

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO E RENDIMENTO DE SOJA
SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM SISTEMAS DE MANEJO**

**João Paulo Cassol Flores
(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO E RENDIMENTO DE SOJA
SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM SISTEMAS DE MANEJO**

JOÃO PAULO CASSOL FLORES
Engenheiro-Agrônomo (UFSM)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de Doutor em
Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil
Março, 2008

JOÃO PAULO CASSOL FLORES
Engenheiro Agrônomo - UFSM
Mestre em Ciência do Solo - UFRGS

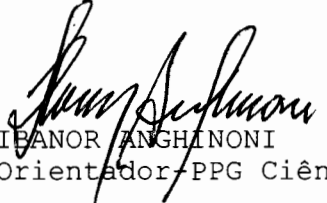
TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

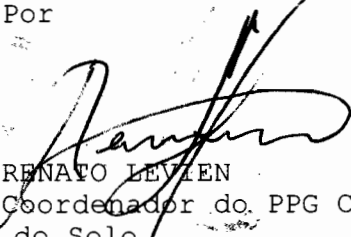
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 31/03/2008
Pela Banca Examinadora




IVANOR ANGHINONI
Orientador PPG Ciência do Solo

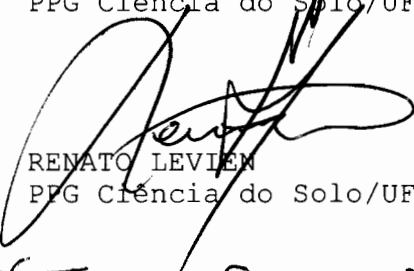
Homologado em: 30/04/2008
Por




RENATO LEVIEN
Coordenador do PPG Ciência
do Solo



MARINO JOSÉ TEDESCO
PPG Ciência do Solo/UFRGS




RENATO LEVIEN
PPG Ciência do Solo/UFRGS



TOMÉ LOVATO
Departamento de Solos/UFSM



JULIO CESAR SALTON
EMBRAPA Agropecuária Oeste



GILMAR ARDUINO B MARODIN
Diretor da Faculdade
de Agronomia

A minha família, meus pais (Artemisia e Jaredé), meus irmãos (Jussara, Jair, Jaime, Joenes e Jairo), que sempre me incentivaram.

A Rosiane, por todo apoio e suporte para realização desse trabalho.

A um dos grandes responsáveis por eu ter chegado tão longe, ao senhor José Alexandre Rossi (*in memoriam*).

A vocês, DEDICO esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, pelo dom da vida e pela proteção nas longínquas viagens à Fazenda do Espinilho.

Ao Professor Ibanor Anghinoni, pelo brilhantismo na orientação durante a condução dos trabalhos, pelo convívio, amizade, ensinamentos e exemplo profissional.

Ao Professor Benjamin Tracy, pela oportunidade e orientação do estágio no exterior, amizade e convívio.

Ao Professor Paulo Carvalho, pela amizade, convívio e auxílio nos momentos necessários.

Aos demais professores do Departamento de Solos, pela amizade, convívio e ensinamentos durante o transcorrer do curso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de qualificação profissional.

A CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado no Brasil e pela bolsa de Doutorado Sanduíche, que proporcionou uma experiência ímpar na minha vida.

A Cabanha Cerro Corado, pela cedência da área experimental e por oferecer toda a infraestrutura e apoio necessários para condução deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial ao Seu Zé, Adão Luis, ao Luis Antônio (Tonho) e Jader, pela amizade e por estarem sempre dispostos a auxiliar no que fosse necessário.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, os quais prefiro não nominar aqui, para evitar a injustiça do esquecimento de alguém. Saibam que todos vocês foram de grande importância durante essa jornada.

Aos amigos do Departamento de Plantas Forrageiras, pelo auxílio na condução dos trabalhos de campo e amizade.

A todos aqueles que de alguma forma colaboram para a realização deste trabalho.

ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO E RENDIMENTO DE SOJA SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM SISTEMAS DE MANEJO^{1/}

Autor: João Paulo Cassol Flores
Orientador: Ibanor Anghinoni

RESUMO

A integração da atividade agrícola com a pecuária tem sido indicada como alternativa à agricultura voltada para a produção exclusiva de grãos. As novas inter-relações estabelecidas com a presença dos animais podem tornar o sistema solo mais complexo. Desta forma, devem ser desenvolvidas técnicas de manejo adequadas a esse sistema de produção. Este trabalho foi conduzido com os objetivos de: a) avaliar o efeito do pisoteio animal sobre atributos físicos relacionados com a compactação do solo e no rendimento da soja em plantio direto; b) avaliar o efeito de pressões de pastejo na correção da acidez do solo pela aplicação superficial de calcário nesse sistema e; c) verificar o efeito de sistemas de manejo de solo e de culturas sobre a dinâmica da matéria orgânica e o estado de agregação do solo. Os trabalhos foram conduzidos em duas áreas experimentais sob integração lavoura-pecuária. A primeira, em São Miguel das Missões (RS, Brasil), em Latossolo Vermelho distroférico em plantio direto, com diferentes pressões de pastejo (10, 20, 30 e 40 cm de altura do pasto) no inverno. A segunda, localizada próxima a Pana (IL, EUA), em Argiaquol Vértico, com pastejo ao longo do ano em áreas de pastagens perenes de inverno e verão, pastejo no inverno com cultivo de milho e aveia em preparo convencional no verão e uma área com milho no verão e pousio no inverno. O pisoteio animal não causa compactação do solo em plantio direto e nem afeta o rendimento da soja. O calcário teve seu efeito máximo aos 24 meses após sua aplicação, com efeitos no pH, Ca trocável, Mg trocável e saturação por bases e por Al até 12,5, 25, 10, 25 e 10 cm de profundidade, respectivamente. A presença dos bovinos beneficia os efeitos em profundidade da calagem superficial. O sistema de produção de milho e aveia no verão e pastejo de resíduos no inverno, em preparo convencional, é mais eficiente no aumento dos teores e estoques de C e N nas frações total e particulada da MOS. Entretanto, esses atributos não se refletem no estado de agregação do solo, pois as pastagens perenes apresentam agregados maiores e mais estáveis em água.

^{1/} Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. (102 p.) – Março, 2008. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq e da Cabanha Cerro Coroadó.

SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES AND SOYBEAN YIELD UNDER LIVESTOCK-CROP INTEGRATION IN DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS^{1/}

Author: João Paulo Cassol Flores
Adviser: Ibanor Anghinoni

ABSTRACT

The integration of crop and livestock activities has been indicated as an alternative to the crop production system. Animals in this area can develop new inter-relationships in the soil and it can become more complex. Management techniques are necessary to be developed to integrated livestock-crop systems. This research was carried out to evaluate: a) the effect of animal trampling on soil physical attributes related to soil compaction, and its effect on soybean yield in no-tillage system; b) the effect of grazing pressures in the correction of soil acidity with surface lime application in such system and; c) the effect of soil and culture management systems in organic matter dynamics and in soil aggregation state. The researches were carried out in two experimental areas under livestock-crop integration. The first one, located in São Miguel das Missões (RS, Brazil), in a Rhodic Hapludox (Oxisol) under no-tillage, with different grazing pressures (10, 20, 30 and 40 cm of sward height) in the winter. The second one, located near to Pana (IL, USA), in a Virden series soil, with grazing in cold and warm season perennial pastures, grazing during the winter in areas with conventional tilled corn and oat in the summer and continuous corn in the summer and fallow during the winter. Animal trampling does not cause soil compaction or decrease soybean yield. The lime had its maximum effect at 24 months after application, by affecting pH values, exchangeable Ca and Mg and bases and Al saturation until 12.5, 25, 10, 25 and 10 cm depth, respectively. The cattle's presence is beneficial for a deeper effect of surface liming. The system with cultivation of corn and oat in the summer and grazing of residues in the winter is more efficient in increasing C and N contents and stocks in the total and particulate soil organic matter fractions. Nevertheless, these increases there is no effect in the soil aggregation state, since the perennial pastures results in bigger and more stable soil aggregates in water.

^{1/} Doctoral Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil. (102p.) – March, 2008. Research supported by CNPq and Cabanha Cerro Coroadó.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. CAPÍTULO 1: ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO	3
2.1. Integração lavoura-pecuária	3
2.2. Pisoteio animal e atributos físicos do solo	7
2.3. Dinâmica da correção da acidez do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto.....	10
2.4. Dinâmica da matéria orgânica e agregação do solo em sistemas de produção agrícola.....	12
2.5. Estabelecimento e rendimento de culturas após o pastejo em sistemas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto.....	14
3. CAPÍTULO 2: ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E RENDIMENTO DE SOJA EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO	17
3.1. Introdução.....	17
3.2. Material e Métodos	19
3.3. Resultados e Discussão	23
3.4. Conclusões.....	38
4. CAPÍTULO 3: ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO COM APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO	39
4.1. Introdução.....	39
4.2. Material e Métodos	41
4.3. Resultados e Discussão	44
4.4. Conclusões.....	56
5. CAPÍTULO 4: CARBONO E NITROGÊNIO EM FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA E AGREGAÇÃO DO SOLO EM ÁREA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM DIFERENTES MANEJOS	58
5.1. Introdução.....	58
5.2. Material e Métodos	60
5.3. Resultados e Discussão	62
5.4. Conclusões.....	75
6. CONCLUSÕES GERAIS	76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
8. ANEXOS	86
9. APÊNDICES	

RELAÇÃO DE TABELAS

Página

1. Dados médios de carga animal por área e de resíduo vegetal remanescente sobre o solo após o período de pastejo em área sob plantio direto e integração lavoura pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno (2001 a 2006).....	21
2. Atributos físicos do solo após o primeiro ciclo de pastejo (Novembro/01) e após o primeiro cultivo de soja (Maio/02), em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno	24
3. Atributos físicos do solo após o segundo ciclo de pastejo (Novembro/02) e após o segundo cultivo de soja (Maio/03), em área sob plantio e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno	25
4. Atributos físicos do solo após o terceiro ciclo de pastejo (Novembro/03) e após o terceiro cultivo de soja (Maio/04), em área sob plantio e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno	26
5. Atributos físicos do solo após o quarto ciclo de pastejo (Novembro/04) e após o quarto cultivo de soja (Maio/05), em área sob e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno	27
6. Atributos físicos do solo após o quinto ciclo de pastejo (Novembro/05) em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno.....	28
7. Resumo da análise variância dos resultados obtidos amostragem periódicas de solo em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno.....	28
8. Precipitação pluviométrica registrada no período de condução do trabalho na Fazenda do Espinilho, São Miguel das Missões – RS.....	37
9. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob SPD, em diferentes camadas	42
10. Estoques de C nas frações total (COT) e particulada (C-MOP) da matéria orgânica em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura).....	69
11. Estoques de N nas frações total (NT) e particulada (N-MOP) da matéria orgânica em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura).....	69

RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

1. Valores médios de densidade após cinco ciclos de pastejo e quatro ciclos de cultivo de soja em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno (ns= não significativo)....	29
2. Valores médios de macroporosidade após cinco ciclos de pastejo e quatro ciclos de cultivo de soja em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. (ns= não significativo)...	30
3. Valores médios de microporosidade após cinco ciclos de pastejo e quatro ciclos de cultivo de soja em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. (ns= não significativo)...	31
4. Valores médios de porosidade total após cinco ciclos de pastejo e quatro ciclos de cultivo de soja em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. (ns= não significativo)...	32
5. Estande de plantas e rendimento de grãos de soja na safra 2001/02 em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. Letras minúsculas e maiúsculas comparam médias entre população e rendimento de grãos, respectivamente. Teste DMS 5%.....	34
6. Estande de plantas e rendimento de grãos de soja na safra 2002/03 em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. Diferenças entre médias não significativas. Teste DMS 5%.....	34
7. Estande de plantas e rendimento de grãos de soja na safra 2004/05 em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. Médias seguidas da mesma letra minúsculas não diferem entre si pelo teste DMS 5%	35
8. Estande de plantas e rendimento de grãos de soja na safra 2005/06 em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. Diferenças entre médias não significativas.....	35
9. Valores de pH em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno.....	45
10. Teor de cálcio trocável em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno.....	46
11. Teor de magnésio trocável em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno	47
12. Valores de saturação por bases em diferentes profundidades e	

épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno	48
13. Valores de saturação por alumínio em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno	49
14. pH do solo (a), Ca trocável (b) e Mg trocável (c), saturação por bases (d) e saturação por Al (e) 24 meses após a aplicação de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. (ns= não significativo)	52
15. Teores de carbono orgânico total (COT) em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno	55
16. Carbono orgânico total (COT) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo	63
17. Nitrogênio total (NT) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo	64
18. Teor de C na matéria orgânica particulada do solo (C-MOP) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo	64
19. Teor de N na matéria orgânica particulada (N-MOP) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo	65
20. Proporção do carbono orgânico total do solo (COT) na forma de carbono na matéria orgânica particulada (C-MOP) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo	65
21. Proporção do nitrogênio total do solo (NT) na forma de nitrogênio na matéria orgânica particulada (N-MOP) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo	66
22. Relação C:N da matéria orgânica do solo em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de	

cobertura) do solo.....	66
23. Relação C:N da matéria orgânica particulada do solo em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.....	67
24. Densidade do solo em em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo	68
25. Distribuição de classes dos agregados nas camadas de 0-5 (a), 5-10 (b), 10-15 (c) e 15-20 (d) cm e diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados (e) em diferentes sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura)	70

1. INTRODUÇÃO

A agricultura sofreu profundas alterações após a Segunda Guerra Mundial. Anteriormente a esse evento, a atividade agrícola era praticada em pequenas propriedades, com produção de culturas diversas e integradas à atividade pecuária, com grande parte da demanda dos nutrientes sendo proveniente da sua ciclagem e os produtos visavam abastecer o mercado local. Com o passar do tempo, o número de propriedades rurais vem diminuindo e o seu tamanho aumentando, tornando-se mais especializadas (monocultura), mais dependentes da entrada de nutrientes externos à propriedade (fertilizantes minerais) e com a visão voltada para atender demandas de mercados externos.

Essas modificações, ocorridas nos últimos 60-70 anos, contribuíram para atender a crescente demanda mundial por fibras e por alimentos, que tem acompanhado o crescimento populacional do planeta. Porém, todas essas transformações ocorreram às custas da degradação de recursos ambientais, entre eles, o solo, a água e o ar.

A crescente necessidade mundial de preservação dos recursos naturais e do meio ambiente tem levado à busca de alternativas para produção de fibras e de alimentos, que sejam mais sustentáveis e menos agressivas ao meio ambiente. A solução mais apontada para esse desafio é o retorno à agricultura anteriormente praticada, que consistia de uma produção de culturas mais diversificada e integrada às atividades pecuárias.

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) tem grande potencial para a utilização de sistemas de integração lavoura-pecuária, pois dos cinco e meio milhões de hectares cultivados sob sistema plantio direto (SPD) no verão, em torno de três milhões permanecem com culturas de cobertura de solo durante o inverno, fato que aparentemente não tem nenhuma justificativa. Em

ambientes temperados, como na região do *Corn Belt* americano, o pastejo de culturas de cobertura do solo é vista como alternativa para diminuição dos custos de alimentação dos animais no inverno.

