressão de preconsolidação do solo verificadas para as camadas de 0,00 – 0,05 m e de 0,05 – 0,10 m, respectivamente. De acordo com Braida et al. (2010) dois efeitos podem ser causados pelo

acúmulo de matéria orgânica no solo, sendo eles o aumento da coesão entre as partículas do solo e mudanças na densidade e porosidade do solo, sendo o balanço entre esses dois efeitos o fator determinante na resposta do solo quanto a resistência à compactação. Nesse sentido, no presente estudo, as alterações na densidade e porosidade verificadas na camada de 0,00 a 0,05 m podem ser as responsáveis pela tendência de redução na pressão de preconsolidação do solo nesta camada, enquanto nas camadas abaixo, possivelmente o efeito predominante do aumento do teor de carbono no solo foi o aumento da coesão entre as partículas, aumentando a capacidade do solo em suportar as cargas aplicadas sobre ele.

Tabela 8 - Matriz da correlação de Pearson para a pressão de preconsolidação e índice de compressão após quatro anos sob aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.

	UG	UV	DS	DM	DR	PT	MICROP	MACROP	COT	RP
PPC	-0,438**	-0,062 ns	0,549**	0,448**	0,320*	-0,528**	-0,062 ns	-0,337*	0,261*	0,266*
IC	0,196 ns	-0,328*	-0,486**	0,06 ns	-0,748**	0,492**	-0,328*	0,593**	0,524*	-0,134 ns

*significativo a 5%; **significativo a 1%; ns = não significativo; UG = umidade gravimétrica; UV = umidade volumétrica; DS = densidade do solo; DM = densidade máxima; DR = densidade relativa; PT = porosidade total; MICROP = microporosidade; MACROP = macroporosidade; PPC = pressão de preconsolidação; IC = índice de compressão; COT = carbono orgânico total; RP = resistência do solo à penetração.

Fonte: Autor

Os valores de pressão de preconsolidação obtidos variaram de 69,3 a 196,5 kPa, sendo o menor valor correspondente à camada de 0,10 a 0,20 m do tratamento CA6 e o maior valor correspondente à primeira camada do tratamento sem adição de dejetos. As máquinas agrícolas normalmente utilizadas nos sistemas produtivos do Brasil aplicam ao solo pressões que variam de 80 a 450 kPa (MION et al., 2016; ARAUJO-JUNIOR et al., 2011; CARDOSO, 2007), podendo ultrapassar 600 kPa dependendo da máquina considerada (VISCHI FILHO et al., 2015). Já os animais exercem sobre o solo pressões que variam em torno de 350 a 400 kPa (PROFITT et al., 1993; BETTERIDGE et al., 1999) quando apoiados sobre as quatro patas, porém quando em movimento, apoiam-se momentaneamente sobre apenas duas patas, indicando que nesse momento a pressão exercida sobre o solo pode ser duplicada (NIE et al., 2001). Diante disso fica evidente que, na condição de umidade estudada, o tráfego de máquinas ou de animais sobre o solo facilmente pode exercer pressões superiores à sua capacidade de suporte, ocasionando o aumento do estado de compactação do solo, levando à degradação da sua qualidade física. Resultados semelhantes foram obtidos por Severiano et al. (2013) os quais estudaram diversos Latossolos do Cerrado Brasileiro, com diferentes frações

granulométricas, e concluíram que essa classe de solos possui alta suscetibilidade à compactação, sendo quase inevitável a compactação adicional dos mesmos, o que exige uma série de cuidados ao manejá-los.

Medidas de prevenção e mitigação da compactação do solo devem ser adotadas visando à conservação da qualidade do mesmo e da produtividade das culturas agrícolas, e envolvem estratégias direcionadas ao maquinário agrícola e ao sistema de manejo. Em relação às máquinas e equipamentos agrícolas sugerem-se alterações na pressão de inflação e no tipo de pneus (MION et al., 2016; DISERENS, 2009), além da melhor distribuição de carga nos eixos (KELLER & ARVIDSSON, 2004) para reduzir a tensão repassada ao solo, e ainda, a adoção do controle de tráfego (SOUZA et al., 2012), adaptando-se a largura dos rodados das diferentes máquinas ou utilizando-se o piloto automático para reduzir a área trafegada dentro da lavoura. Já em relação ao manejo o indicado é manter boa cobertura vegetal na superfície do solo, ajudando a dissipar as cargas aplicadas (VISCHI FILHO et al., 2015), cultivo de espécies ou variedades de plantas que exijam menor número de operações mecanizadas, principalmente em solos com elevados teores de argila (SEVERIANO et al., 2013) e sempre que possível, evitar a entrada de máquinas e animais em condições de alta umidade no solo.

Somado a isso, a adição de carbono ao solo, seja pelo maior aporte de biomassa vegetal ou pela adição de resíduos orgânicos ao solo, pode ser visto como uma estratégia para aumentar a capacidade de suporte de cargas do solo, visto que aumenta a elasticidade e a resiliência do mesmo (BRAIDA et al., 2010; BRAIDA et al., 2008). Dessa forma, sistemas conservacionistas de produção agrícola, que permitam maior aporte de resíduos vegetais ao solo, com rotação de culturas incluindo plantas com sistema radicular agressivo e ausência de revolvimento do solo, podem ser um aliado do produtor rural na mitigação dos problemas relacionados à compactação do solo.

Para o índice de compressão, na camada de 0,00 a 0,05 m não foram verificadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos (Tabela 9).

Tabela 9 - Índices de compressão no Latossolo Vermelho após quatro anos de adição de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.

Camada	T1	DLS160	DLS320	DLS480	CA6	CA12	CA18	CV (%)
-----Índice de Compressão -----								
0,00 - 0,05 m	0,26 ns ¹	0,27	0,28	0,31	0,26	0,27	0,29	17,05
0,05 - 0,10 m	0,21 ab*	0,18 b	0,22 ab	0,24 ab	0,28 a	0,18 b	0,21 b	21,80
0,10 - 0,20 m	0,17 ns	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	20,10

*médias na linha não seguidas de letras iguais diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ¹ns = não significativo.

Fonte: Autor

As variações observadas no índice de compressão do solo foram ocasionadas por mudanças ocorridas na densidade do solo e no sistema poroso, o que foi evidenciado pelas correlações de Pearson (Tabela 8). O índice de compressão se mostrou negativamente correlacionado com a densidade do solo e o grau de compactação, mostrando que o aumento nessas últimas variáveis proporcionado pela compactação do solo reduz a sua suscetibilidade às novas compactações, o que é notado pelo aumento da pressão de preconsolidação e redução do índice de compressão.

Por outro lado, ocorreu correlação positiva significativa entre o índice de compressão e a porosidade total e macroporosidade do solo, mostrando que os aumentos nessas duas últimas variáveis, proporcionados pelas adições dos resíduos ao solo, foram os responsáveis pelo aumento da suscetibilidade do solo à compactação na camada de 0,00 a 0,05 m, em função da elevação do índice de compressão e da redução da pressão de preconsolidação nessa camada. Braida et al. (2010) afirmam que o aumento do índice de compressão em solos com maior porosidade se deve ao menor número de pontos de contato entre as partículas sólidas, o que reduz a resistência à deformações que o solo oferece quando submetido a pressões externas. Essa afirmação corrobora com Horn & Lebert (1994) que afirmam que a resistência do solo à deformação é uma função do número de pontos de contato entre as partículas sólidas, o que ajuda a explicar a correlação negativa do índice de compressão com a densidade do solo, visto que a elevação da densidade reduz o espaço poroso e,