A mistura de aveia preta e azevém têm sido a principal cobertura de solo cultivada durante o inverno no RS. Essas espécies apresentam potencial para serem pastejadas, tornando possível a utilização dessas áreas para pastejo, permitindo a integração das atividades agrícola e pecuária. Com a integração lavoura-pecuária (ILP) nessas áreas, há diversificação de renda, o que aumenta a rentabilidade da propriedade, tornando-a menos dependente da cultura de verão, diminuindo os riscos do agronegócio. Essa possibilidade de diversificação enfrenta alguma resistência pelos produtores de grãos, por possíveis efeitos negativos causados pelo pisoteio animal sobre o solo, além de aspectos econômicos e sociais relacionados aos produtores de grãos. O receio da compactação do solo pelo pisoteio, em geral, se dá pelo senso comum existente de que a presença de animais nas áreas de lavoura possa compactar o solo, o que vai prejudicar o rendimento de grãos das culturas de verão.

O desenvolvimento de adequadas técnicas de manejo dos componentes do sistema de ILP (solo, planta e animal), tem sido apontado como o grande desafio dos sistemas integrados de produção, juntamente com a manutenção de níveis elevados de produção de alimentos e de fibras. Para que esse conhecimento seja gerado, é necessário que ocorra a integração dentro e entre os diversos seguimentos e centros de pesquisa sobre essa temática, pois há necessidade da formação de grupos interdisciplinares de pesquisa, para que sejam avaliados os diferentes aspectos da ILP, incluindo o técnico, o econômico e o social. Para que esses objetivos sejam atingidos, são necessários trabalhos de longa duração, onde o conhecimento sobre esses sistemas de produção pode demorar alguns anos para ser gerado, sendo necessária, por isso, a compreensão da sociedade, incluindo os produtores, os pesquisadores e as agências financiadoras de pesquisa.

Este trabalho teve por objetivos: a) avaliar os efeitos da integração lavoura-pecuária sobre atributos físicos e químicos do solo e sobre a produção de soja sob plantio direto em clima subtropical e; b) avaliar o efeito de sistema de integração lavoura-pecuária sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas de manejo do solo e de culturas em região de clima temperado.

2. CAPÍTULO 1: ESTADO DO CONHECIMENTO ATUAL

2.1. Integração lavoura-pecuária

Em muitos países a agricultura tem se tornado altamente especializada, sendo que, em muitos casos, pode-se observar grandes áreas cultivadas em monocultura ao longo dos anos. A alteração, de uma agricultura diversificada e de pequena escala de produção, para uma agricultura altamente especializada em larga escala, é uma resposta às pressões políticas, econômicas e regulatórias, exercidas pelo mercado internacional e pela demanda mundial por fibras e alimentos. Porém, essa mudança para a atividade agrícola altamente produtiva tem ocorrido freqüentemente às custas de grande degradação de recursos naturais, com a contaminação dos cursos de água por produtos químicos e o aumento da concentração dos gases responsáveis pelo efeito estufa (Russelle & Franzluebbbers, 2007). Com a crescente necessidade de preservação do meio ambiente, o retorno à agricultura nos moldes semelhantes a que vinha sendo praticada anteriormente, com maior diversificação das culturas na propriedade e integrando a atividade agrícola com a pecuária (Allen et al., 2007; Franzluebbbers, 2007; Franzluebbbers & Stuedemann, 2007; Russelle et al., 2007; Sulc & Tracy, 2007) tem sido apontada como alternativa para a preservação do meio ambiente e a manutenção da sustentabilidade do sistema produtivo.

É nesse contexto que se situa a proposta de integração lavoura-pecuária, pois se entende que essas atividades, quando praticadas isoladamente são sustentáveis por um determinado espaço de tempo, mas não se perpetuam, uma vez que ambas são cíclicas, sendo ora o cenário favorável para o pecuarista e ora favorável para o produtor de grãos (Cassol, 2003). A

agricultura e a pecuária não devem ser vistas como atividades antagônicas, mas sim como atividades complementares que, quando integradas, e adequadamente manejadas, funcionam em sinergismo, havendo vantagens para ambos os setores produtivos (Moraes et al., 2002; Cassol, 2003; Allen et al., 2007). A diversificação das atividades em uma propriedade agrícola é fundamental para uma agricultura eficiente, produtiva e estável (Moraes et al., 2002; Cassol, 2003). A rotação pastagens-culturas de grãos torna-se uma das estratégias mais promissoras para desenvolver sistemas de produção menos intensivos no uso de insumos e, por sua vez, mais sustentáveis no tempo (Cassol, 2003).

Várias razões têm sido levantadas para apontar a necessidade de mudança do sistema especializado de cultivo para um sistema mais diversificado de produção com integração lavoura-pecuária. Dentre essas razões pode-se citar: 1) o fato que as grandes propriedades especializadas de produção operam na margem mínima de lucro; 2) a vulnerabilidade das propriedades que dependem apenas de uma cultura; 3) os elevados custos de combustíveis e nutrientes (fertilizantes minerais); 4) as moléstias se tornam mais danosas em sistemas de monocultura e; 5) a diminuição do rendimento induzido pelo manejo ao longo dos anos, por afetar atributos químicos e físicos do solo e a diversidade biológica (Franzluebbers, 2007).

O Estado do Rio Grande do Sul apresenta grande potencial para adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária, pois durante o inverno, mais de 3,0 milhões de hectares, conduzidos sob SPD no verão, são ocupados por culturas de cobertura (Amado et al., 2006; CONAB, 2008). A integração dessas áreas com a pecuária, além de tornar mais eficiente e produtivo o uso da terra, gera mais renda para os produtores e pode produzir forte impacto positivo sobre a produção pecuária da região Sul do Brasil. Além disso, não há justificativa plausível para que, durante o inverno, áreas sob SPD permaneçam apenas com culturas de cobertura, com o único propósito de produção de palha (Cassol, 2003).

A integração de atividades agrícolas com a pecuária foi intensificada no RS a partir da década de 70, nas regiões do Planalto Médio e Missões, com a introdução de novas espécies forrageiras de inverno (Mello, 1996). A

intensificação de uso desse sistema coincide com a época de início do SPD nas principais regiões produtoras de milho e soja no Estado.

Uma das premissas do SPD é a manutenção permanente de cobertura vegetal sobre o solo. Para atingir esse fim, no RS é utilizada durante o inverno, na maior parte dos anos, uma mistura de aveia preta + azevém, espécies que apresentam potencial para serem pastejadas durante boa parte do seu ciclo. Dessa forma, nessas áreas, pode-se aliar a produção de grãos, no verão, com a produção animal, no inverno, gerando uma fonte extra de renda para os produtores durante o período de entressafra das culturas de verão.

Em propriedades nas quais durante o verão toda a área é utilizada para o cultivo de grãos, é necessário que se tenha planejamento e manejo adequados durante o inverno, visando à retirada dos animais da pastagem, no final do ciclo de pastejo, em condições de comercialização, para que não seja necessária a disponibilização de outras áreas e/ou alimentação no cocho para terminação dos animais, o que oneraria os custos de produção, diminuindo a rentabilidade do sistema.

As justificativas para a adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária em regiões temperadas, como na região do *Corn Belt* americano, são as mesmas das regiões tropicais e subtropicais. A maioria dos sistemas de integração na região do *Corn Belt* é feita de três maneiras: 1) rotação de culturas de grãos de verão com pastagens perenes; 2) rotação de culturas de grãos de verão com pastagens anuais e; 3) utilização dos resíduos da cultura de verão para pastejo (Sulc & Tracy, 2007). Há vários modos de se manejar as áreas sob integração considerando essas três opções, de forma isolada ou combinadas, muitas das quais são descritas por Sulc & Tracy (2007). Vale ressaltar, que, em função das baixas temperaturas no inverno, muitos desses sistemas de integração ocorrem em áreas cultivadas com preparo convencional do solo até duas vezes por ano.

Ao contrário daquilo que é preconizado no Sul do Brasil, um dos principais objetivos da integração lavoura pecuária na região do *Corn Belt*, é diminuir os custos da alimentação do gado no inverno, que podem responder pela metade do custo anual de produção da carne bovina (Sulc & Tracy, 2007).

Dentre os benefícios da integração lavoura-pecuária, pode-se citar: 1) a possibilidade de introdução, renovação e recuperação de pastagens com baixa aplicação de capital; 2) a utilização, por parte da pastagem, do efeito residual do adubo da cultura de grãos, melhorando a qualidade e a produtividade das pastagens; 3) a produção de forragem na época mais crítica do ano, no caso o inverno; 4) a diminuição da incidência de pragas, doenças e plantas indesejáveis na área de lavoura, devido à rotação de pastagens e culturas de grãos, fundamental para o sistema plantio direto; 5) o aumento da rentabilidade da propriedade e diminuição da dependência dos produtores das culturas de verão e; 6) o aumento da liquidez da propriedade, proporcionado pela venda do gado após o período de pastejo (Cassol, 2003; Allen et al., 2007; Franzluebbers, 2007; Franzluebbers & Stuedemann, 2007; Russelle et al., 2007; Sulc & Tracy, 2007).

Apesar de todos os benefícios citados da integração lavoura-pecuária, tanto no Sul do Brasil como na região do *Corn Belt* americano, muitos produtores se mostram relutantes na adoção desses sistemas mistos de produção. Os motivos para essa relutância, em ambas as regiões, são praticamente os mesmos, com exceção dos incentivos governamentais que são dados aos produtores em larga escala nos Estados Unidos (Sulc & Tracy, 2007). Dentre esses motivos, são citados: 1) a tradição do cultivo de monoculturas, que são de mais fácil manejo; 2) o maior volume de trabalho e maior complexidade de manejo das áreas sob sistemas integrados de produção; 3) a falta de entendimento por parte dos produtores do sistema produtivo como um todo, pois há a valorização maior do desempenho individual de um dos componentes e; 4) a falta de incentivos para adoção de tais sistemas (Sulc & Tracy, 2007).

A utilização de sistemas de integração lavoura-pecuária sob SPD é perfeitamente viável no RS, pois aumenta a rentabilidade econômica da propriedade agrícola como um todo (Fontaneli et al., 2000; Ambrosi et al., 2001). Na região Centro-Oeste do Brasil, a integração lavoura-pecuária tem contribuído para a viabilização econômica das propriedades rurais e do próprio SPD (Mello, 2001). Para este autor, pelo fato do sistema de integração lavoura-pecuária ser relativamente novo, permanecem alguns questionamentos em relação à compactação do solo causada pelo gado, aos efeitos das alterações

dos atributos de solo na cultura subsequente ao pastejo e sobre a viabilidade econômica desse sistema.

Sistemas de integração lavoura-pecuária bem manejados podem ter efeitos positivos sobre o solo, a lucratividade do sistema produtivo e o uso dos recursos naturais (Sulc & Tracy, 2007). Além disso, esses sistemas podem ser economicamente competitivos e menos danosos ao meio ambiente do que os sistemas de produção adotados atualmente. Em várias regiões dos Estados Unidos, há um ganho em renda nas propriedades agrícolas com a adoção de sistemas integrados de produção (Franzluebbers, 2007; Sulc & Tracy, 2007), chegando até 20%, quando comparado ao atual manejo adotado nas áreas de produção agrícola (Franzluebbers, 2007).

2.2. Pisoteio animal e atributos físicos do solo

A compactação do solo é um processo de densificação, o qual pode acarretar um aumento de resistência à penetração das raízes no solo, sendo essas alterações desencadeadas pela aplicação de cargas na superfície do solo (Taylor & Brar, 1991; Soane & Ouwerkerk, 1994).

A compactação causada pelo excessivo tráfego de máquinas e implementos agrícolas e pelo pisoteio animal em áreas sob integração lavoura-pecuária, são algumas das principais causas da degradação da capacidade produtiva de solos agrícolas (Albuquerque et al., 2001). Por isso, esse assunto tem sido alvo de pesquisa em todas as regiões mundiais, sobretudo nas regiões tropicais, onde a suscetibilidade dos solos à degradação é maior (Larson et al., 1980).

De um modo geral, pode-se dizer que todos os solos sob pastejo sofrem compactação devido ao tráfego dos animais, sobretudo quando o solo está úmido (Tanner & Mamaril, 1959; Trein et al., 1991; Correa & Reichardt, 1995). Nessa condição, o pisoteio animal causa severa redução na macroporosidade, aumento da densidade do solo e redução da infiltração de água nas camadas mais superficiais do solo (Tanner & Mamaril, 1959; Taylor & Brar, 1991; Trein et al., 1991; Bertol et al., 1998; Bertol et al., 2000), sendo esse efeito mais acentuado em solos de textura argilosa do que em solos arenosos (Tanner & Mamaril, 1959).

A utilização de sistemas de integração lavoura-pecuária também pode acarretar mudanças nos atributos químicos e biológicos do solo, o que também pode afetar o desenvolvimento radicular (Taylor & Brar, 1991; Silva et al., 2000) e a produção das culturas que seguem o período de pastejo (Silva et al., 2000; Albuquerque et al., 2001; Salton et al., 2002). A magnitude dessas alterações, principalmente nos atributos físicos do solo, está relacionada ao manejo que é adotado nas áreas sob pastejo, podendo variar com a textura, o teor de matéria orgânica (Larson et al., 1980; Smith et al., 1997), o teor de umidade do solo (Tanner & Mamaril, 1959; Trein et al., 1991; Correa & Reichardt, 1995), a biomassa vegetal sobre o solo (Silva et al., 2000; Silva et al., 2003), a espécie de planta, a intensidade e o tempo de pastejo e a espécie e a categoria animal (Correa & Reichardt, 1995; Salton et al., 2002).

A espécie e a categoria animal vão determinar a carga, em termos de kg de peso vivo por unidade de área, e a pressão que vai ser exercida sobre o solo durante o pastejo. O manejo da lotação animal é que vai fazer com que os efeitos sobre os atributos físicos do solo se manifestem com maior ou menor intensidade. Para minimizar os efeitos do casco dos animais sobre o solo, é fundamental que se tenha uma quantidade adequada de cobertura vegetal sobre o mesmo, o que diminui o contato direto do casco com o solo, funcionando como um amortecedor da pressão exercida pelos animais sobre o solo (Silva et al., 2000).

Pela estreita relação existente entre atributos físicos do solo e o rendimento das culturas (Letey, 1985), faz-se necessária a mensuração dos mesmos, a fim de se verificar se esses não se encontram em níveis prejudiciais ao desenvolvimento vegetal. Os atributos físicos são afetados pela pressão exercida sobre a superfície do solo, seja pelo maquinário agrícola ou pelo pisoteio animal. A avaliação do efeito dessas pressões é geralmente baseada na mensuração de alguns atributos físicos, relacionados com a compactação do solo, que podem afetar diretamente o rendimento das culturas, dentre os quais a densidade, a macroporosidade, a microporosidade, a taxa de infiltração de água e a resistência do solo à penetração.

A estrutura do solo, mesmo não sendo considerada um fator de crescimento para as plantas, tem grande influência sobre a movimentação de água, transferência de calor e aeração, densidade e porosidade do solo (Letey,

1985), podendo influenciar o rendimento das culturas (Wohlenberg et al., 2004), devendo, portanto, ser também considerada em avaliações que buscam relacionar o efeito de sistemas de manejo no solo e no rendimento das culturas.

Geralmente, o pisoteio animal promove um aumento na densidade e na microporosidade do solo e diminuição na taxa de infiltração de água, na macroporosidade e na porosidade total do solo, principalmente na camada de 0-5 cm (Trein et al., 1991; Moraes & Lustosa, 1997; Bertol et al., 1998; Salton et al., 2002). Entretanto, esse aumento da densidade nas camadas superficiais pode ser revertido pela cultura de verão subsequente (Moraes & Lustosa, 1997). Nesse ponto, cabe fazer uma ressalva sobre a interpretação de resultados como esse, para que não seja difundida a idéia errônea de que a cultura da soja é capaz de promover a recuperação de áreas compactadas. Se tal fato fosse verdadeiro, não haveria razão para tal preocupação de produtores e pesquisadores em relação à compactação do solo em extensas áreas cultivadas com soja.

A presença de animais (bovinos) em áreas de produção de grãos integradas com pastejo não interferiu nos atributos físicos do solo, exceto por um ligeiro aumento da densidade na camada superficial, quando comparada o sistema de integração com áreas de pastagens perenes sucedidas por sistemas agrícolas (Spera et al., 2004).

Os macroporos são o caminho preferencial para o crescimento das raízes (Camargo & Alleoni, 1997) estando a resistência oferecida pelo solo, à penetração de raízes relacionada à continuidade e à permanência dos mesmos (Abreu, 2000). Deste modo, em solos compactados, em que há diminuição dos macroporos, o desenvolvimento radicular pode ser prejudicado (Silva et al., 2000), sendo esse o principal efeito danoso do pisoteio animal sobre o solo (Mello, 2002).

A integração lavoura-pecuária apresenta o animal e sua ação compactadora; de outro lado, existe a ação da pastagem e das culturas de verão no sentido de minimizar e até mesmo reverter esse processo. Além disso, há o revolvimento do solo na linha da semeadura, que pode promover o rompimento de camadas superficiais compactadas. A resultante desse conjunto de forças e práticas vai depender do manejo adotado com relação aos três

componentes do sistema de integração (solo, planta e animal). Práticas, como a calagem e a adubação, que visam garantir uma boa condição nutricional para as plantas, associadas a um correto ajuste da lotação e do método de pastejo, são fundamentais para garantir a produtividade desses sistemas integrados de produção (Moraes et al., 2002).

2.3. Dinâmica da correção da acidez do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto

A mudança do sistema de preparo do solo, do convencional para o direto, trouxe diversas dúvidas a respeito, principalmente, da correção da acidez do solo pela aplicação de calcário. No sistema de cultivo convencional (SCC), as recomendações técnicas indicavam a necessidade de incorporação do calcário para aumentar a sua reatividade no solo. Já no SPD, a calagem é superficial, sem posterior incorporação, e isso poderia causar uma diminuição da eficiência dessa prática. Com o passar dos anos, a adoção do SPD aumentou consideravelmente no RS, chegando a 80% da área cultivada no verão no Estado (Amado et al., 2006). As pesquisas nessa temática têm seguido esse aumento, e, atualmente, muito se conhece da dinâmica da correção da acidez do solo em áreas sob SPD (Amaral, 2002). Alguns relatos da literatura mostram que o efeito do calcário aplicado superficialmente, sobre a correção da acidez do solo, se restringe à camada superficial (Pöttker & Ben, 1998; Rheinheimer et al., 2000b; Rheinheimer et al., 2000a; Amaral & Anghinoni, 2001), enquanto que outros demonstram que esse efeito pode atingir camadas mais profundas (Caires et al., 1998; Petreire & Anghinoni, 2001; Caires et al., 2003; Gatiboni et al., 2003), mostrando que a aplicação superficial desse insumo é uma prática eficiente em aumentar, ou, no mínimo, manter os rendimentos das culturas (Cassol, 2003).

A magnitude do efeito, em profundidade, do calcário aplicado em superfície no solo sob SPD depende de características do solo, do clima, do tempo de adoção do SPD, do sistema de rotação de culturas, do próprio calcário e do manejo adotado na área. Como principais mecanismos determinantes da dinâmica do calcário em SPD, pode-se citar: a descida de partículas de calcário por meio dos bioporos do solo; a movimentação iônica de

produtos resultantes da dissolução do calcário, sobretudo de Ca e Mg, por ânions solúveis; a translocação de cátions divalentes e a neutralização da acidez do solo por ligantes orgânicos e a amenização da fitotoxicidade do alumínio pelos resíduos vegetais. A participação desses mecanismos na dinâmica da correção da acidez do solo é variável, ocorrendo sempre de forma simultânea, o que dificulta a sua quantificação de forma isolada (Amaral, 2002).

Em sistemas de integração lavoura-pecuária, as alterações promovidas pelo tráfego animal podem afetar a dinâmica do calcário em relação a áreas puramente de lavouras sob SPD. O pisoteio animal, quando em solo úmido, causa redução da macroporosidade e redução da taxa de infiltração de água no solo nas camadas mais superficiais (Tanner & Mamaril, 1959; Taylor & Brar, 1991; Trein et al., 1991; Bertol et al., 1998; Bertol et al., 2000; Lanzanova et al., 2007), o que pode restringir o efeito da calagem à camada superficial. Por outro lado, a deposição de excrementos de origem animal, principalmente de fezes, promove uma maior atividade da meso e macrofauna do solo, o que gera a formação de um grande número de galerias no interior do solo (bioporos) (Edwards et al., 1988), pelos quais pode se dar o deslocamento de partículas finas de calcário, favorecendo a correção da acidez do solo em subsuperfície.

A degradação de resíduos vegetais, pela microbiota do solo, libera ácidos orgânicos de baixo peso molecular, os quais podem atuar como ligantes orgânicos, favorecendo o aumento de Ca e Mg e a diminuição do alumínio fitotóxico em profundidade (Franchini et al., 1999a; Franchini et al., 2000; Moraes et al., 2007). Espera-se que fenômeno semelhante ocorra quando da degradação dos resíduos animais, principalmente das fezes.

Conforme salientado por Amaral (2002), o volume de macro e de bioporos e a quantidade de resíduos vegetais adicionada são fatores que interferem no efeito, em profundidade, do calcário aplicado superficialmente no solo, os quais podem ser alterados pela presença de animais em pastejo. Portanto, a utilização de sistemas de integração lavoura-pecuária pode promover alterações na dinâmica do calcário no SPD.

As informações sobre a dinâmica da calagem em sistemas de integração lavoura-pecuária em SPD são escassas, sendo freqüentemente encontrados, na literatura, trabalhos que enfocam calagem em áreas de

pastagem de forma isolada ou em áreas de pastagem que foram transformadas em lavouras (Gatiboni, 1999; Kaminski et al., 2000; Rheinheimer et al., 2000b; Rheinheimer et al., 2000a).

Em áreas de integração lavoura-pecuária, a utilização de elevada lotação animal por área pode promover alterações nos atributos físicos do solo, as quais podem comprometer o efeito, em profundidade, do calcário aplicado na superfície do solo. Por outro lado, a presença de um grande número de animais por área, significa uma maior deposição de excrementos, principalmente de esterco, que pode contribuir para a descida, no perfil do solo, de produtos resultantes da dissolução do calcário e na diminuição da fitotoxicidade do alumínio.

2.4. Dinâmica da matéria orgânica e agregação do solo em sistemas de produção agrícola

A exploração agrícola interfere na quantidade de C adicionada ao solo, em função dos sistemas de manejo do solo e de culturas, podendo variar, de baixas adições, em áreas de pousio, a altas adições, em áreas em que são utilizadas culturas que aportam grande quantidade de resíduo ao solo durante o ano todo (Lovato et al., 2004).

A adição de resíduos culturais ao solo estabelece um fluxo de C e N, cuja magnitude pode promover alterações da atividade biológica, do estado de agregação do solo e ainda contribuir para o surgimento de propriedades emergentes do solo (Lovato et al., 2004). As propriedades emergentes do solo, relacionadas ao C (agregação, porosidade, infiltração de água, capacidade de retenção de água, capacidade de troca de cátions, etc.), de forma geral, melhoram a qualidade do solo (Vezzani, 2001).

Alterações nos teores de C e N totais do solo, geralmente não têm sido detectadas, em curto prazo, sendo mais facilmente identificadas em frações lábeis da MOS, como na matéria orgânica particulada (MOP) (Haynes, 2005). Os conteúdos de C e N na fração particulada da MOS podem ser rapidamente aumentados em sistemas de uso que minimizem o revolvimento do solo, o que torna esses atributos bons indicadores de alterações do ciclo do C no solo em curto prazo de tempo (Franzluebbers & Arshad, 1997).

O carbono e o nitrogênio têm seus ciclos no solo bastante interligados, alterando-se basicamente os mecanismos de adição e de perda de N (Bayer et al., 2000b). Em solos degradados e com baixo conteúdo de matéria orgânica, geralmente se observa deficiência de N, que tem se mostrado um fator limitante ao aumento dos teores de C, principalmente nos sistemas de manejo do solo que envolvem apenas gramíneas (Lovato et al., 2004). A adição de leguminosas e a adubação nitrogenada nesses sistemas são altamente eficientes para o aumento dos teores de C, e, conseqüentemente, de N do solo, colaborando para a melhoria da sua qualidade e para o aumento da produtividade das culturas de interesse econômico (Vezzani, 2001). A adição de resíduos ao solo, via sistemas de culturas, ao longo do tempo pode promover o aumento dos estoques de C (Bayer et al., 2000b; Bayer et al., 2004; Bayer et al., 2006a; Bayer et al., 2006b), e conseqüentemente de N, colaborando para o seqüestro de C atmosférico e diminuição da concentração de gases responsáveis pelo efeito estufa (Lal, 2004).

A MOP, apesar de representar uma pequena porção da massa de solo, é extremamente importante para a sua qualidade, pois é a principal rota de retorno de C para o solo; é a principal fonte de C celular e energia para os microrganismos do solo; é a principal via de reciclagem de nutrientes no solo e; é de fundamental importância para a manutenção da estrutura do solo, sobretudo da macroagregação (Haynes, 2005).

O SPD, por manter os teores de carbono em níveis adequados e proporcionar maior qualidade, sustentabilidade e capacidade de produção dos solos agrícolas, é considerado o sistema de preparo mais eficiente em manter e recuperar os teores de matéria orgânica e a estrutura do solo (Paladini & Mielniczuk, 1991; Silva & Mielniczuk, 1997; Bayer et al., 2000a) e têm sido largamente adotado na agricultura mundial. No entanto, muitas áreas continuam sendo cultivadas sob SCC, principalmente nas regiões temperadas do planeta, como na região do *Corn Belt* americano (Sulc & Tracy, 2007), devido principalmente às baixas temperaturas no inverno.

O contínuo preparo do solo, com aração e gradagem, promove a diminuição dos estoques de C e N e o estado de agregação do solo, o que está relacionado com a região climática, obedecendo à seguinte ordem: clima

tropical úmido > clima tropical seco > clima temperado úmido > clima temperado seco (Franzluebbers et al., 2001). A região climática afeta diretamente a atividade da microbiota do solo, onde se concentram os microrganismos responsáveis pela degradação dos resíduos adicionados ao solo. Em regiões de clima frio, em muitas ocasiões não têm sido verificadas diferenças entre o SPD e SCC quanto aos teores e estoques de C no solo (Yang & Wander, 1999), o que pode ser explicado pela baixa atividade microbiana na estação fria, promovendo o acúmulo de C nas áreas sob SCC, sobretudo na fração particulada da MOS (Haynes, 2005).

A MOP pode funcionar como um núcleo na formação de macroagregados (Bronick & Lal, 2005; Haynes, 2005), devido a sua composição, que faz com que grande parte da atividade microbiana se concentre no seu entorno (Haynes, 2005). Essa grande atividade microbiana promove a liberação de compostos orgânicos, que podem funcionar como agentes cimentantes, colaborando para formação e estabilização dos agregados (Tisdall & Oades, 1982; Paladini & Mielniczuk, 1991; Bronick & Lal, 2005; Haynes, 2005).

As raízes das plantas também exercem grande influência na formação e estabilização de agregados (Tisdall & Oades, 1982; Carpenedo & Mielniczuk, 1990; Silva & Mielniczuk, 1997; Bronick & Lal, 2005), pois formam um emaranhado de partículas e raízes, reorganizando e reorientando as partículas e liberando compostos orgânicos cimentantes, promovendo, dessa forma, a formação e a estabilização de micro e macroagregados. (Tisdall & Oades, 1982; Silva & Mielniczuk, 1997; Bronick & Lal, 2005). Neste sentido, as gramíneas perenes são mais eficazes, por apresentarem maior densidade e melhor distribuição de raízes no solo (Silva & Mielniczuk, 1997).

2.5. Estabelecimento e rendimento de culturas após o pastejo em sistemas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto

Nesse ponto cabe ressaltar que um dos objetivos iniciais deste trabalho, no Sul do Brasil, é mostrar que é possível a utilização de áreas anteriormente exploradas apenas com grãos para a produção de carne bovina,

sem que isso venha a comprometer o rendimento da cultura principal semeada na seqüência do pastejo. Com isso, fica explícito que não se tem como objetivo principal aumentar o rendimento de grãos das culturas de verão, o que pode vir acontecer com o tempo, em função das inter-relações que podem se estabelecer em sistemas de integração lavoura-pecuária (Allen et al., 2007).

As alterações nos atributos físicos do solo provocadas pelo pisoteio animal (Tanner & Mamaril, 1959; Taylor & Brar, 1991; Bertol et al., 1998; Bertol et al., 2000; Cassol, 2003), podem dificultar o estabelecimento das culturas implantadas na seqüência do pastejo.

A redução na emergência de plantas em áreas sob SPD, anteriormente submetida à pastejo, pode ser atribuída à dificuldade de penetração dos órgãos sulcadores das semeadoras no solo, fazendo com que parte da semente fique localizada próxima à superfície do solo, em condições desfavoráveis à germinação (Trein et al., 1991). Assim, a semeadura direta de milho com sulcador resultou em maior rendimento de grãos quando comparado com outros sistemas de preparo do solo, em área submetida a dois períodos curtos de pastejo com elevada carga animal (Uhde et al., 1996).

Vários são os exemplos (Bassani, 1996; Silva et al., 2000; Albuquerque et al., 2001; Assmann et al., 2003; Spera et al., 2004) em regiões subtropicais, em que a presença de animais durante o inverno, em áreas de lavouras de verão, não causam prejuízos ao rendimento de grãos das culturas de verão. Esses resultados suportam a afirmação de Cassol (2003), de que não há razão nenhuma para que extensas áreas no Planalto Médio do RS permaneçam ocupadas apenas por espécies vegetais, destinadas única e exclusivamente à produção de resíduo para a manutenção do SPD.

O pisoteio animal e o trânsito de máquinas e implementos agrícolas, no período do inverno, aumentaram a densidade do solo e a resistência à penetração e reduziram a sua macroporosidade, de forma a diminuir o crescimento e a produtividade da cultura do milho. Os danos provocados por essas alterações podem ter sido agravados pela ocorrência de um período de déficit hídrico prolongado nessa cultura. A não ocorrência de déficit hídrico contribuiu para amenizar e mesmo neutralizar o efeito da maior densidade do solo sob SPD, independentemente se com ou sem pastejo no inverno, sobre o

rendimento de grãos e de silagem de milho, em relação a áreas sob sistema convencional de cultivo manejadas da mesma forma (Silva et al., 2000).