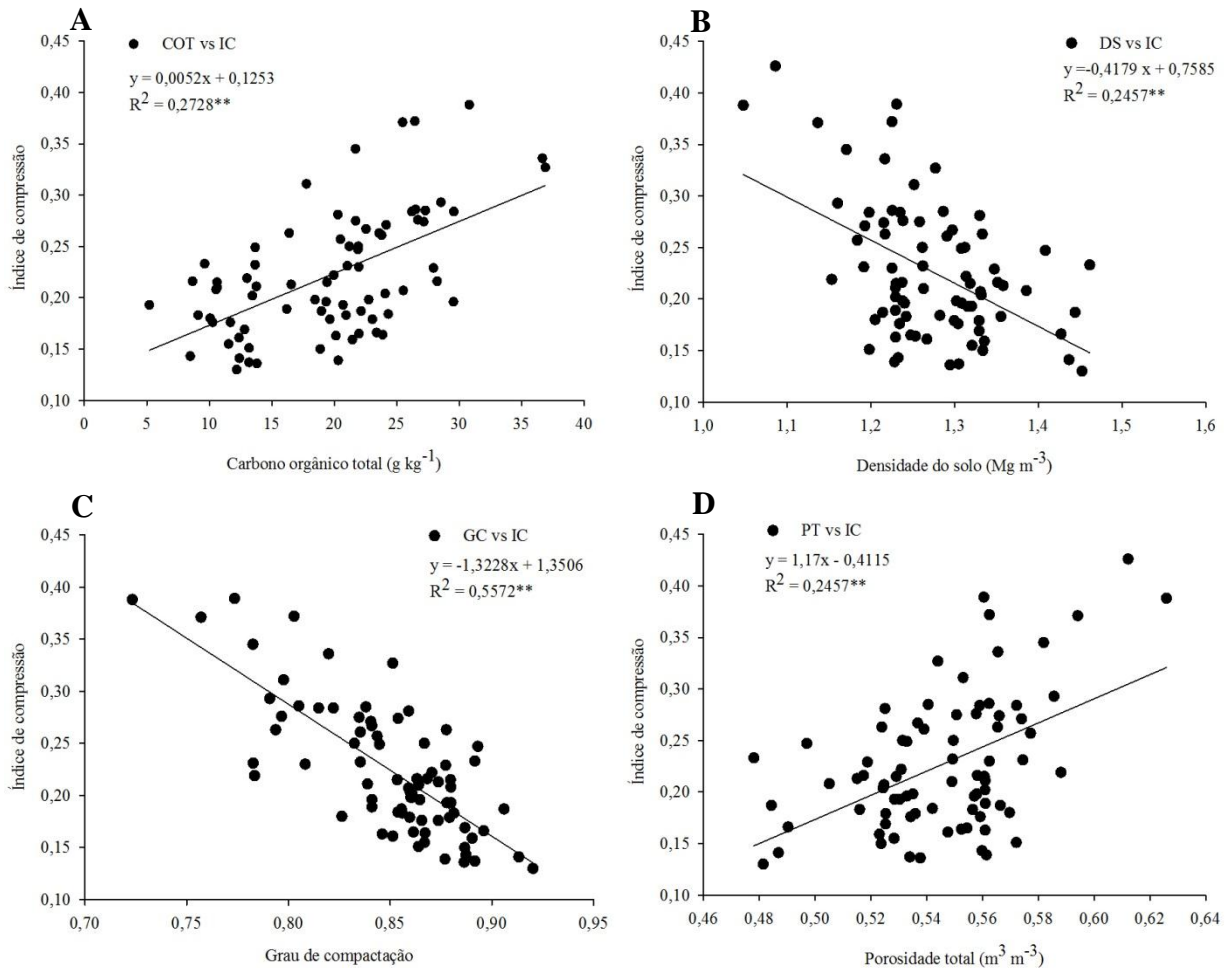
consequentemente, aumenta o número de pontos de contato entre as partículas sólidas, aumentando a resistência do solo às deformações.

Na camada de 0,05 a 0,10 m foram verificadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos para o índice de compressão, onde a maior média foi apresentada no tratamento com aplicação anual de 6 Mg ha⁻¹ de CA, resultado que pode estar relacionado ao aumento de 16,4% no teor de carbono orgânico neste tratamento em relação ao tratamento sem adição de dejetos. Na totalidade dos dados desse trabalho, maiores valores de índice de compressão estiveram relacionados a maiores teores de carbono orgânico (Figura 7-A). Apesar disso, o incremento no conteúdo de matéria orgânica no solo proporciona melhorias significativas na sua qualidade estrutural a médio e longo prazo, aumentando a resistência do solo à compactação através do aumento da coesão e da elasticidade, resultando em maior resiliência do solo e reduzindo os efeitos nocivos do tráfego de máquinas sobre a sua estrutura (BRAIDA et al., 2011).

Resultado semelhante foi relatado por Pereira et al. (2007), os quais também observaram uma correlação positiva entre o coeficiente de compressão e o teor de matéria orgânica do solo. Já no estudo de Braida et al. (2010), no grupo de amostras de menor densidade a variação no coeficiente de compressão foi independente do teor de carbono no solo, enquanto que no grupo de amostras com densidades mais altas e equilibradas nas tensões de água de 100 e 500 kPa, os autores verificaram que o coeficiente de compressão se tornou menor com o incremento de carbono orgânico no solo. No entanto, estes mesmos autores, para amostras equilibradas na mesma tensão de água utilizada no presente trabalho (6 kPa), também encontraram aumento no coeficiente de compressão juntamente com aumentos nos teores de carbono orgânico do solo.

Mudanças na porosidade do solo podem ter contribuído para esse resultado, visto que quando o incremento na matéria orgânica do solo eleva a porosidade do mesmo, isto tende a reduzir a sua resistência à compactação, em função da redução no número de pontos de contato entre as partículas sólidas do solo (BRAIDA et al., 2010).

Figura 7 - Relações do índice de compressão com o teor de carbono orgânico do solo (A); Densidade do solo (B); Grau de compactação (C) e porosidade total (D) encontradas no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves. **significativo a 1%.



Fonte: Autor

Apesar dos baixos valores de R^2 verificados nas relações do índice de compressão com a densidade do solo, grau de compactação e porosidade total, as mesmas foram estatisticamente significativas. A suscetibilidade do solo à compactação, representada pelo índice de compressão, foi menor em condições de solo mais denso ou em maiores graus de compactação, indicando que manter a densidade do solo até próxima do valor de referência pode ser uma estratégia para reduzir a suscetibilidade do solo às novas compactações. A partir das relações encontradas entre densidade do solo e macroporosidade (Figura 1), densidade do solo e resistência mecânica à penetração (Figura 5-A) e entre grau de compactação e macroporosidade (Figura 3-B) pode-se concluir que valores de densidade inferiores a $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$ não reduzem a macroporosidade nem elevam a resistência do solo à penetração até os

valores críticos de referência estabelecidos pela literatura. Da mesma forma, um grau de compactação próximo a 0,85 garante que o volume de macroporos não se torne limitante à difusão de gases no solo. Sendo assim, para o Latossolo estudado, um cenário de valores de densidade próximos a $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$ e grau de compactação próximo a 0,85 seria adequado pois não representa condições restritivas para o sistema radicular das culturas e reduz a suscetibilidade do solo à compactação.

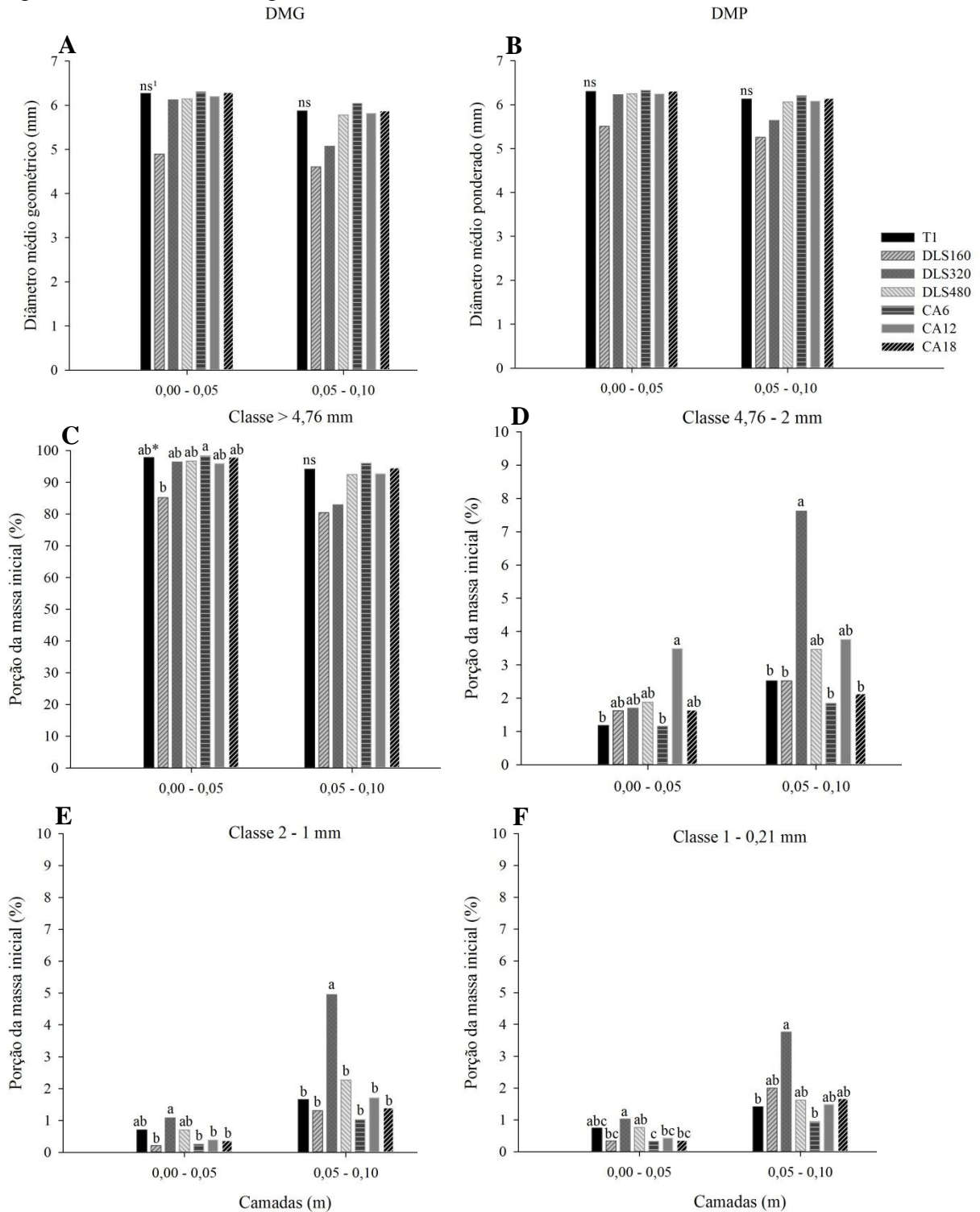
4.6 ESTABILIDADE DE AGREGADOS EM ÁGUA

O diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG) não foi influenciado pelas aplicações de dejetos líquidos de suínos e de cama de aves em nenhuma das camadas do solo avaliadas neste estudo, não havendo, portanto, diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos (Figura 8-A). De forma semelhante, como pode ser visto na figura 8-B, não foram verificadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos para o diâmetro médio ponderado (DMP).

Apesar de não haverem diferenças entre os tratamentos, pode ser observado que, para essas duas variáveis, as médias da camada 0,00 a 0,05 m foram superiores às médias da camada de 0,05 a 0,10 m, corroborando com Agne & Klein (2014), que também não verificaram influência das doses de dejetos suínos sobre o diâmetro médio geométrico dos agregados do solo, mas constataram redução do DMG com o aumento da profundidade avaliada.

De acordo com Almeida et al. (2014) os maiores valores de diâmetro dos agregados na camada mais superficial do solo estão relacionados à maior concentração de raízes nessa camada, o que estimula a atividade dos microrganismos, aumentando a presença de agentes cimentantes nessa camada. As raízes, micorrizas e hifas de fungos desempenham importantes papéis na formação e estabilização dos agregados do solo (TISDALL, 1994), evidenciando que práticas de manejo que estimulam a vida microbiana, como o incremento de matéria orgânica na camada superficial, são responsáveis por melhorias na estrutura do solo. Dessa forma, as adições de resíduos orgânicos, durante quatro anos, contribuíram para manter e formar agregados maiores e mais estáveis na superfície do solo avaliado.

Figura 8 - Distribuição da massa dos agregados por classes de diâmetro no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves. Diâmetro médio geométrico (A); Diâmetro médio ponderado (B); Classes de agregados: >4,76 mm (C); 4,76 – 2 mm (D); 2 – 1 mm (E); 1 – 0,21 mm (F). *Médias na mesma camada não seguidas de letras iguais diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ¹ns = não significativo.



Fonte: Autor

Resultados favoráveis da adição de dejetos animais sobre a agregação do solo foram relatados por Bandyopadhyay et al. (2010) em um Vertissolo da Índia, os quais obtiveram aumento nos macroagregados e redução nos agregados < 0,250 mm, além de uma série de melhorias como a redução da densidade e resistência do solo à penetração, com a adição de dejetos animais associados com a adubação mineral. Comin et al. (2013) estudaram os efeitos da adição de dejetos líquidos e de cama sobreposta de suínos sobre as propriedades físicas e agregação do solo e verificaram maior influência da cama sobreposta, que proporcionou as maiores taxas de agregação, aumentando o diâmetro médio dos agregados. Esses autores relacionaram esse resultado à decomposição mais lenta da cama sobreposta em comparação com o DLS, o que possibilitou que fossem geradas alterações mais duráveis na estrutura do solo.

De forma semelhante, Barbosa et al. (2015) testaram, em diferentes períodos após a aplicação, os efeitos da adição de dejetos líquidos de suínos e de cama de aves sobre a agregação de um Latossolo Vermelho argiloso e verificaram uma desagregação do solo, com aumento da argila dispersa em água e aumento de agregados <0,250 mm imediatamente após a aplicação de DLS (0 DAA – dias após a aplicação), seguida de uma floculação e reestruturação do solo entre 15 e 30 dias após a aplicação (DAA). Por outro lado, para as aplicações de cama de aves esses autores verificaram apenas efeitos de floculação e aumento da agregação do solo, aumentando o diâmetro médio dos agregados aos 15 DAA, evidenciando que esses dois resíduos atuam de maneira diferenciada sobre o solo. Apesar disso, no presente trabalho não foi possível identificar efeito diferenciado entre o DLS ou CA sobre o DMG e DMP dos agregados do solo (Figuras 8-A e 8-B).

A classe de agregados > 4,76 mm foi predominante no Latossolo estudado (Figura 8-C) e foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos para esta classe de agregados na camada de 0,00 a 0,05 m, na qual o tratamento com adição anual de 6 Mg ha⁻¹ de CA apresentou a maior porcentagem de agregados nesta classe (98,42%). O menor percentual de agregados contidos na peneira de 4,76 mm foi apresentado pelo tratamento com adição anual de 160 m³ ha⁻¹ de DLS, com percentual 12,68% menor do que o tratamento testemunha, indicando que nessa dosagem a aplicação de dejetos líquidos de suínos reduziu a estabilidade dos agregados do solo. Porém nas doses maiores a essa (DLS320 e DLS480) a adição de DLS não diferiu da adição de CA quanto ao percentual de agregados na classe > 4,76 mm. Barbosa et al. (2015) concluíram que doses de dejetos líquidos de suínos superiores a 33 m³ ha⁻¹ podem promover a dispersão da argila e a desagregação do solo logo após a aplicação, o que esteve relacionado em parte a alterações no pH do solo ocorridas após a

aplicação dos dejetos, visto que esses autores encontraram que elevações no $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ estiveram significativamente correlacionadas a um aumento na proporção de agregados $<0,250$ mm. Além disso, fenômenos eletrostáticos ocasionados pelo aumento de cátions monovalentes como o sódio (Na^+) possuem a capacidade de aumentar a dispersão da argila, reduzindo a estabilidade dos agregados do solo.

Com exceção do tratamento DLS160, na camada de 0,00 a 0,05 m todos os tratamentos apresentaram mais de 95% dos agregados na classe $>4,76$ mm, o que torna evidente a alta estabilidade dos agregados deste tipo de solo, pois foram pouco fragmentados pela oscilação vertical em água. Agne & Klein (2014) ressaltam que a qualidade estrutural é maior e a suscetibilidade aos processos erosivos é menor em solos com agregados estáveis em água de maior tamanho, em função de alterações como o aumento da macroporosidade entre os agregados do solo. Sendo assim, podemos afirmar que o Latossolo estudado apresentou boa qualidade estrutural, mesmo no tratamento sem adições de DLS e de CA.

Na camada de 0,05 a 0,10 m, menores percentuais de agregados se mantiveram na classe $>4,76$ mm em comparação com a primeira camada em todos os tratamentos, resultado que provavelmente se deve aos menores teores de carbono orgânico encontrados nessa camada. A correlação de Pearson para os parâmetros de agregação do solo (Tabela 10) mostrou que maiores proporções de agregados da classe $>4,76$ mm estiveram associados a maiores valores de DMG e DMP dos agregados. Além disso, agregados dessa classe foram positivamente correlacionados com o teor de carbono orgânico no solo, demonstrando a importância do carbono orgânico e consequentemente da matéria orgânica para a estabilidade da estrutura do solo. Braida et al. (2010) destacaram que um dos efeitos do incremento de matéria orgânica no solo é o aumento da coesão entre as partículas sólidas, fortalecendo os pontos de contato entre as mesmas, o que torna os agregados do solo mais resistentes, justificando a correlação positiva significativa entre agregados da classe $>4,76$ mm e conteúdo de carbono orgânico do solo.