Em regiões de clima temperado, em que durante o inverno ocorre o congelamento do solo, como na região do *Corn Belt* americano, os efeitos do pisoteio sobre a compactação do solo são maximizados quando o conteúdo de água é elevado e temperatura é alta o suficiente para que ocorra o degelo do solo, devendo ser evitado o pastejo e o tráfego de máquinas nessas condições. Numa região com tais características, o pastejo rotativo de resteva de milho, a cada 28 dias, em área sob SPD, durante três anos, não teve efeito negativo sobre o estande de plantas e o rendimento de grãos da soja (Clark et al., 2004).

3. CAPÍTULO 2: ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E RENDIMENTO DE SOJA EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO

3.1 Introdução

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) possui em torno de 5,5 e 1,0 milhões de hectares (ha) ocupados por culturas de grãos de verão e inverno, respectivamente (CONAB, 2008). Da área cultivada no verão, estima-se que 80% da mesma seja conduzida sob sistema plantio direto (SPD) (Amado et al., 2006). Dessa forma, pode-se verificar que uma área superior a 3,0 milhões de hectares permanece ocupada por culturas de cobertura ou em pousio durante o inverno.

Uma das premissas do SPD é a manutenção do solo coberto durante todo o ano, o que é feito com culturas de cobertura do solo. Dentre as espécies utilizadas como culturas de cobertura no inverno no RS, destacam-se as misturas de aveia preta+azevém e aveia preta+ervilhaca. Dessas culturas, a aveia preta e o azevém apresentam potencial para serem pastejadas durante boa parte do seu ciclo. Este fato torna possível a integração das atividades agrícola e pecuária na mesma área dentro da propriedade rural. O manejo dessas áreas de forma integrada com a pecuária, seja para produção de carne ou de leite, pode causar forte impacto sobre os índices agropecuários do RS (Cassol, 2003). Isto, por se tornar uma fonte adicional de renda para o produtor, a qual, somada à receita da cultura de verão, pode elevar a renda anual da propriedade, diminuir a dependência do produtor da cultura de verão e auxiliar na manutenção da estabilidade do sistema de produção, colaborando para diminuir os riscos do agronegócio.

A falta de conhecimento por parte dos produtores e a pouca difusão do conhecimento gerado, sobre a temática da integração lavoura-pecuária, dentro das instituições de ensino e de pesquisa, faz com que muitos produtores se mostrem relutantes quanto à utilização de sistemas integrados de produção. A principal justificativa para essa relutância é receio de que a presença de animais, nas áreas de lavoura de verão, possa causar compactação do solo, o que viria a prejudicar a produtividade da cultura sucessora ao pastejo. Isto, de fato, pode ocorrer em determinadas situações, principalmente quando a carga animal é manejada inadequadamente.

O pisoteio intenso de animais em solos úmidos ocasiona severa redução na macroporosidade, aumento da densidade do solo e redução da infiltração de água nas camadas mais superficiais do solo (Tanner & Mamaril, 1959; Taylor & Brar, 1991; Trein et al., 1991; Bertol et al., 1998; Bertol et al., 2000; Lanza Nova et al., 2007), sendo essas alterações mais acentuadas em solos argilosos do que em solos arenosos (Tanner & Mamaril, 1959). A presença de camada superficial compactada pode reduzir a emergência de plantas, além de contribuir para o aumento do escoamento superficial em áreas sob SPD, sendo também função do manejo adotado durante o período em que os animais permanecem na área (Trein et al., 1991). A utilização de sistemas de manejo do solo que envolvam pastejo animal podem acarretar também em mudanças nos atributos químicos e biológicos do solo, o que pode afetar o desenvolvimento radicular (Taylor & Brar, 1991; Silva et al., 2000) e a produção das culturas implantadas na seqüência do pastejo (Silva et al., 2000; Albuquerque et al., 2001; Salton et al., 2002). A magnitude dessas alterações, principalmente nos atributos físicos do solo pode variar, além da textura e da umidade do solo, com o teor de matéria orgânica e o teor de umidade do solo (Tanner & Mamaril, 1959; Larson et al., 1980; Trein et al., 1991; Correa & Reichardt, 1995; Smith et al., 1997), a biomassa vegetal sobre o solo (Silva et al., 2000; Silva et al., 2003), a espécie de planta, a intensidade e tempo de pastejo e a espécie e categoria animal (Correa & Reichardt, 1995; Salton et al., 2002).

Os efeitos do pisoteio animal sobre atributos físicos do solo parecem ser potencializados pela ocorrência de períodos de déficit hídrico, pois têm ocorrido diferenças no rendimento de culturas estabelecidas no verão entre as

áreas não pastejadas e/ou com baixa pressão de pastejo em relação às áreas pastejadas e/ou com elevadas pressões de pastejo, quando da ocorrência de tal fenômeno (Silva et al., 2000; Albuquerque et al., 2001),

Apesar de terem ocorrido algumas elucidações, ainda existem diversos questionamentos na temática da integração lavoura-pecuária em áreas sob SPD, especialmente sobre o nível de compactação do solo que pode influir, de forma prejudicial, no rendimento das culturas estabelecidas após o pastejo e quais são os limites de atributos físicos que podem impedir a planta de manifestar o seu máximo potencial produtivo (Secco, 2003). Como o nível de compactação do solo, causado pelo pisoteio de bovinos depende, entre outras coisas, da intensidade e tempo de pastejo e da categoria animal (Correa & Reichardt, 1995; Salton et al., 2002), espera-se observar maiores valores de densidade e de microporosidade e menores valores de macroporosidade e de porosidade total do solo em áreas com maiores pressões de pastejo. Essas alterações devem resultar em menor estabelecimento inicial e menor rendimento de grãos da soja, semeada em sucessão à pastagem, principalmente nas áreas com maior carga animal. No intuito de verificar essas hipóteses, foi conduzido este trabalho para: 1) determinar as alterações ocorridas na densidade e na porosidade do solo, promovidas pelo pisoteio animal, devido ao manejo da pastagem de inverno em diferentes alturas; e 2) verificar se as alterações nos atributos físicos, promovidas pelo pisoteio, afetam o estabelecimento e o rendimento de grãos da cultura da soja estabelecida na seqüência do pastejo.

3.2 Material e Métodos

A área experimental, pertencente à Fazenda do Espinilho, localizada no município de São Miguel das Missões (RS), vinha sendo cultivada há 10 anos sob SPD, antes do início do experimento, com aveia preta (*Avena strigosa*), como planta de cobertura no inverno, e soja (*Glycine max*) no verão. Essa área foi utilizada com pastejo animal pela primeira vez em julho de 2000, quando os bovinos permaneceram na mesma apenas por três semanas, para permitir o rebrote e produção de sementes de aveia. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico (EMBRAPA, 1999), com textura argilosa

(0,54 kg kg⁻¹ de argila, 0,17 kg kg⁻¹ de silte, 0,29 kg kg⁻¹ de areia, na camada de 0,0-20,0 cm).

Em maio de 2001, a área experimental, de aproximadamente 21 hectares, foi dividida em três blocos de quatro parcelas (piquetes) cada, cujas áreas variaram de 1,0 a 2,5 ha, aproximadamente, distribuídas num delineamento experimental de blocos ao acaso (Anexo 1). Os tratamentos consistiram do manejo de uma mistura forrageira de inverno, composta de aveia preta + azevém, em quatro alturas de pastejo: 10, 20, 30 e 40 cm. As alturas da pastagem eram controladas pelo manejo da carga animal (bovinos de corte) nas parcelas. Entre os blocos, duas faixas de 10 m de largura foram isoladas do pastejo, as quais se constituíram no tratamento testemunha. Após o período de pastejo, desenvolvido no outono-primavera, foi implantada a soja em semeadura direta, que foi colhida no outono de 2002. Esse ciclo, pastejo-soja, foi repetido anualmente até 2006.

O ciclo de pastejo iniciava-se com a implantação da aveia forrageira (100 kg ha⁻¹) via semeadura direta, uma vez que, na maioria dos anos, o azevém se estabeleceu por ressemeadura natural. Essa etapa ocorre em geral na primeira metade do mês de maio. Na maior parte dos anos a pastagem recebeu adubação fosfatada de base, na forma de superfosfato simples, em doses variando de 300 a 400 kg ha⁻¹, com base em análises de solo. Em torno de 45 dias após a semeadura da pastagem era realizada uma adubação nitrogenada de cobertura, com dose variando de 45 a 90 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia, conforme os objetivos dos trabalhos desenvolvidos durante o inverno na pastagem. Os animais entravam na área experimental quando o pasto atingia um acúmulo médio de 1500 kg de MS ha⁻¹. Em geral, foram utilizados bovinos jovens, com idade ao redor de 12 meses, sem padrão racial definido, que entravam na área de pastagem na primeira quinzena de julho, com peso ao redor de 200 kg. O método de pastejo adotado foi o pastejo contínuo com carga variável, onde a altura do pasto era controlada pelo número de animais nas parcelas. Os animais permaneciam em pastejo na área experimental até a primeira metade do mês de novembro, perfazendo um período de pastejo de em torno de 115-120 dias, quando a massa de forragem era dessecada (Tabela 1) e procedia-se a implantação da cultura da soja.

TABELA 1. Dados médios de carga animal e de resíduo vegetal remanescente sobre o solo após pastejo em área sob plantio direto e integração lavoura pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno (2001 a 2006).

Altura de manejo	Carga animal	Resíduo remanescente
	----- Mg ha ⁻¹ -----	
10 cm	1,32	1,37
20 cm	0,95	2,62
30 cm	0,56	3,96
40 cm	0,33	4,38
Sem pastejo	-	6,16

A cultura da soja (cultivar Iguçu) era semeada via semeadura direta, num espaçamento entre linhas de 45 cm, com adubação de base de 300 kg ha⁻¹ dos fertilizantes superfosfato simples, 0-20-30, 5-20-20, 0-20-30 e 0-20-30 nas safras 2001/02, 2002/03, 2003/04, 2004/05 e 2005/06, respectivamente, e as sementes foram inoculadas com inoculante específico. Utilizou-se, para a essa operação, uma semeadora-adubadora PSM HY-TECH 8000 SFIL, com 2,8 Mg de peso, oito linhas de semeadura, disco liso de corte da palha, sulcador de adubo tipo facão e sulcador de sementes tipo discos duplos desencontrados.

Em torno de 30 dias após a emergência (DAE) da soja, era realizada uma avaliação da população de plantas, contando-se o número de plantas contidas em um metro de linha, sendo repetido esse procedimento em 10 pontos em cada parcela. De modo geral, o ciclo da soja se estendia até o início do mês de maio, quando então eram coletadas as plantas contidas em um metro linear, em 10 pontos por parcela, para determinação do rendimento de grãos. Após a coleta, as plantas eram levadas para laboratório, onde eram destacadas as vagens, que posteriormente passavam por debulha manual, sendo os grãos postos em estufa a 50°C, por um período mínimo de 48 horas. Na seqüência, determinava-se o teor de umidade e a massa de grãos, ajustando-se o rendimento final para a umidade de 0,13 kg kg⁻¹.

As amostragens de solo para avaliação dos atributos físicos foram feitas ao final de cada ciclo de pastejo e ao final do cultivo da soja, as quais corresponderam, respectivamente, aos meses de maio e novembro. No

presente estudo, foram utilizados os dados das amostragens realizadas desde o início do experimento (Novembro de 2001) até a realizada no final do quinto ciclo de pastejo (Novembro de 2005), perfazendo um total de nove épocas de amostragem, ao longo de quatro e meio anos de avaliação.

Para avaliação de atributos físicos do solo, foram coletadas amostras de solo indeformadas, em anéis metálicos, com dimensões médias de 2,4 cm de altura e 6,3 cm de diâmetro, nas profundidades de 0 a 2,5 e 2,5 a 5 cm. Na camada de 5 a 10 cm, foram utilizados anéis com dimensões médias de 4,9 cm de altura e 8,4 cm de diâmetro. A retirada dos anéis era feita no mesmo momento para todas as avaliações, em trincheiras de aproximadamente 20 x 50 x 30 cm, sendo amostrados três pontos por parcela.

As amostras destinadas à determinação da macro e da microporosidade foram postas em funis de Buckingham e submetidas a uma tensão de 60 cm de coluna de água. Os valores de macroporosidade e microporosidade foram obtidos pelo uso do modelo capilar para o cálculo na tensão de 60 cm de coluna da água (Bouma, 1973). A porosidade total foi obtida pela soma da macro e da microporosidade. Já a densidade do solo, foi obtida pela razão entre a massa de solo seca contida no anel metálico e o volume do mesmo.

Os resultados das avaliações realizadas foram submetidos à análise da variância, empregando-se o Teste da Diferença Mínima Significativa (DMS) com $P < 0,05$ para a separação das médias, utilizando-se do seguinte modelo estatístico para a análise da variância:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + A_j + \text{erro } a(i,j) + P_k + \text{erro } b(i,k) + AP_{jk} + \text{erro } c(i,j,k)$$

Onde: B = blocos (i = 1,2,3); A = alturas de manejo do pasto) (j = 1,2,3,4,5); C = camadas amostradas (k = 1,2,3).

Na análise de variância entre as épocas de amostragem, utilizou-se o mesmo modelo estatístico, alterando-se o fator "A", do modelo, denominado alturas de manejo do pasto, para épocas de amostragem (j = 1,2, 3..., 9), uma vez que essa análise foi feita comparando as médias dentro de cada pressão de pastejo.

3.3 Resultados e Discussão

De uma forma geral, pode-se verificar (Tabelas 2 a 6) que, com exceção da amostragem realizada após o segundo ciclo de pastejo (Novembro/2002) (Tabela 3), não houve interação entre os fatores altura de manejo do pasto e profundidade do solo, havendo, na maioria dos casos, apenas efeito isolado do fator profundidade (camadas) com relação às variáveis analisadas (Tabela 7). Isto indica que houve pouco efeito do pisoteio animal sobre os atributos físicos do solo avaliados. Em alguns casos, como após o primeiro (Tabela 2), o quarto (Tabela 5) e o quinto (Tabela 6) ciclos de pastejo, os valores numéricos de densidade são maiores e os de macroporosidade menores, na camada de 0-2,5 cm, em relação aos demais tratamentos, quando o pasto foi manejado na altura de 10 cm, indicando que a utilização da área nessas condições de manejo pode eventualmente acarretar alterações nesses atributos do solo, atingindo níveis prejudiciais, de forma isolada ou conjugada com outros fatores, às culturas em sucessão ao pastejo. Essa tendência pode ser melhor observada quando médias de todas as amostragens após pastejo e após soja são comparadas (Figuras 1 a 4), onde se observa interação entre os fatores época de amostragem e profundidade para os atributos densidade, macroporosidade e microporosidade do solo para o tratamento de maior pressão de pastejo (10 cm).

Os baixos valores de macroporosidade observados após o quarto cultivo de soja (Maio/05), principalmente nas camadas de 2,5-5,0 e 5,0-10,0 cm parecem estar subestimados (Tabela 5). Isso pode ter ocorrido pelo fato de que, para avaliação da porosidade do solo nessa época de amostragem, foi utilizada uma mesa de tensão ao invés dos funis de Buckingham. Apesar de, na mesa de tensão, as amostras terem sido submetidas à mesma sucção (60 cm de coluna de água) utilizada nos funis, os resultados demonstram que a mesa de tensão foi menos eficaz na retirada da água contida nos macroporos do solo, havendo pouca perda de água pela amostra.

Quando se avalia o comportamento dos atributos físicos em relação à profundidade, nota-se que, na grande maioria dos casos, há um aumento dos valores de densidade e diminuição dos valores dos demais atributos (Tabelas 2 a 6). O mesmo ocorre, como esperado, quando a comparação é feita com os

valores médios de ambas as épocas de amostragem (Figuras 1 a 4). Nessas figuras, pode-se observar ainda, que o efeito do pisoteio animal se restringe basicamente à camada de 0-2,5 cm, já que nas demais profundidades os valores tendem a ser bastante semelhantes após pastejo e após soja. Os efeitos do pisoteio animal, aumentando os valores de densidade e diminuindo os valores de macroporosidade do solo na camada superficial, ocorrem de forma mais pronunciada no tratamento 10 cm, onde se tem uma maior lotação de animais por área. Esses resultados concordam com relatos da literatura (Taylor & Brar, 1991; Trein et al., 1991; Bertol et al., 1998; Bertol et al., 2000; Lanzasova et al., 2007).

TABELA 2. Atributos físicos do solo após o primeiro ciclo de pastejo (Novembro/01) e após o primeiro cultivo de soja (Maio/02), em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno.

Altura de manejo ----- cm -- ---	Pós pastejo (PP)			Média	Pós soja (PS)			Média
	..... Camada, cm.....				..... Camada, cm.....			
	0,0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0		0,0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0	
	Densidade, Mg m ⁻³							
10	1,38	1,39	1,36	1,38ns ²	1,15	1,30	1,33	1,26ns
20	1,29	1,39	1,38	1,35ns	1,16	1,26	1,32	1,25ns
30	1,24	1,38	1,36	1,33ns	1,12	1,29	1,34	1,25ns
40	1,25	1,40	1,34	1,33ns	1,11	1,30	1,37	1,26ns
Média	1,29b ¹	1,39a	1,36a		1,13c	1,29b	1,34a	
	Macroporosidade, m ³ m ⁻³							
10	0,08	0,09	0,09	0,09ns	0,20	0,12	0,11	0,14ns
20	0,10	0,09	0,08	0,09ns	0,19	0,13	0,11	0,14ns
30	0,13	0,10	0,10	0,11ns	0,22	0,12	0,10	0,14ns
40	0,12	0,09	0,09	0,10ns	0,20	0,13	0,09	0,14ns
Média ¹	0,11ns	0,09ns	0,09ns		0,20a	0,13b	0,10c	
	Microporosidade, m ³ m ⁻³							
10	0,45	0,42	0,39	0,42ns	0,37	0,39	0,37	0,38ns
20	0,44	0,42	0,41	0,42ns	0,38	0,37	0,38	0,38ns
30	0,43	0,42	0,40	0,42ns	0,38	0,39	0,40	0,39ns
40	0,46	0,43	0,39	0,43ns	0,36	0,38	0,37	0,37ns
Média ¹	0,44a	0,42b	0,40c		0,37ns	0,39ns	0,38ns	
	Porosidade Total, m ³ m ⁻³							
10	0,53	0,52	0,48ns	0,51	0,57	0,51	0,48	0,52ns
20	0,53	0,51	0,50ns	0,51	0,57	0,50	0,50	0,52ns
30	0,56	0,52	0,50ns	0,53	0,60	0,51	0,49	0,53ns
40	0,57	0,52	0,49ns	0,53	0,57	0,52	0,46	0,52ns
Média ¹	0,55a	0,52b	0,49c		0,57a	0,51b	0,48c	

¹ Letras minúsculas comparam médias entre as profundidades dentro da mesma época. Teste DMS (P<0,05).

² Diferenças entre médias não significativa (Teste DMS P<0,05).

TABELA 3. Atributos físicos do solo após o segundo ciclo de pastejo (Novembro/02) e após o segundo cultivo de soja (Maio/03), em área sob plantio e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno.

Altura de manejo	Pós pastejo (PP)				Pós soja (PS)			
	..... Camada, cm.....			Média	..... Camada,cm.....			Média
	0,0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0		0,0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0	
---- cm ----	----- Densidade, Mg m ⁻³ -----							
10	1,34	1,37	1,39	1,36ns ²	1,29	1,38	1,40	1,36A ³
20	1,36	1,34	1,39	1,36ns	1,29	1,40	1,38	1,36A
30	1,32	1,38	1,42	1,37ns	1,26	1,36	1,38	1,34A
40	1,27	1,36	1,40	1,35ns	1,19	1,43	1,40	1,34A
Sem pastejo	1,20	1,31	1,41	1,31ns	1,08	1,22	1,35	1,22B
Média	1,30c ¹	1,35b	1,40a		1,22b	1,36a	1,38a	
	----- Macroporosidade, m ³ m ⁻³ -----							
10	0,10b ⁴	0,10a	0,08a	0,09	0,12	0,09	0,06	0,09B
20	0,11b	0,12a	0,08a	0,10	0,12	0,07	0,06	0,08B
30	0,10b	0,09a	0,07a	0,09	0,11	0,11	0,06	0,09B
40	0,12b	0,10a	0,07a	0,09	0,15	0,08	0,05	0,10B
Sem pastejo	0,18a	0,10a	0,04b	0,11	0,22	0,14	0,09	0,15A
Média ¹	0,12	0,10	0,07		0,15a	0,10b	0,07c	
	----- Microporosidade, m ³ m ⁻³ -----							
10	0,44a	0,41ab	0,39b	0,41	0,42	0,43	0,41	0,42ns
20	0,43a	0,40b	0,39b	0,41	0,43	0,45	0,42	0,43ns
30	0,43a	0,42a	0,41a	0,42	0,45	0,43	0,44	0,44ns
40	0,42a	0,42ab	0,42a	0,42	0,43	0,45	0,43	0,44ns
Sem pastejo	0,39b	0,41ab	0,41a	0,40	0,39	0,42	0,43	0,41ns
Média ¹	0,42	0,41	0,40		0,43ns	0,43ns	0,43ns	
	----- Porosidade Total, m ³ m ⁻³ -----							
10	0,54b	0,52a	0,47ab	0,51	0,55	0,52	0,47	0,51B
20	0,54b	0,52a	0,47ab	0,51	0,55	0,51	0,48	0,52B
30	0,53b	0,52a	0,48a	0,51	0,56	0,53	0,49	0,53B
40	0,54b	0,52a	0,49a	0,52	0,58	0,53	0,48	0,53B
Sem pastejo	0,57a	0,52a	0,45b	0,51	0,61	0,56	0,53	0,56A
Média ¹	0,54	0,52	0,47		0,57a	0,53b	0,49c	

¹ Letras minúsculas comparam médias entre as profundidades dentro de cada época. Teste DMS (P<0,05).

² Diferenças entre médias não significativa (Teste DMS P<0,05).

³ Letras maiúsculas comparam médias entre as alturas de manejo do pasto dentro de cada época. Teste DMS (P<0,05).

⁴ Letras minúsculas em itálico comparam médias entre as alturas de manejo do pasto dentro de cada profundidade e da mesma época. Teste DMS (P<0,05).

O processo de compactação do solo resulta da pressão exercida sobre a sua superfície, indiferentemente da natureza desta pressão. A pressão exercida pelos animais pode atingir valores da ordem de 350 a 400 KPa (Proffitt et al., 1993; Betteridge et al., 1999), sendo que tais valores podem ser duplicados quando o animal se encontra em movimento (Nie et al., 2001). A pressão exercida por máquinas agrícolas, como tratores, por exemplo, pode variar de 30 a 150 KPa (Proffitt et al., 1993). Essa diferença, em termos de pressão exercida sobre o solo, é explicada pela pequena área de contato

TABELA 4. Atributos físicos do solo após o terceiro ciclo de pastejo (Novembro/03) e após o terceiro cultivo de soja (Maio/04), em área sob plantio e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno.

Altura de manejo	Pós pastejo (PP)			Média	Pós soja (PS)			Média
	..... Camada, cm.....				..... Camada,cm.....			
	0,0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0		0,0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0	
----- cm -----	Densidade, Mg m ⁻³							
10	1,37	1,45	1,38	1,40AB ²	1,28	1,43	1,37	1,36ns ³
20	1,37	1,48	1,43	1,43A	1,33	1,45	1,38	1,39ns
30	1,39	1,41	1,41	1,40AB	1,25	1,42	1,35	1,34ns
40	1,26	1,40	1,39	1,35BC	1,25	1,44	1,38	1,36ns
Sem pastejo	1,20	1,36	1,37	1,31C	1,28	1,32	1,32	1,31ns
Média	1,32b ¹	1,42a	1,40a		1,28b	1,41a	1,36a	
	Macroporosidade, m ³ m ⁻³							
10	0,10	0,09	0,08	0,09ns	0,13	0,09	0,09	0,10ns
20	0,14	0,10	0,07	0,10ns	0,16	0,10	0,10	0,12ns
30	0,12	0,10	0,06	0,09ns	0,14	0,09	0,09	0,11ns
40	0,16	0,12	0,08	0,12ns	0,16	0,09	0,08	0,11ns
Sem pastejo	0,14	0,12	0,08	0,11ns	0,13	0,14	0,10	0,12ns
Média ¹	0,13a	0,11b	0,08c		0,14a	0,10b	0,09b	
	Microporosidade, m ³ m ⁻³							
10	0,42	0,43	0,39	0,41ns	0,42	0,43	0,39	0,41ns
20	0,41	0,43	0,41	0,42ns	0,42	0,43	0,40	0,41ns
30	0,43	0,40	0,40	0,41ns	0,41	0,42	0,40	0,41ns
40	0,40	0,39	0,39	0,40ns	0,41	0,42	0,40	0,41ns
Sem pastejo	0,38	0,39	0,40	0,39ns	0,42	0,42	0,43	0,42ns
Média ¹	0,41ns	0,41ns	0,40ns		0,41b	0,43a	0,40b	
	Porosidade Total, m ³ m ⁻³							
10	0,53	0,52	0,48	0,51ns	0,55	0,52	0,48	0,52ns
20	0,55	0,53	0,48	0,52ns	0,58	0,53	0,49	0,53ns
30	0,55	0,51	0,47	0,51ns	0,54	0,51	0,49	0,51ns
40	0,57	0,50	0,47	0,52ns	0,56	0,52	0,48	0,52ns
Sem pastejo	0,52	0,50	0,48	0,50ns	0,55	0,56	0,53	0,55ns
Média ¹	0,54a	0,51b	0,48c		0,56a	0,53b	0,50c	

¹ Letras minúsculas comparam médias entre as profundidades dentro de cada época. Teste DMS (P<0,05).

² Letras maiúsculas comparam médias entre as alturas de manejo do pasto dentro de cada época. Teste DMS (P<0,05).

³ Diferenças entre médias não significativa (Teste DMS P<0,05).

que o animal tem com o solo, que é a área do casco, sobre a qual é concentrado todo o seu peso, gerando, então, elevada pressão sobre a superfície (Willatt & Pullar, 1983). As máquinas agrícolas são bem mais pesadas que os bovinos, porém possuem maior área contato com o solo (pneus), o que resulta na aplicação de menor pressão sobre a sua superfície do que aquela exercida pelos bovinos. Na literatura (Hamza & Anderson, 2005), são encontradas evidências de que a compactação superficial é relacionada à pressão aplicada sobre o solo, enquanto que a compactação em camadas mais profundas está relacionada à carga total aplicada por eixo das máquinas agrícolas. Isso ajuda a entender o fato da compactação causada pelo pisoteio animal se concentrar nas camadas superficiais do solo, em geral

TABELA 5. Atributos físicos do solo após o quarto ciclo de pastejo (Novembro/04) e após o quarto cultivo de soja (Maio/05), em área sob e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno.

Altura de manejo	Pós pastejo (PP)			Média ¹	Pós soja (PS)			Média ¹
	..... Camada, cm.....				..... Camada,cm.....			
	0,0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0		0,0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0	
----- cm -----	-----			Densidade, Mg m ⁻³	-----			
10	1,38	1,45	1,43	1,42ns	1,26	1,44	1,41	1,37A
20	1,26	1,40	1,44	1,37ns	1,13	1,35	1,44	1,31B
30	1,30	1,42	1,44	1,39ns	1,26	1,39	1,39	1,35AB
40	1,22	1,45	1,43	1,36ns	1,21	1,35	1,41	1,32AB
Sem pastejo	1,30	1,32	1,43	1,35ns	1,03	1,24	1,34	1,20C
Média ¹	1,29b	1,41a	1,43a		1,18b	1,35a	1,40a	
	-----			Macroporosidade, m ³ m ⁻³	-----			
10	0,12	0,09	0,10	0,10ns ²	0,11	0,06	0,03	0,07B ³
20	0,15	0,11	0,11	0,13ns	0,18	0,07	0,03	0,09AB
30	0,13	0,09	0,09	0,11ns	0,12	0,08	0,03	0,07AB
40	0,20	0,12	0,12	0,14ns	0,14	0,10	0,02	0,09AB
Sem pastejo	0,17	0,15	0,13	0,15ns	0,20	0,09	0,03	0,11A
Média ¹	0,15a ¹	0,11b	0,11b		0,15a	0,08b	0,03c	
	-----			Microporosidade, m ³ m ⁻³	-----			
10	0,43	0,43	0,42	0,43ns	0,43	0,44	0,46	0,44ns
20	0,42	0,42	0,42	0,42ns	0,42	0,45	0,46	0,45ns
30	0,43	0,43	0,42	0,43ns	0,44	0,43	0,47	0,45ns
40	0,39	0,42	0,41	0,41ns	0,41	0,43	0,47	0,44ns
Sem pastejo	0,39	0,41	0,41	0,41ns	0,39	0,45	0,49	0,45ns
Média ¹	0,41ns	0,42ns	0,42ns		0,42c	0,44b	0,47a	
	-----			Porosidade Total, m ³ m ⁻³	-----			
10	0,55	0,52	0,52	0,53ns	0,54	0,50	0,49	0,51C
20	0,58	0,53	0,53	0,55ns	0,60	0,53	0,49	0,54AB
30	0,56	0,53	0,52	0,54ns	0,56	0,51	0,50	0,52BC
40	0,59	0,54	0,53	0,55ns	0,55	0,53	0,50	0,52BC
Sem pastejo	0,57	0,57	0,54	0,56ns	0,59	0,54	0,52	0,55A
Média ¹	0,57a	0,54b	0,53b		0,57a	0,52b	0,50c	

¹ Letras minúsculas comparam médias entre as profundidades dentro de cada época. Teste DMS (P<0,05).

² Diferenças entre médias não significativa (Teste DMS P<0,05).

³ Letras maiúsculas comparam médias entre as alturas de manejo do pasto dentro de cada época. Teste DMS (P<0,05).

até 5,0 cm de profundidade (Trein et al., 1991; Moraes & Lustosa, 1997; Salton et al., 2002; Lanzanova et al., 2007).