Todos os tratamentos, exceto o CA6, aumentaram o percentual de agregados da classe de 4,76 - 2,0 mm na camada de 0,00 a 0,05 m, sendo a maior média obtida no tratamento CA12 (Figura 8-D). Na camada de 0,05 a 0,10 m esse efeito foi menos visível, de forma que apenas os tratamentos DLS320, DLS480 e CA12 obtiveram médias maiores do que o tratamento sem aplicações dos dejetos. Essa classe de agregados apresentou correlação negativa significativa com o DMG, DMP e com a classe de agregados $>4,76$ mm, indicando que solos com agregados maiores e mais resistentes apresentam menor quantidade de agregados nessa classe após a determinação em laboratório. Por outro lado, os agregados da

classe entre 4,76 e 2,0 mm foram positivamente correlacionados com as classes de agregados de 2 - 1 mm e de 1 - 0,21 mm, demonstrando que essas categorias de agregados menores são indicativas de solos com menor estabilidade de agregados, pois se fragmentaram durante o teste, chegando até as peneiras inferiores.

Tabela 10 - Coeficientes de correlação de Pearson para classes de agregados do Latossolo Vermelho.

	DMG	DMP	AGR >4,76	AGR 4,76 - 2	AGR 2 - 1	AGR 1 - 0,21	COT
DMG	1,000	0,995**	0,985**	-0,340*	-0,383**	-0,320*	0,169 ns
DMP	-	1,000	0,989**	-0,339*	-0,365*	-0,285*	0,164 ns
AGR > 4,76	-	-	1,000	-0,473**	-0,483**	-0,387**	0,186*
AGR 4,76 - 2	-	-	-	1,000	0,842**	0,704**	-0,163 ns
AGR 2 - 1	-	-	-	-	1,000	0,803**	-0,321*
AGR 1 - 0,21	-	-	-	-	-	1,000	-0,295*
COT	-	-	-	-	-	-	1,000

*significativo a 5%; **significativo a 1%; DMG = diâmetro médio geométrico; DMP = diâmetro médio ponderado; AGR >4,76 = classe de agregados > 4,76 mm; AGR 4,76 - 2 = classe de agregados de 4,76 - 2 mm; AGR 2 - 1 = classe de agregados de 2 - 1 mm; AGR 1 - 0,21 = classe de agregados de 1 - 0,21 mm; COT = carbono orgânico total do solo.

Fonte: Autor

O tratamento DLS160 e os tratamentos com adição de 6, 12 e 18 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de CA reduziram o percentual de agregados na classe de 2 - 1 mm em relação à testemunha na camada de 0,00 a 0,05 m do solo. Esse resultado esteve associado ao maior teor de carbono orgânico nessa camada, o que conferiu maior resistência aos agregados do solo, evitando que os mesmos fossem fragmentados até essa classe de diâmetro. Essa afirmação é respaldada pela correlação negativa significativa (Tabela 10) encontrada entre a classe de agregados de 2 - 1 mm e o teor de carbono orgânico do solo, o que significa que teores mais elevados de carbono no solo estiveram relacionados a uma redução no percentual de agregados dessa classe. A camada do solo de 0,05 a 0,10 m apresentou percentuais maiores de agregados nessa classe, comparada com a primeira camada.

A aplicação anual de 320 m³ ha⁻¹ de DLS parece ter reduzido a estabilidade dos agregados do solo, uma vez que para esse tratamento foram obtidos os maiores percentuais de agregados nas duas classes menores, além de uma menor média de agregados > 4,76mm. O efeito negativo desta dosagem de DLS sobre a agregação do solo foi ainda mais evidente na camada de 0,05 - 0,10 m na qual aumentou, em relação à testemunha, 2, 1,9 e 1,6 vezes a

proporção de agregados nas classes de 4,76 – 2 mm, 2 – 1 mm e 1 – 0,21 mm, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Arruda et al. (2010) que também encontraram uma redução da estabilidade dos agregados do solo com a utilização de doses crescentes de DLS. Apesar desse resultado negativo do tratamento DLS320 sobre a agregação do solo, as outras dosagens de dejetos líquidos de suínos não seguiram a mesma tendência, não mostrando diferenças estatísticas significativas dos tratamentos com aplicação de cama de aves, o que sugere a necessidade de novos estudos acerca dos efeitos da dosagem anual de $320 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de DLS sobre a agregação do solo.

A elevação nos teores de carbono orgânico do solo esteve acompanhada da redução do percentual de agregados das duas classes menores (Tabela 10), indicando um aumento da estabilidade dos agregados em água com o aumento do conteúdo de carbono orgânico do solo. De forma semelhante, Vicente et al. (2012) encontraram alta correlação positiva entre o teor de matéria orgânica do solo e a proporção de agregados >2 mm e apresentaram a relação encontrada em que 71,4% do aumento da proporção dessa classe de agregados foi explicada por variações positivas no teor de matéria orgânica do solo em área com aplicação de vinhaça. Esses autores também encontraram correlação positiva significativa entre o DMP e o teor de matéria orgânica do solo, o que ressalta a importância desta última na formação e estabilização dos agregados do solo.

4.7 ARGILA DISPERSA EM ÁGUA E GRAU DE FLOCULAÇÃO

Não foram encontradas diferenças estatísticas significativas (Tabela 11) entre os tratamentos estudados para a argila dispersa em água (ADA) na camada de 0,00 a 0,05 m, porém foram observadas menores médias de ADA nessa camada em comparação com camadas mais profundas, resultado que esteve relacionado a variações no conteúdo de carbono orgânico do solo (Figura 9). Resultados semelhantes foram obtidos por Agne & Klein (2014) que também não observaram diferenças para a argila dispersa em água entre as diferentes doses de DLS testadas. Porém, os autores verificaram um incremento nesta variável com o aumento da profundidade avaliada, o que, segundo eles, ocorreu devido à redução nos teores de matéria orgânica do solo com o aumento da profundidade. Resultados diferentes foram encontrados por Belém et al. (2014) que em seu estudo encontraram os maiores teores de argila dispersa em água nas primeiras camadas do solo e relacionaram esse efeito ao maior teor de matéria orgânica nessas camadas, o que aumentaria a quantidade de cargas negativas,

umentando, conseqüentemente, a repulsão entre as partículas de mesma carga como as argilas.

Tabela 11 - Médias de argila dispersa em água e grau de floculação do Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves.

Camada	T1	DLS160	DLS320	DLS480	CA6	CA12	CA18	CV (%)
-----Argila dispersa em água (%)-----								
0,00 - 0,05 m	29,11 ns ¹	27,62	26,68	28,01	27,44	29,50	29,84	5,47
0,05 - 0,10 m	28,14 b*	28,74 ab	29,54 ab	29,28 ab	29,81 ab	31,18 ab	31,32 a	4,55
0,10 - 0,20 m	29,85 ns	30,01	28,09	32,33	29,18	32,58	30,32	5,53
-----Grau de floculação (%)-----								
0,00 - 0,05 m	54,27 ab	55,59 ab	56,45 a	55,69 ab	55,45 ab	51,00 b	53,44 ab	4,09
0,05 - 0,10 m	56,26 ns	54,44	52,13	53,29	54,8	51,87	52,88	4,67
0,10 - 0,20 m	54,78 ns	55,1	55,33	51,35	55,72	47,71	56,00	8,4

*médias na linha não seguidas de mesma letra diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ¹ns = não significativo.

Fonte: Autor

Apesar do possível aumento nas cargas negativas do solo, relatado por Belém et al. (2014), no presente estudo a aplicação de DLS e de CA provavelmente aumentou a concentração de cátions bivalentes como o cálcio e o magnésio, que possuem a capacidade de fazer uma ponte entre as partículas eletronegativas, facilitando a floculação das partículas do solo sem causar elevação nos teores de ADA. Além disso, conforme Spera et al. (2008) a classe dos Latossolos apresenta em estado natural agregação primária na forma de pequenos grânulos muito resistentes, favorecidos pela presença de alumínio trocável e pela mineralogia (óxidos de Fe e de Al) que conferem alta estabilidade aos agregados do solo.

Os efeitos dos diferentes íons sobre o comportamento da argila do solo foi objeto de um estudo de longa duração (80 anos de histórico dos tratamentos), desenvolvido por Paradelo et al. (2013) na região de Versalhes (França) no qual testaram-se diferentes adubações minerais e adubação orgânicas (100 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de estrume) e seus efeitos sobre o solo. Nesse estudo os autores encontraram maior agregação do solo e menores conteúdos de argila dispersa em água nas parcelas que receberam fontes de cálcio e estrume, enquanto nas parcelas que receberam fontes de sódio e potássio o solo apresentou-se desagregado, com maior conteúdo de argila dispersa em água, maior densidade e com a formação de selamento superficial. Além disso, após 80 anos de condução do experimento, os autores verificaram

forte acidificação do solo em função do uso de fertilizantes químicos nitrogenados, o que esteve significativamente correlacionado a aumentos na dispersão da fração argila.