No presente estudo, em alguns casos foi observado efeito (P<0,05) e em outros apenas uma tendência de diminuição dos valores de densidade e aumento dos valores de macroporosidade, na camada de 0,0-,25 cm, quando se comparam os valores desses atributos após o ciclo de pastejo e o cultivo de soja subsequente (Tabelas 2 a 6). O mesmo é observado quando é feita a

TABELA 6. Atributos físicos do solo após o quinto ciclo de pastejo (Novembro/05) em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno.

Altura de manejo	Camada, cm			Média ¹
	0,0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0	
----- cm -----	Densidade, Mg m ⁻³			
10	1,36	1,37	1,38	1,37ns
20	1,24	1,29	1,33	1,29ns
30	1,25	1,40	1,39	1,35ns
40	1,27	1,36	1,38	1,34ns
Sem pastejo	1,19	1,32	1,34	1,28ns
Média ¹	1,26b	1,35a	1,36a	
	Macroporosidade, m ³ m ⁻³			
10	0,09	0,11	0,08	0,09ns
20	0,12	0,14	0,10	0,12ns
30	0,14	0,11	0,09	0,11ns
40	0,13	0,13	0,09	0,12ns
Sem pastejo	0,13	0,12	0,09	0,11ns
Média ¹	0,12a	0,12a	0,09b	
	Microporosidade, m ³ m ⁻³			
10	0,40	0,39	0,37	0,38ns
20	0,39	0,38	0,38	0,38ns
30	0,38	0,38	0,37	0,37ns
40	0,38	0,37	0,37	0,37ns
Sem pastejo	0,37	0,39	0,38	0,38ns
Média ¹	0,38ns	0,38ns	0,37ns	
	Porosidade Total, m ³ m ⁻³			
10	0,49	0,49	0,45	0,48ns
20	0,51	0,52	0,48	0,50ns
30	0,52	0,49	0,45	0,49ns
40	0,52	0,50	0,46	0,49ns
Sem pastejo	0,50	0,50	0,46	0,49ns
Média ¹	0,51a	0,50a	0,46b	

¹ Letras minúsculas comparam médias entre as profundidades dentro de cada época. Teste DMS (P<0,05).

² Diferenças entre médias não significativa (Teste DMS P<0,05).

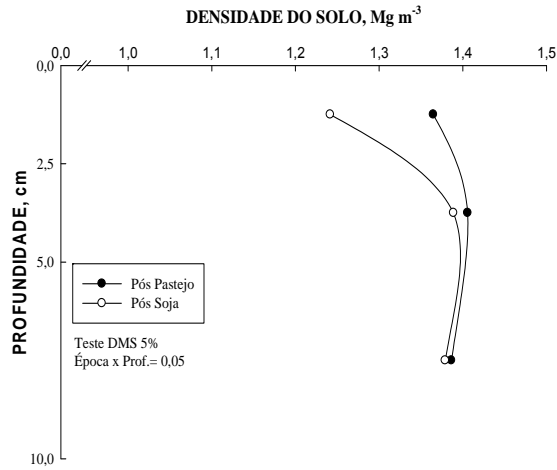
TABELA 7. Resumo da análise variância dos resultados obtidos em amostragens periódicas de solo em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno.

Época de amostragem	Densidade			Macroporosidade			Microporosidade			Porosidade Total		
	Alt. ¹	Cam. ¹	Int. ¹	Alt.	Cam.	Int.	Alt.	Cam.	Int.	Alt.	Cam.	Int.
Nov./01	ns ²	0,041 ³	ns	ns	0,015	ns	ns	0,011	ns	ns	0,014	ns
Mai./02	ns	0,042	ns	ns	0,021	ns	ns	ns	ns	ns	0,021	ns
Nov./02	ns	0,032	ns	-	-	0,026	-	-	0,018	-	-	0,021
Mai./03	0,052	0,041	ns	0,036	0,028	ns	ns	0,020	ns	0,024	0,019	ns
Nov./03	0,057	0,044	ns	ns	0,018	ns	ns	0,011	ns	ns	0,014	ns
Mai./04	ns	0,051	ns	ns	0,020	ns	ns	0,012	ns	ns	0,016	ns
Nov./04	ns	0,061	ns	ns	0,030	ns	ns	ns	ns	ns	0,020	ns
Mai./05	0,058	0,045	ns	0,037	0,029	ns	ns	0,016	ns	0,021	0,016	ns
Nov./05	ns	0,042	ns	ns	0,016	ns	ns	ns	ns	ns	0,012	ns

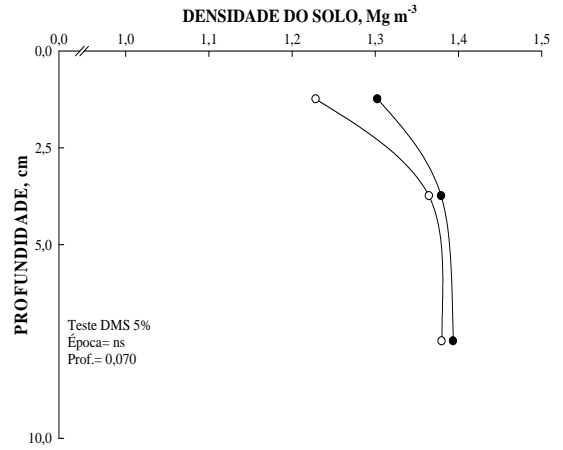
⁽¹⁾ Efeitos isolados dos fatores altura do pasto (Alt.) e camada amostrada (Cam.) e da interação (Int.) dos fatores.

⁽²⁾ Diferenças não significativa entre médias (Teste DMS P<0,05).

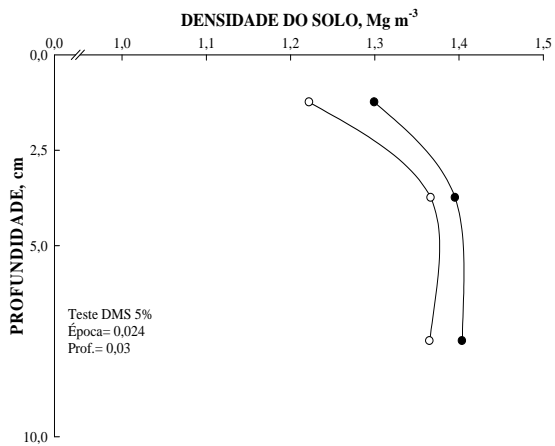
⁽³⁾ Valores da DMS. (Teste DMS P<0,05).



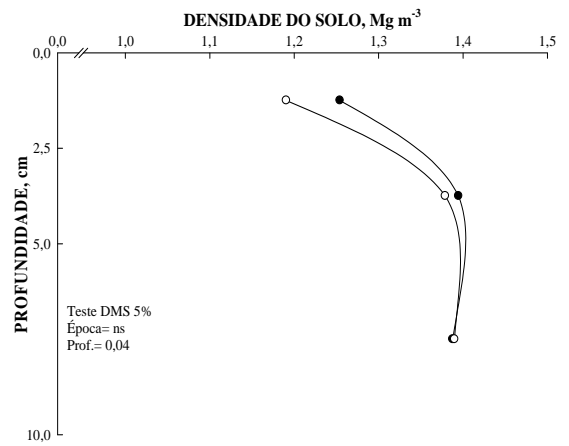
10 cm



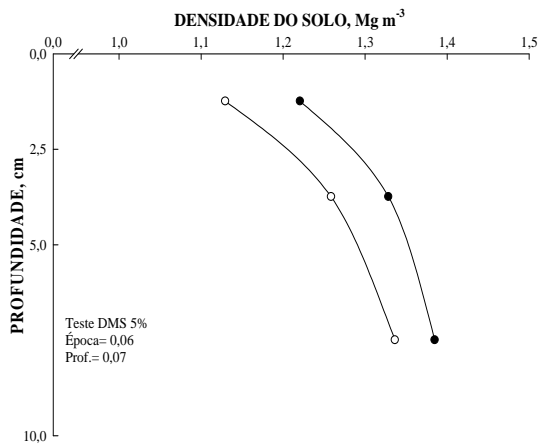
20 cm



30 cm



40 cm



Sem Pastejo

FIGURA 1. Valores médios de densidade após cinco ciclos de pastejo e quatro ciclos de cultivo de soja em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno (ns= não significativo).

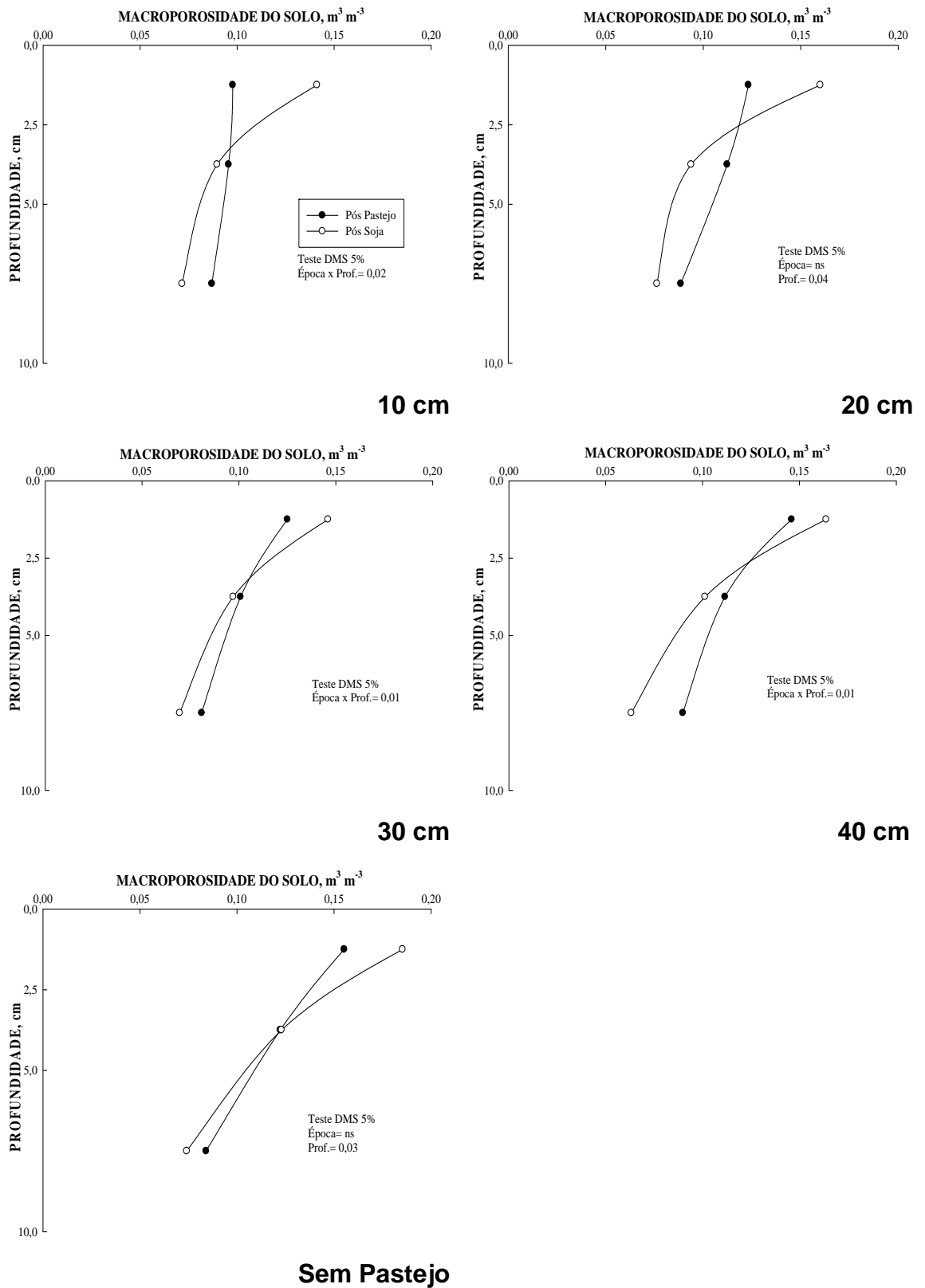


FIGURA 2. Valores médios de macroporosidade após cinco ciclos de pastejo e quatro ciclos de cultivo de soja em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. (ns= não significativo).

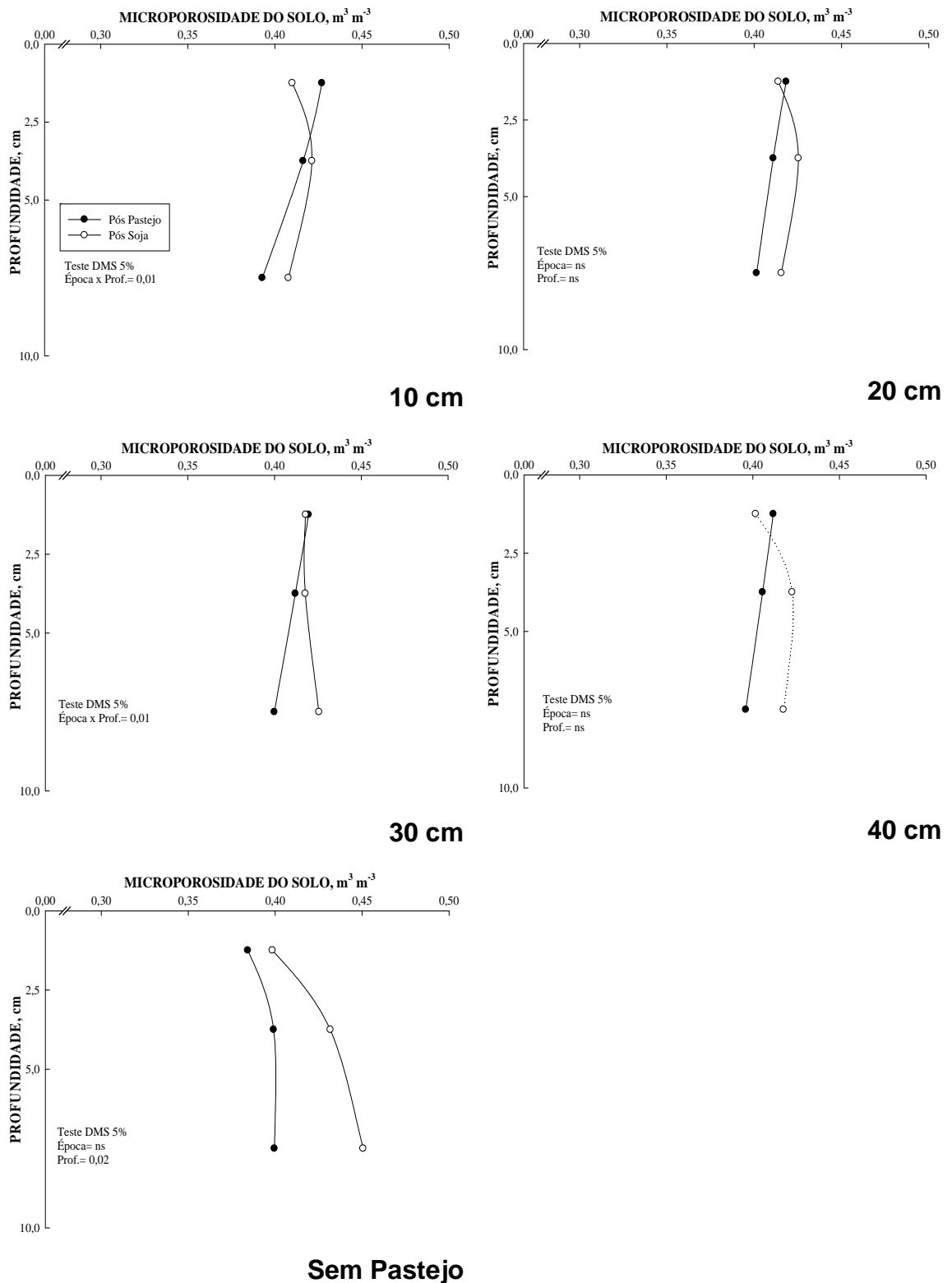
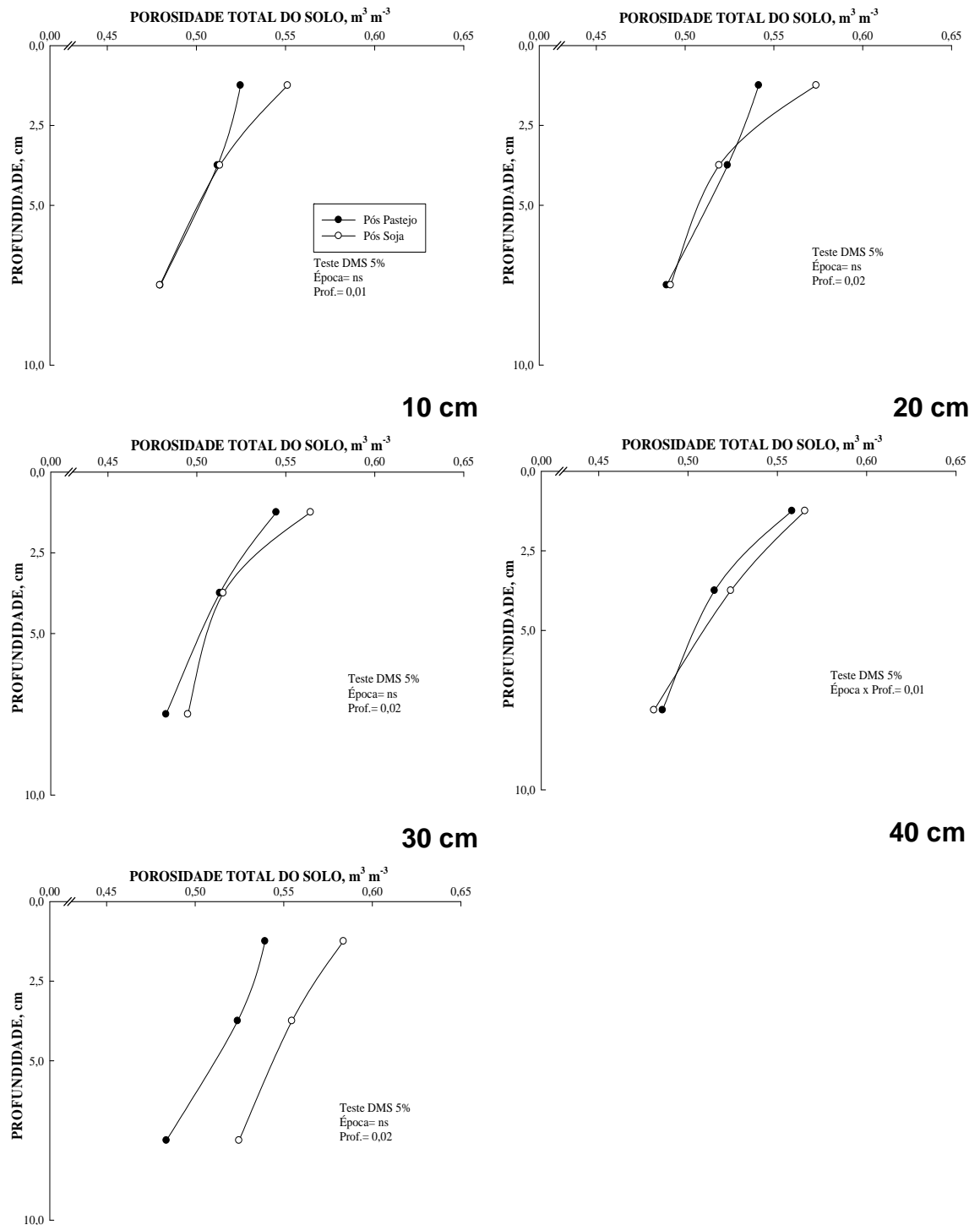


FIGURA 3. Valores médios de microporosidade após cinco ciclos de pastejo e quatro ciclos de cultivo de soja em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. (ns= não significativo).



Sem Pastejo

FIGURA 4. Valores médios de porosidade total após cinco ciclos de pastejo e quatro ciclos de cultivo de soja em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. (ns= não significativo).

comparação dos valores médios obtidos para as épocas de amostragem ao longo da condução do experimento (Figuras 1 e 2). Resultados semelhantes foram observados por Moraes & Lustosa (1997) e Lanzasova et al. (2007), o que levou à afirmações de que a compactação superficial causada pelo pisoteio animal é revertida pela cultura utilizada em seqüência ao pastejo em áreas de integração lavoura-pecuária.

A interpretação desses resultados merece especial atenção, pois conforme salientado por Secco et al. (2004), muitos estudos têm buscado relacionar níveis de compactação, avaliados principalmente pela densidade e porosidade do solo, em áreas sob SPD, com a produção de grãos por culturas de interesse econômico, porém os limites críticos de compactação do solo que afetam o rendimento de grãos dessas culturas ainda não são totalmente conhecidos. Cuidados na interpretação desses resultados, no que se refere à recuperação de áreas compactadas pelo cultivo de soja, são necessários para que não seja difundida a idéia de que a soja é uma boa cultura para tal finalidade, pois se assim fosse, não existiria razão para que produtores, técnicos e pesquisadores se preocuparem com a problemática da compactação do solo em áreas com cultivo de soja sob SPD em diversas regiões do Brasil e do mundo.

No intuito de avaliar os efeitos do pisoteio animal sobre o estabelecimento e o rendimento de grãos de culturas de grãos de interesse econômico, foram avaliados o estande de plantas e a produção de grãos da cultura da soja em diferentes safras (Figuras 5 a 8). Os dados referentes à safra 2003/04 não são apresentados, pois a área foi inadvertidamente colhida pelo operador da automotriz, que fazia a colheita do restante da área da fazenda, antes que pudessem ser feitas as devidas avaliações.

Na safra 2001/02 (Figura 5), apesar de não ter havido efeito das pressões de pastejo nos atributos físicos do solo após o primeiro ciclo de pastejo (Tabela 2), o estande de plantas e o rendimento de grãos da soja foram afetados. Os tratamentos com maiores pressões de pastejo (10 e 20 cm) apresentaram os menores estandes de plantas e os menores rendimentos de grãos, diferindo do tratamento 40 cm e da área sem pastejo (SP). No pastejo a 10 cm, as alterações nos atributos físicos do solo, sobretudo na densidade

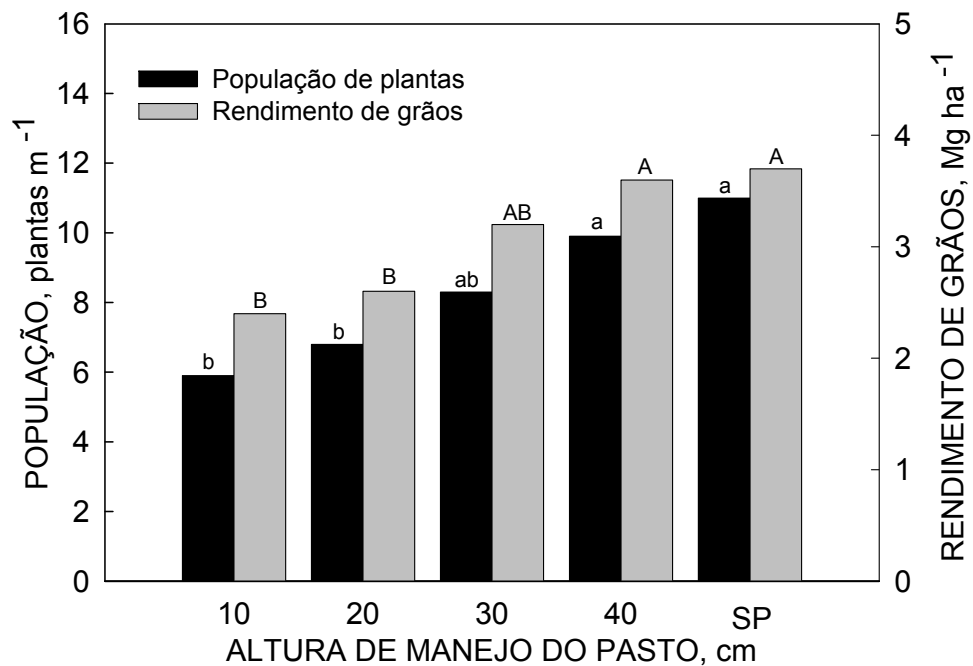


FIGURA 5. Estande de plantas e rendimento de grãos de soja na safra 2001/02 em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. Letras minúsculas e maiúsculas comparam médias entre população e rendimento de grãos, respectivamente. Teste DMS 5%.

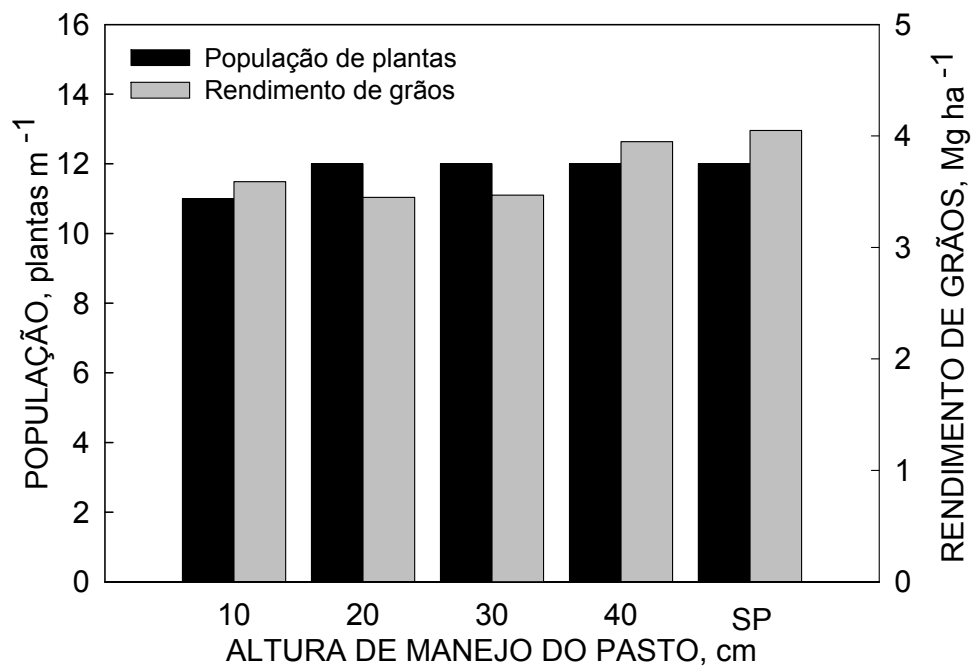


FIGURA 6. Estande de plantas e rendimento de grãos de soja na safra 2002/03 em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. Diferenças entre médias não significativas. Teste DMS 5%.

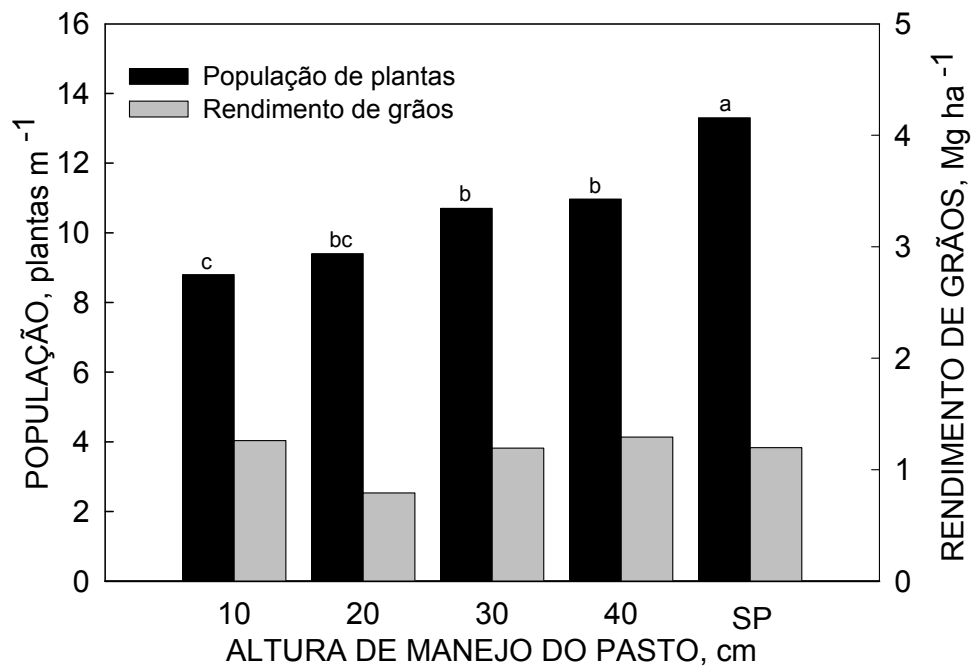


FIGURA 7. Estande de plantas e rendimento de grãos de soja na safra 2004/05 em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. Médias seguidas da mesma letra minúsculas não diferem entre si pelo teste DMS 5%.

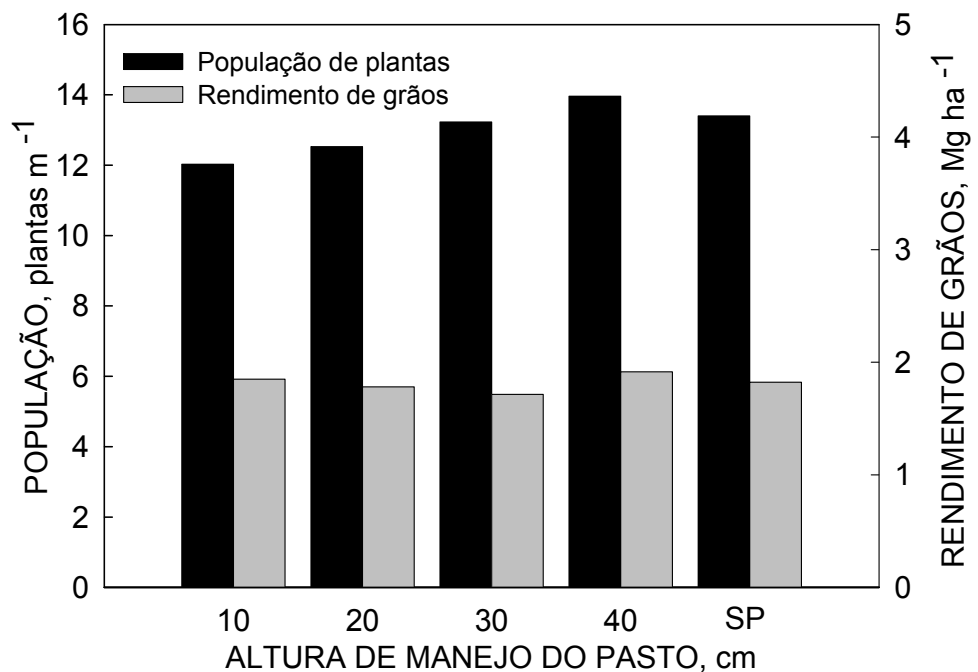


FIGURA 8. Estande de plantas e rendimento de grãos de soja na safra 2005/06 em área sob plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. Diferenças entre médias não significativas.