Na camada do solo de 0,05 – 0,10 m observou-se tendência de aumento nos teores de ADA com a adição dos dejetos, de forma que a testemunha apresentou a menor média, enquanto a maior dose de cama de aves proporcionou o maior teor de argila dispersa em água. Apesar disso, apenas o tratamento CA18 foi estatisticamente diferente do tratamento testemunha, com incremento de 3,2 % no teor de ADA, porém não se diferenciou estatisticamente dos demais tratamentos avaliados. Homem et al. (2012) estudaram os efeitos da adição de águas residuárias de criatórios de suínos, bovinos e de coelhos sobre a dispersão da argila em um Latossolo Vermelho Amarelo, encontraram que todos os dejetos agiram de forma semelhante, elevando os teores de ADA, evidenciando que a aplicação indiscriminada desses dejetos sobre o solo, pode ocasionar degradação na sua estrutura e prejuízos à produtividade das plantas pela dispersão da argila e entupimento de poros do solo. Entre os motivos desse resultado obtido os autores destacaram o alto conteúdo de sódio nos dejetos utilizados, o que pode ter elevado a concentração desse elemento na solução do solo, resultando em aumento da dispersão da argila. De acordo com Meurer (2006) e Spera et al. (2008) a concentração de cátions com alto grau de hidratação como o Na^+ e K^+ altera a espessura da dupla camada difusa pela formação de complexos de esfera externa, inibindo a manifestação das forças de atração de curto alcance, o que resulta na dispersão do sistema.

Na camada de 0,10 a 0,20 m não foram verificadas diferenças estatísticas significativas para a ADA entre os diversos tratamentos estudados. Em relação aos dejetos, poucas diferenças puderam ser notadas entre os efeitos da adição ao solo de dejetos líquidos de suínos e de cama de aves sobre a dispersão da argila do solo, o que indica que a maioria dos tratamentos proporcionaram efeitos semelhantes ao solo. Barbosa et al. (2015) encontraram aumentos na dispersão da argila ocasionados pelas aplicações de dejetos líquidos de suínos, com dispersão máxima encontrada aos 15 dias após a aplicação das doses de 33 e $66 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, enquanto que para os tratamentos com adições de cama de aves esses autores encontraram reduções nos conteúdos de argila dispersa em água ao longo do tempo, com os menores teores verificados dos 30 aos 60 dias após a aplicação.

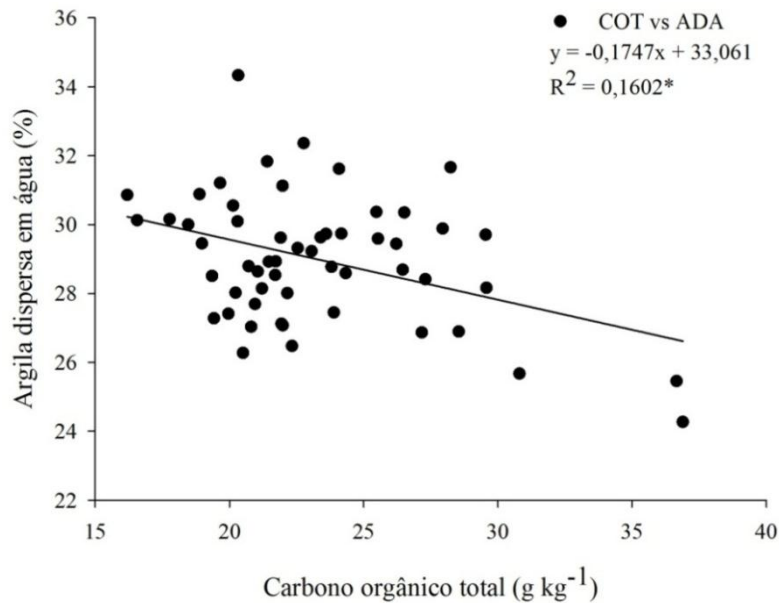
A baixa influência verificada da aplicação de DLS e de CA sobre os teores de argila dispersa em água pode ser explicada em parte pelo intervalo de tempo entre a última aplicação dos tratamentos e a coleta das amostras, o qual foi superior a 90 dias, permitindo que os seus efeitos fossem amenizados. Essa afirmação é respaldada pelos resultados obtidos por Barbosa et al. (2015), que testaram a influência sobre a estrutura do solo, em diferentes períodos após a

aplicação (DAA) de DLS e de CA, verificando um aumento imediato da argila dispersa em água (0 – 15 DAA), seguido de uma floculação e reestruturação do solo entre 15 e 30 DAA.

Esses resultados sugerem que o efeito da adição de dejetos sobre o solo, elevando a dispersão da argila, ocorre principalmente nos primeiros dias após a aplicação, sendo este um período crítico no qual a ocorrência de altas precipitações pode ocasionar a perda de argila por erosão hídrica e a eluviação de argila no perfil do solo, causando o entupimento de poros do solo, além da formação de camadas com maior densidade (SPERA et al., 2008; PARADELO et al., 2013). Após essa fase de dispersão, a decomposição dos dejetos adicionados resulta em incremento no teor de matéria orgânica no solo, a qual através da interação com cátions polivalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+}) formam complexos organominerais com a fração argila (BRADY & WEIL, 2013), reduzindo os teores de argila dispersa em água, explicando a relação mostrada na figura 9.

Para o grau de floculação foram verificadas diferenças estatísticas entre os tratamentos apenas na camada de 0,00 a 0,05 m na qual a maior média esteve relacionada ao tratamento DLS 320, que diferiu estatisticamente do tratamento com o menor grau de floculação da argila, CA12 (Tabela 11). De acordo com Agne & Klein (2014) a floculação é a primeira etapa na formação dos agregados, portanto espera-se que solos com maior índice de floculação da argila apresentem maior qualidade estrutural, o que não pôde ser verificado no tratamento DLS320 nesta camada, já que, embora tenha apresentado o maior grau de floculação apresentou também as maiores médias de agregados nas duas classes mais finas, não demonstrando alta estabilidade de seus agregados. Apesar disso a diferença nesta proporção de agregados nas classes menores do tratamento DLS320 para os demais tratamentos foi muito pequena, não acarretando provavelmente, em prejuízos significativos à qualidade estrutural do Latossolo que, como discutido anteriormente, pode ser considerada alta. Por outro lado, o tratamento CA12 além de apresentar o menor grau de floculação, conteve também a maior proporção de agregados na classe de 4,76 – 2 mm, indicando que o aumento da proporção de agregados nessa classe pode ter sido causado pela baixa floculação da argila verificada neste tratamento na camada mais superficial do solo.

Figura 9 - Relação entre carbono orgânico total e argila dispersa em água, no Latossolo Vermelho após quatro anos de aplicações de dejetos líquidos de suínos e cama de aves. *significativo a 5%.



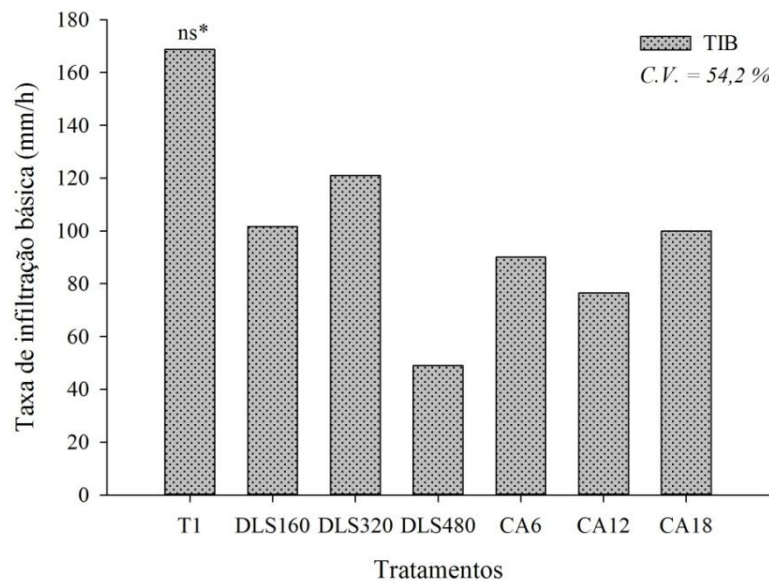
Fonte: Autor

Observou-se maior grau de floculação na camada mais superficial do solo, com tendência de decréscimo nessa variável com o aumento da profundidade avaliada. Esse comportamento também foi relatado por Agne & Klein (2014) e foi ocasionado pelo decréscimo do conteúdo de matéria orgânica do solo em profundidade, já que esses autores encontraram uma relação linear entre essas duas variáveis, onde 62% do índice de floculação foram atribuídos à matéria orgânica do solo. Brady & Weil (2013) discutem que o processo de formação dos agregados do solo se inicia com a floculação das partículas de argila, o que ocorre a partir da ligação destas com cátions polivalentes que são atraídos pela carga negativa das argilas e a partir disso formam uma espécie de ponte, permitindo a formação de complexos argila/argila ou argila/húmus. Dessa forma, o maior teor de carbono orgânico na primeira camada do solo em decorrência das aplicações superficiais dos dejetos pode ter contribuído para aumentar a formação dos complexos argila/húmus, elevando o grau de floculação das argilas do solo. Esse resultado também corrobora com o estudo de Rauber et al. (2012) os quais avaliaram diversas formas de uso do solo e com a aplicação de dejetos de suínos e cama de aves por períodos que variaram de 3 a 20 anos, e verificaram maior grau de floculação do solo na floresta nativa em todas as camadas avaliadas, o que esteve relacionado aos maiores níveis de carbono orgânico que também foram verificados na floresta nativa.

4.8 TAXA DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Não foram verificadas diferenças estatísticas significativas para a taxa de infiltração básica nos diferentes tratamentos testados, resultado que se deve principalmente ao elevado coeficiente de variação encontrado para essa variável (54,2 %), uma vez que graficamente foi possível identificar diferenças (Figura 10).

Figura 10 - Taxa de infiltração básica de água no Latossolo Vermelho após quatro anos de adição de dejetos líquidos de suínos e cama de aves. *ns = não significativo.



Fonte: Autor

Houve tendência de redução na taxa de infiltração básica de água no solo com a adubação orgânica, tanto nos tratamentos com dejetos de suínos como também nos tratamentos com cama de aves, o que pode estar relacionado ao entupimento de poros pela dispersão da argila (HOMEM et al., 2012; PARADELO et al., 2013). Além disso, o volume de macroporos observado no Latossolo estudado pode ser considerado baixo, o que pode ter reduzido a infiltração de água no solo, já que esta classe de poros é de grande importância para a rápida infiltração da água.

De maneira geral, o resultado encontrado não concorda com grande parte dos trabalhos presentes na literatura, os quais relacionam a adubação orgânica com elevações na taxa de infiltração de água no solo. Wortmann & Shapiro (2008) avaliaram os riscos de perda de fósforo em solos de Nebraska com adição de estrume de confinamento cru ou compostado,

e concluíram que, embora logo após a aplicação desses dejetos o risco de perda de fósforo por escoamento superficial seja maior, o aumento de macroagregados estáveis que ocorre posteriormente resulta em maior infiltração de água no solo, reduzindo assim o escoamento e as perdas de fósforo. Barzegar et al. (2002), no Sudoeste do Irã, avaliaram os efeitos sobre o solo da adição de estrume, palha de trigo e bagaço de cana-de-açúcar compostado, e encontraram aumentos na ordem de 100% na taxa de infiltração de água no solo proporcionados pela adição de 15 Mg ha⁻¹ desses resíduos. Entretanto conforme esses autores, na região onde esse estudo foi desenvolvido, o clima é semiárido, com precipitação anual de 319 mm, temperaturas de até 45°C e o solo no início do experimento continha apenas 0,79% de matéria orgânica, condições totalmente distintas das nossas, onde certamente a adição de matéria orgânica ao solo resulta em alterações mais pronunciadas nas suas propriedades físico-hídricas. Além disso, as taxas de aplicação utilizadas no presente estudo são bem maiores que as utilizadas na maioria dos trabalhos, o que pode ter colaborado para essa redução na taxa de infiltração de água observada.

Os efeitos da matéria orgânica sobre a dinâmica da água no solo foram discutidos por Braida et al. (2011), os quais apontam dois possíveis efeitos que podem aumentar a disponibilidade de água para as plantas, sendo eles o aumento na retenção de água no solo em função das propriedades da matéria orgânica e o aumento na infiltração de água no solo em função de melhorias na estrutura proporcionadas pela adição de matéria orgânica. Apesar disso, esses autores apresentam uma extensa revisão da literatura que mostra não haver consenso entre os pesquisadores sobre esses efeitos da matéria orgânica na dinâmica da água do solo, visto que os resultados obtidos apresentam variação conforme o tipo de solo e a metodologia adotada. Elevação na taxa de infiltração de água no solo com a adição de dejetos de suínos também foi relatada por Castro Filho et al. (2003), resultado que foi atribuído pelos autores às melhorias verificadas na agregação do solo pelo aumento do conteúdo de carbono.

Apesar da tendência observada de redução da taxa de infiltração básica de água no solo com a adição dos dejetos animais, as médias encontradas podem ser consideradas intermediárias para um Latossolo argiloso, já que valores bem inferiores (12,12 mm h⁻¹) foram relatados para esta classe de solo quando compactado (BONINI et al., 2011). Ainda de acordo com Bonini et al. (2011), os Latossolos apresentam naturalmente altas taxas de infiltração de água no solo, porém essa taxa é reduzida com o aumento do estado de compactação do solo, o que foi comprovado no estudo desses autores pela redução de 97% na taxa de infiltração de água no tratamento com cinco passadas de um rolo compactador em comparação com a testemunha com ausência de compactação.

O manejo do solo é outro fator que altera a sua taxa de infiltração de água, e em um Latossolo Amarelo foi tema do estudo de Cunha et al. (2015) que encontraram para o plantio convencional, plantio direto e cultivo mínimo taxa de infiltração estável de 148, 163 e 254 mm h⁻¹, respectivamente. Bono et al. (2012), em um Latossolo Vermelho da região dos Cerrados, mostraram o impacto do uso do solo nas atividades agrícolas e/ou pecuárias sobre a taxa de infiltração de água, de modo que na média de sete anos de avaliação a taxa de infiltração básica para o solo com vegetação natural foi de 888,3 mm h⁻¹, enquanto que nos demais sistemas com lavoura de grãos ou pastagens a maior média foi de 337,2 mm h⁻¹ e a menor foi de 153,7 mm h⁻¹. Diante desses resultados, pode-se inferir que a forma como o experimento foi conduzido, sem entrada de máquinas e animais na área e com cobertura permanente do solo proporcionada pela grama tifton possivelmente influenciou a taxa de infiltração básica de água no solo, contribuindo para que essa apresentasse valores intermediários.

5 CONCLUSÕES

A adubação orgânica com doses elevadas de dejetos líquidos de suínos (DLS) e cama de aves (CA), realizada durante quatro anos, proporcionou alterações nos teores de carbono orgânico solo, com efeitos mais pronunciados na camada de 0,00 a 0,05 m, com incrementos de até 44,3%. Não foram detectadas diferenças entre os dois tipos de resíduos orgânicos estudados.

A aplicação de dejetos líquidos de suínos ou cama de aves reduziu a densidade do solo e incrementou a macroporosidade e a porosidade total. Entretanto, a adubação orgânica não proporcionou alterações significativas na resistência mecânica do solo à penetração, no DMG e DMP dos agregados e na taxa de infiltração básica de água no solo. Nas condições estudadas, um cenário de densidade do solo próxima a 1,27 Mg m⁻³ e grau de compactação próximo a 0,85, não representa condições restritivas para o sistema radicular das culturas e torna o solo menos suscetível à compactação.

A pressão de preconsolidação não foi significativamente alterada pela adição dos resíduos orgânicos ao longo de quatro anos, e apresentou correlação positiva com a densidade do solo e correlação negativa com a umidade gravimétrica, porosidade total e macroporosidade. A suscetibilidade do solo à compactação não foi alterada em função da adição de resíduos orgânicos ao solo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição de resíduos orgânicos ao solo como fontes de nutrientes para as culturas agrícolas e também como alternativa de descarte correto desses resíduos pode induzir a modificações na estrutura do solo, o que é refletido nos indicadores físico-hídricos e mecânicos. Os resultados obtidos nesse trabalho e os apresentados através da revisão da literatura científica nacional e internacional apontam a necessidade de uso desses resíduos seguindo critérios agronômicos, com taxas de aplicações anuais definidas pela pesquisa agrícola e pela legislação ambiental, minimizando os possíveis impactos negativos sobre o meio ambiente e otimizando os resultados agronômicos das culturas agrícolas.

Além disso, a grande variabilidade de resultados discutida nesse trabalho ressalta a necessidade e a relevância de estudos regionalizados dos efeitos da adição de resíduos orgânicos sobre a qualidade do solo. Dessa forma, novas pesquisas em locais e solos distintos dos deste estudo são importantes para ampliar o leque de informações científicas a respeito desse tema, servindo como suporte técnico para tomadas de decisões na constante busca da sustentabilidade da produção agrícola e na pecuária brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ABPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. Relatório Anual 2017. Disponível em: <http://abpabr.com.br/storage/files/3678c_final_abpa_relatorio_anual_2016_portugues_web_reduzido.pdf>, acesso em: 25/09/2017.
- ABCS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DE SUÍNOS. **Mapeamento da suinocultura brasileira. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas.** Associação Brasileira dos Criadores de Suínos, Brasília – DF, 2016, 376 p.
- AGNE, S. A. A.; KLEIN, V. A. Matéria orgânica e atributos físicos de um Latossolo Vermelho após aplicações de dejetos de suínos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.7, p.720 – 726, 2014.
- ALMEIDA, D. J.; SILVA, I. F.; SILVEIRA, F. P. M.; SANTIAGO, R. D.; COSTA, J. R. C. Poaceae cespitosa e decumbente adubadas com NPK: efeitos na agregação do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 50-55, jan./mar. 2014.
- ANDRADE, A. P.; RAUBER, L. P.; MAFRA, A. L.; BARETTA, D.; ROSA, M. G.; FRIEDERICHS, A.; MAFRA, M. S. H.; CASARA, A. C. Changes in physical properties and organic carbon of a Kandiodox fertilized with manure. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.5, p.809-814, mai, 2016.
- ARAÚJO-JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35: 115–131, 2011.
- ARRUDA, C. A. O.; ALVES, M. V.; MAFRA, A. L.; CASSOL, P. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; SANTOS, J. C. P. Aplicação de dejetos suíno e estrutura de um Latossolo Vermelho sob semeadura direta. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.4, p.804-809, 2010.
- BANDYOPADHYAY, K. K.; MISRA, A. K.; GHOSH, P. K.; HATI, K. M. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean. **Soil & Tillage Research**, 110:115–125, 2010.
- BARBOSA, G. M. C.; OLIVEIRA, J. F.; MIYAZAWA, M.; RUIZ, D. B.; FILHO, J. T. Aggregation and clay dispersion of an oxisol treated with swine and poultry manures. **Soil & Tillage Research**, 146:279–285, 2015.
- BARZEGAR, A.R.; YOUSEFIL, A.; DARYASHENAS, A. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.247, n.2, p.295-301, 2002.
- BAUMGARTL, T.; KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. **Soil Science Society of America Journal**. 2004;68:57-65.
- BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:687-694, 1999.

BAYER, C. ; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In:SANTOS, G. de A.(Ed) et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed rev e atual. – Porto Alegre: Metrópole, 2008.p 7:18.

BELÉM, R. A.; OLIVEIRA, C. V.; SAMPAIO, R. A. Características físicas do solo e suscetibilidade de deslizamentos de talude na Avenida Sidney Chaves, Montes Claros/MG. **Caminhos de geografia**, Uberlândia, v.15, n.51, p.52 – 59, 2014.

BETTERIDGE, K.; MACKAY, A.D.; SHEPHERD, T.G.; BARKER, D.J.; BUDDING, P.J.; DEVANTIER, B.P.; COSTALL, D.A. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. **Australian Journal of Soil Research**, 37:743-760, 1999.

BEUTLER, A. N.; CENTURION J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.581-588, jun. 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:843-849, 2005.

BONINI, A. K.; SECCO, D.; SANTOS, R. F.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Ciência Rural**, v.41, n.9, set, 2011.

BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A.; NANNI, M. R.; GOMES, E. P.; MÜLLER, M. M. L. Infiltração de água no solo em um latossolo vermelho da região sudoeste dos cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:1845-1853, 2012.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3 ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRAIDA, J.A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. V.7, p.222-267.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a suscetibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.131–139, 2010.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.477-485, 2008.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v30, n. 4, p. 605-614, 2006.

CARDOSO, V. M. F. **Sustentabilidade estrutural de um solo na região do alto paranapanema/SP, submetido a dois sistemas de cultivo**. 2007. Tese (Doutorado em Agronomia)- Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu – SP, 2007.

CASAGRANDE, A. Determination of the preconsolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. Proceedings... Cambridge, Harvard University, 1936. p. 60- 64.

CASSOL, P.C.; COSTA, A.C. da; CIPRANDI, O.; PANDOLFO, C.M.; ERNANI, P.R. Disponibilidade de macronutrientes e rendimento de milho em Latossolo fertilizado com dejetos suíno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1911-1923, 2012.

CASTRO FILHO, C.; COSTA, M. A. T.; CAVIGLIONE, J. H. Potencial fertilizante e alterações físicas nos solos decorrentes da utilização do chorume suíno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. Resumos... Ribeirão Preto, UNESP/SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:933-942, 2008.

COMIN, J. J.; LOSS, A.; VEIGA, M.; GUARDINI, R.; SCHMITT, D. E.; OLIVEIRA, P. A. V.; BELLI FILHO, P.; COUTO, R. DA R.; BENEDET, L.; MULLER JÚNIOR, V.; BRUNETTO, G. Physical properties and organic carbon content of a Typic Hapludult soil fertilised with pig slurry and pig litter in a no-tillage system. **Soil Research**, v.51, p.459-470, 2013.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Legislação Ambiental, Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 16 de janeiro de 2018.

CQFS – COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016, 376 p.

CORRÊA, J. C.; BARILLI, J.; REBELLATTO, A.; VEIGA, M. **Aplicações de dejetos de suínos e as propriedades do solo**. Embrapa, circular técnica 58, Concórdia –SC, 2011.

COSTA, A. M.; BORGES, E. N.; SILVA, A. A.; NOLLA, A.; GUIMARÃES, E. C. Potencial de recuperação física de um Latossolo Vermelho, sob pastagem degradada, influenciado pela aplicação de cama de frango. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, Edição Especial, p. 1991-1998. 2009.

COUTO, W. H.; DOS ANJOS, L. H. C.; WADT, P. G. S.; PEREIRA, M. G. Atributos edáficos e resistência a penetração em áreas de sistemas agroflorestais no sudoeste amazônico. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 811-823, jul.-set., 2016.

CUNHA, J. L. X. L.; COELHO, M. E. H.; ALBUQUERQUE, A. W.; SILVA, C. A.; SILVA JÚNIOR, A. B.; CARVALHO, I. D. E. Water infiltration rate in Yellow Latosol under different soil management systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.11, p.1021–1027, 2015.

- DARTORA, V.; PERDOMO, C. C.; TUMELERO, I. L. **Manejo de dejetos de suínos**. Boletim informativo de pesquisa e extensão, Embrapa suínos e aves e Emater/RS, 1998.
- DIAS JUNIOR, M.S., PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating pre-consolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**. 8, 139–151, 1995.
- DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. **Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos**. Porto Alegre: Embrapa Suínos e Aves, 2002.
- DISERENS, E. Calculating the contact area of trailer tyres in the field. **Soil & Tillage Research**., 103: 302–309, 2009.
- DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Documentos, 132).
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.
- FATMA. **Instrução Normativa IN-11**. Portaria Intersetorial nº01/04, de 02.08.2000. Florianópolis: FATMA, 2000.
- FIDALSKI, J.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; ANGHINONI, G.; AULER, P. A. M. Capacidade de suporte de carga do solo em sistemas de produção de laranja conservacionistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:880-885, 2015.
- FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em latossolo vermelho. i - características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:793-803, 2009.
- GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; GELAIN, N. S. Implications of the variability in soil penetration resistance for statistical analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:1491-1498, 2011.
- GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Interação entre disponibilidade de água e compactação do solo no crescimento e na produção de feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:765-773, 2014b.
- GUBIANI, P. I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; GOULART, R. Z.; FONTANELA, E. Suplemento excel para modelar a curva de compressão do solo. In: XX CONGRESSO LATINOAMERICANO Y XVI CONGRESSO PERUANO DE LA CIENCIA DEL SUELO. Cusco, 2014a.
- HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil & Tillage Research**, v.16, p.105-120, 1990.
- HAHN, L. **Processamento da cama de aviário e suas implicações nos agroecossistemas**. 2004, 120p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- HATI, K.M.; MANDAL, K.G.; MISRA, A.K.; GHOSH, P.K.; BANDYOPADHYAY, K.K. Effect of inorganic fertilizer and farmyard manure on soil physical properties, root distribution, and water-use efficiency of soybean in Vertisols of central India. **Bioresource Technology**, Oxford, v.97, n.16, p.2182-2188, 2006.

HERENCIA J. F; GARCIA-GALAVIS P. A.; MAQUEDA C. Long-term effect of organic and mineral fertilization on soil physical properties under greenhouse and outdoor management practices. **Pedosphere** **21**, 443–453, 2011.

HOMEM, B. G. C.; ALMEIDA NETO, O. B.; SANTIAGO, A. M. F.; SOUZA, G. H. Dispersão da argila provocada pela fertirrigação com águas residuárias de criatórios de animais. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.2, p.89-98, 2012.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. VAN. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier. 1994. 662p

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Indicadores IBGE: estatística da produção pecuária, 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/producaoagropecuaria/default.shtm#animal>>. Acesso em 28 de setembro de 2016.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

IMHOFF, S., SILVA, A.P., FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, **68**, 17–24, 2004.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L. & KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, **33**:845-855, 2009.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk for subsoil compaction: effect of dual wheels, tandem axles and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. **Soil & Tillage Research**, **79**: 191–205, 2004.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis** – Part 1. Madison, Wisc. ASA. 495 – 509, 1965.

KIEHL, J. E. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento de soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, **V.31**, P.221-227, 2007.

KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.5, n.1, p. 26-32, 2006.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. UPF, 3º edição, 2014. 263 p.

LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, **19**:275- 286, 1991.

LIMA, J. J.; MATA, J. D. V.; PINHEIRO NETO, R.; SCAPIM, C. A. Influência da adubação orgânica nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico e na produção de

matéria seca de *Brachiaria brizantha* cv, Marandu. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 29, supl., p. 715-719, 2007.

LOSS, A.; BASSO, A.; OLIVEIRA, B. S.; KOUCHER, L. P.; OLIVEIRA, R. A.; KURTZ, C.; LOVATO, P. E.; CURMI, P.; BRUNETTO, G.; COMIN, J. J. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:1212-1224, 2015.

LOURENZI, C. R. **Atributos químicos após dezenove aplicações de dejetos líquidos de suínos em argissolo sob plantio direto**. 2010. 55p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MACHADO, P. L. O. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, Vol. 28, No. 2, 329-334, 2005

MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Amsterdam, v. 61, p. 119-130, 2001.

MAFRA, M. S. H.; CASSOL, P. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; CORREA, J. C.; GROHSKOPF, M. A.; PANISSON, J. 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, ago. 2014.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

MELLEK, J.E.; DIECKOW, J.; SILVA, V.L.; FAVERETTO, 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**, 110:69-76, 2010.

MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 3.ed. Porto Alegre, Evangraf, 2006. 285p.

MION, R. L.; HOLANDA, Á.; BARROSO, S. H. A.; SILVA, S. A. T. Tensões aplicadas no solo pelas diferentes pressões do pneu de um trator agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.36, n.1, p.63-77, jan./fev. 2016.

MOURA, J. B.; MARASCA, I.; MENESES, L. A. S.; PIRES, W. M.; MEDEIROS, L. C. Resistência a penetração do solo em pastagem cultivada com *Brachiaria decumbens* sob aplicação de dejetos líquidos suínos e cama de frango. **Science. Technology**, v.5, p.162-169, 2012.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic eutradox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:288-298, 2014.

NIE, Z.N.; WARD, G.N. & MICHAEL, A.T. Impact of pugging by dairy cows on pastures and indicators of pugging damage to pasture soil on South – Western Victoria. **Australian Journal of Soil Research**, 52:37-43, 2001.

OLIVEIRA, P. A.V. de. (Coord.). **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA/CNPSA., 1993. 188 p. (EMBRAPA CNPSA. Documento, 27).

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Compostagem dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças de aves. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.538-545, maio/jun. 2010.

PARADELO, R.; OORT, F. V.; CHENU, C. Water-dispersible clay in bare fallow soils after 80 years of continuous fertilizer addition. **Geoderma**, 200-201:40–44, 2013.

PEREIRA, J. O.; FOSSEZ, P. DE; RICHARD, G. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. **European Journal of Soil Science**, v.58, p.34-44, 2007.

PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M.R. & EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a Red – Brown earth. **Australian Journal of Agricultural Research**, 44:317-331, 1993.

RAUBER, L. P.; PICCOLLA, C. D.; ANDRADE, A. P.; FRIEDERICHS, A.; MAFRA, A. L.; CORRÊA, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A. Physical properties and organic carbon content of a Rhodic Kandudox fertilized with pig slurry and poultry litter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:1323-1332. 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <<http://www.R-project.org/>>. ISBN: 3-900051-.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & KANSSON, I.H. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop, production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, 102:242-254, 2009.

ROSCOE, R.; BODDEY, R. M.; SALTON, J.C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M.; SALTON, J.C. (Eds). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. EMBRAPA AGROPECUÁRIA, Dourados, 2006.

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

SARTOR, R. L.; ASSMANN, A. L.; ASSMANN, T. S.; BIGOLIN, P. E.; MIYAZAWA, M.; CARVALHO, P. C. F. Effect of Swine Residue Rates on Corn, Common Bean, Soybean and Wheat Yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:661-669, 2012.

SCHERER, E. E.; NESI, C. N.; MASSOTTI, Z. Atributos químicos do solo influenciados por sucessivas aplicações de dejetos suínos em áreas agrícolas de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1375-1383, 2010.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; COSTA, K. A. P.; CARDUCCI, C. E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, 51(3), 193–202, 2013.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P. & MASQUETTO, B.J. Consolidômetro: Equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:617-615, 2007.

SILVA, R.B. & MASQUETTO, B.J. CA-Linker: Sistema para monitoramento, aquisição e processamento de parâmetros físicos e mecânicos em tempo real, gerados em ensaios de consolidação uniaxial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., Fortaleza, 2009. Anais... Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 2009. CD-ROM

SILVA, T. R.; MENEZES, J. F. S.; SIMON, G. A.; ASSIS, R. L.; SANTOS, C. J. L.; GOMES, G. V. Cultivo do milho e disponibilidade de P sob adubação com cama-de-frango. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.9, p.903–910, 2011.

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SOUSA, F. A.; CAMPOS, A. T.; SILVA, E. B.; GANDINI, A. M. M.; CORRÊA, J. M. Redução do potencial poluidor de dejetos de suínos em lagoas de estabilização em série. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 65-73, Jan./Feb. 2014.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.4, p.603-612, abr. 2012.

SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; SANTOS, H. P.; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:2613-2620, 2008.

STONE, R. J.; EKWUE, E. I. Soil compressibility as influenced by sewage sludge incorporation. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.64, n.3, p.227-235, 1996.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; KAISER, D. R. Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional** 5 (2015) 64–70.

TAYLOR, H.M. Effects of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In: BARNES, K.K; CARLETON, W.M. & TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I. & van den BERG, G.E. **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph, ASAE, 1971. p.292-305.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, 102(1):18-22, 1966.

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

TISDALL, J.M. Possible role of soil microorganisms in aggregation of soils. **Plant and Soil**, 159, 115–121, 1994.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:573-581, 1998.

VALADÃO, F. C. A.; BENEDET MAAS, K. D.; WEBER, O. L. S.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; SILVA, T. J. Variação nos atributos do solo em sistemas de manejo com adição de cama de frango. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:2073-2082, 2011.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VICENTE, T. F. S.; PEDROSA, E. M. R.; ROLIM, M. M.; OLIVEIRA, V. S.; OLIVEIRA, A. K. S.; SOUZA, A. M. P. L. Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em canaviais com e sem vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1215–1222, 2012.

VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; LIMA, C. C.; PEREIRA, D. M. G.; LIMA, M. E.; SOUSA, A. C. M.; SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v.50, n.4, p.322-332, abr. 2015.

VITÓRIA, E. L.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; LACERDA, E. G. Correlação linear e espacial entre produtividade de *Brachiaria brizantha*, densidade do solo e porosidade total em função do sistema de manejo do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.5, p.909-919, set./out. 2012

WEIL, R. R.; KROONTJE, W. Physical condition of a Davidson clay loam after five years of heavy poultry manure applications. **Journal of Environmental Quality**, v. 8. p 387-392, 1979.

WORTMANN, C. S.; SHAPIRO, C. A. The effects of manure application on soil aggregation. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 80:173–180, 2008.

XU, X. et al. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.1743-1750, 1992.

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

ZHANG, H.; HARTGE, K. H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, n.1, p.239-245, 1997.