(Tabela 2), prejudicaram a atuação dos sulcadores em profundidade, fazendo com que esses atuassem até apenas 7 cm, enquanto que nas demais alturas de manejo a profundidade de atuação foi de 13 cm (Cassol, 2003). Essa atuação superficial dos sulcadores deve ter exposto as sementes a condições adversas de temperatura e umidade dificultando a sua germinação na maior pressão de pastejo (Trein et al., 1991) e o estabelecimento de uma população adequada de plantas (Figura 5). Outro fator importante, e talvez até mesmo determinante dessas diferenças, foi a ocorrência de um período de déficit hídrico no momento da semeadura e estabelecimento da soja (Dez./01 a Fev./02) (Tabela 8). Esse período de déficit hídrico pode ter atuado no sentido de potencializar os efeitos do pisoteio animal sobre os atributos físicos do solo e de atrelar o rendimento da cultura da soja à população de plantas. Entretanto, nas safras 2004/05 (Figura 7) e 2005/06 (Figura 8), também ocorreram períodos de restrição hídrica (Tabela 8), diminuindo o estande de plantas (Figura 7) e o rendimento de grãos de soja (Figuras 7 e 8) em relação às duas primeiras safras (Figuras 5 e 6), sem, no entanto ter havido efeito das diferentes pressões de pastejo sobre o rendimento, como observado na primeira safra. Mesmo com a ocorrência de déficit hídrico, nos três primeiros meses após a implantação da soja, na safra 2001/02 e sem ocorrência desse fenômeno na safra 2002/03 (Tabela 8), os rendimentos de grãos ficaram em torno de 3,5 Mg ha⁻¹ nos tratamentos 30 e 40 cm e em torno de 4,0 Mg ha⁻¹ no tratamento SP. Porém, quando se observa o rendimento de grãos das duas últimas safras (Figuras 7 e 8), verifica-se que a ocorrência de estiagem, durante fases críticas do desenvolvimento da cultura da soja (florescimento, formação de vagens e enchimento de grãos, por exemplo), afeta em maior magnitude o rendimento do que as pressões de pastejo durante o inverno.

A suposição de que o rendimento de grãos nesse sistema de integração lavoura-pecuária seria função do estande de plantas parece não se confirmar. Na área sem pastejo (Figura 7) a população é 45% maior em relação à de maior pressão de pastejo (200.000 e 289.000 plantas ha⁻¹, respectivamente), porém o rendimentos de grãos entre ambos os manejos do pasto não diferem ($P > 0,05$). Analisando apenas o estande de plantas nas quatro safras, pode-se verificar que nos anos que ocorreram maiores déficits hídricos logo após a semeadura da soja (safras 2001/02 e 2004/05), houve efeito

($P < 0,05$) das pressões de pastejo sobre o estande de plantas aos 30 DAE (Figuras 5 e 7). Estes resultados vêm a confirmar a hipótese de que a ocorrência de estiagem poderia potencializar os efeitos das alterações nos atributos físicos, causadas pelo pisoteio, afetando o estabelecimento inicial da cultura da soja, principalmente nas áreas com maiores pressões de pastejo.

TABELA 8. Precipitação pluviométrica registrada no período de condução do trabalho na Fazenda do Espinilho, São Miguel das Missões – RS.

Mês	Precipitação pluviométrica (mm)					
	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Janeiro	516	110	212	75	125	150
Fevereiro	102	52	351	84	80	100
Março	225	233	163	20	74	193
Abril	259	252	279	258	344	104
Maiο	85	227	40	81	363	38
Junho	243	193	129	124	370	209
Julho	147	340	191	120	75	
Agosto	98	310	85	41	179	
Setembro	243	293	75	103	222	
Outubro	140	701	363	165	222	
Novembro	121	255	245	190	125	
Dezembro	57	382	447	89	208	

Um fator que merece ser mais bem examinado é o momento ou momentos, ao longo do cultivo da cultura da soja, em que ocorre(m) déficit(s) hídrico(s) e seu grau de severidade. Os dados de precipitação pluviométrica (Tabela 8) coletados na propriedade onde se localiza a área experimental, fornecem informações bastante úteis na interpretação dos rendimentos de grãos. Nas duas últimas safras (Figuras 7 e 8) os rendimentos foram menores do que a metade dos rendimentos das duas primeiras safras (Figuras 5 e 6). Uma provável explicação para os baixos rendimentos nas últimas duas, em comparação com as duas primeiras, são os estádios desenvolvimento da soja em que ocorreram os períodos de restrição hídrica. Assim, se for considerado 15 de dezembro como uma data de semeadura da soja para todos os anos, e valores médios de duração dos estádios reprodutivos de desenvolvimento da soja (POTAFOS, 2007), de R1 e R8, obter-se-á, como período mais crítico para ocorrência de qualquer tipo de estresse para a cultura, em torno do dia 20 de fevereiro até em torno do dia 25 de março, onde a mesma deve se encontrar entre os estádios R4 (plena formação das vagens) e, logo após, R6 (pleno

enchimento das vagens). A ocorrência um déficit hídrico nesse período pode afetar o rendimento em maior magnitude do que se o mesmo ocorresse em qualquer outra fase do desenvolvimento da cultura (POTAFOS, 2007). Tal fato parece estar ocorrendo no presente trabalho: na safra 2004/05, na qual se obteve os menores rendimentos de grãos (Figura 7), o déficit hídrico foi maior, em relação ao volume de chuvas, e foi mais longo que na safra 2005/06 (Tabela 8), resultando em menor rendimento em relação às demais safras. O mesmo fato também ocorre na safra 2005/06 (Figura 8), quando comparada às duas primeiras safras (Figuras 5 e 6). Na primeira safra parece ter havido certa recuperação do rendimento de grãos mesmo após um período de forte estiagem, que pode ter sido devido à ocorrência de chuvas no mês de março, o que permitiu a obtenção de elevados rendimentos, sobretudo nas áreas com menores pressões de pastejo (30 e 40 cm) e na área sem pastejo. Ainda nesta safra, parece que houve conjunção de fatores, entre as alterações nos atributos físicos do solo e a ocorrência de um período de déficit hídrico nas maiores pressões de pastejo (10 e 20 cm), culminando na diminuição do rendimento de grãos. Já, na segunda safra (Figura 6), na qual não foi observada ocorrência de estiagem, desde a semeadura e ao longo do desenvolvimento da cultura, as pressões de pastejo não tiveram efeito algum sobre o estande de plantas e sobre o rendimento de grãos da soja.

3.4 Conclusões

A avaliação dos atributos físicos após cada ciclo de pastejo demonstra que o pisoteio animal não causa compactação do solo em áreas com pasto de aveia+azevém manejado de 10 a 40 cm de altura. Porém, ao longo do tempo, na maior pressão de pastejo ocorre aumento da densidade e diminuição da macroporosidade na camada de 0,0-2,5 cm de profundidade.

As maiores pressões de pastejo (10 e 20 cm) afetam o estabelecimento inicial da cultura da soja em anos de ocorrência de déficit hídrico logo após a semeadura, sem que isso, no entanto, se reflita sobre o rendimento de grãos da cultura da soja, que depende da época de ocorrência, da severidade e da duração do déficit hídrico.

4. CAPÍTULO 3: ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO COM APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO

4.1. Introdução

A manutenção da máxima eficiência econômica e a obtenção de renda durante o ano todo é o ideal almejado pelos produtores agrícolas. No entanto, no Estado do Rio Grande do Sul (RS), o período de inverno vem se constituindo em um obstáculo a ser superado para se atingir esse objetivo, pois os cereais dessa estação, de forma geral, vêm perdendo espaço em razão dos custos de produção e da falta de garantias de comercialização e em função dos riscos de adversidades climáticas que comprometem a produção.

Em razão disso, grande parte dos produtores tem preferido o cultivo de espécies como aveia e azevém, com o único propósito de cobertura do solo, de modo a viabilizar o sistema plantio direto (SPD), tendo a soja como principal cultura de verão, que em muitos casos, é a única fonte de renda do produtor. No RS, em torno de 5,5 e 1,0 milhões de hectares (ha) são ocupados por culturas de grãos de verão e inverno, respectivamente (CONAB, 2008). Da área cultivada no verão, estima-se que 80% seja conduzida sob SPD (Amado et al., 2006). Dessa forma, pode-se verificar que uma área superior a 3,0 milhões de ha, cultivadas sob SPD, permanece ocupada apenas por culturas de cobertura ou em pousio durante o inverno. A utilização dessas áreas de modo integrado com a pecuária, pode acarretar em significativas mudanças nos índices agropecuários da Região Sul do Brasil (Cassol, 2003), além de tornar-se nova fonte de renda para a propriedade rural, a qual, somada ao dividendo gerado no verão, pode elevar a receita anual, diminuindo a dependência dos produtores da cultura de verão e colaborando para a

diminuição dos riscos do agronegócio.

A adoção do SPD, por seu turno, fez com que surgissem questionamentos sobre a forma e a frequência com que o calcário deve ser reaplicado ao solo, uma vez que a sua aplicação é superficial, o que diminuiria a sua eficiência em corrigir a acidez em profundidade, devido a sua baixa solubilidade. Essa questão é ainda polêmica, pois, em alguns casos (Pöttker & Ben, 1998; Rheinheimer et al., 2000b; Rheinheimer et al., 2000a; Amaral & Anghinoni, 2001), o efeito do calcário aplicado superficialmente na correção da acidez se restringe às camadas superficiais (até 10 cm), enquanto em outros (Caires et al., 1998; Petreire & Anghinoni, 2001; Caires et al., 2003; Gatiboni et al., 2003) esses efeitos podem atingir camadas mais profundas, o que comprovaria a eficácia dessa prática em corrigir a acidez do solo e aumentar, ou no mínimo manter, os rendimentos das culturas (Cassol, 2003).

A magnitude desse efeito, em profundidade, depende, entretanto, de características do solo, do clima, do manejo do solo e do sistema de culturas adotado (Amaral, 2002). Vários são os mecanismos determinantes da dinâmica do calcário em SPD, os quais participam de forma variável e que ocorrem de forma simultânea, sendo difícil a quantificação de cada mecanismo de forma isolada.

A presença de animais deve interferir na dinâmica do calcário no solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária (ILP), em relação a áreas puramente de lavouras sob SPD. Essa presença altera alguns dos fatores citados anteriormente (Amaral, 2002), que são determinantes na magnitude do efeito em profundidade do calcário aplicado em superfície. O pisoteio animal, quando em solo úmido, causa redução da macroporosidade e da permeabilidade da água no solo nas camadas mais superficiais (Trein et al., 1991; Bertol et al., 1998; Bertol et al., 2000; LanzaNova et al., 2007), podendo restringir a descida de partículas finas. Por outro lado, a deposição de excrementos de origem animal, principalmente de fezes, promove uma maior atividade da meso e macrofauna do solo, o que gera a formação de um grande número de galerias no interior do solo (bioporos) (Edwards et al., 1988), pelos quais pode se dar o deslocamento de partículas de calcário, favorecendo a correção da acidez do solo em subsuperfície. Durante a decomposição de resíduos vegetais ocorre liberação de ácidos orgânicos de baixo peso

molecular (AOBPM), os quais atuam como ligantes orgânicos, favorecendo o aumento de Ca e Mg e a diminuição do alumínio fitotóxico em profundidade (Miyazawa et al., 1993; Franchini et al., 1999b; Franchini et al., 2000). Espera-se que ocorra fenômeno semelhante quando da degradação dos resíduos animais, principalmente das fezes, podendo favorecer o efeito, em profundidade, do calcário no solo.

Pelo exposto, nota-se que a dinâmica, em profundidade, do calcário em áreas utilizadas apenas com lavouras sob SPD tem se mostrado, às vezes, controversa e é bastante complexa, sofrendo interferência de vários fatores e mecanismos. Dessa forma, acredita-se que a presença de bovinos em pastejo nessas áreas irá aumentar ainda mais complexidade do sistema, e estudos que explorem a temática da calagem em áreas sob SPD e ILP são escassos. Sendo assim, estudos nessa temática são necessários para desenvolver práticas de manejo do solo, da planta e do animal em sistemas integrados de produção, o que pode colaborar no sentido de sua adoção por parte dos produtores.

Tendo em mente essas considerações, desenvolveu-se o presente trabalho para verificar como distintas pressões de pastejo afetam o efeito, em profundidade, do calcário, aplicado em superfície, sobre a acidez num Latossolo Vermelho em plantio direto.

4.2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido na Fazenda do Espinilho, de propriedade da Agropecuária Cerro Coroadó, localizada em São Miguel das Missões (28°56'08" S e 54°20'51" W), região fisiográfica do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico (EMBRAPA, 1999), profundo, bem drenado, com coloração vermelho-escura e textura argilosa (0,54 kg kg⁻¹ de argila, 0,17 kg kg⁻¹ de silte, 0,29 kg kg⁻¹ de areia, na camada de 0,0-20 cm). O relevo é ondulado a suavemente ondulado, com precipitação pluviométrica em torno de 1900 mm por ano, sendo as chuvas bem distribuídas ao longo do ano.

Antes da implantação do experimento, a área se encontrava há 10 anos sob SPD, sendo cultivada com aveia preta (*Avena strigosa*, Schreb) no

inverno e com soja (*Glycine max*) no verão. Em julho de 2000, pela primeira vez, a área foi utilizada com pastejo animal (bovinos), durante três semanas. As características químicas da área experimental anteriormente a instalação do experimento são apresentadas na Tabela 9.

TABELA 9. Atributos químicos em diferentes camadas do Latossolo Vermelho em sistema plantio direto antes da aplicação superficial do calcário (novembro de 2000).

Camada cm	pH- H ₂ O	NC pH 6,0 ⁽¹⁾ Mg ha ⁻¹	COT ⁽²⁾ g kg ⁻¹	Cátions trocáveis ⁽³⁾				Nutrientes disponíveis ⁽⁴⁾		Sat. na troca	
				Ca	Mg	Al	H+Al	P	K	V	m
				----- coml _c dm ⁻³ -----				--- mg dm ⁻³ ---		--- % ---	
0,0-5,0	4,9	8,3	42,2	6,20	1,26	0,30	8,68	13,4	240	48	4
5,0-10,0	4,6	9,1	34,8	4,80	1,78	0,59	9,72	9,8	119	41	9
10,0-15,0	4,6	9,1	25,5	4,10	2,15	0,72	9,72	5,2	88	40	11
15,0-20,0	4,6	9,9	25,5	4,00	1,10	1,01	10,13	3,7	55	34	17

⁽¹⁾ Método SMP; ⁽²⁾ Carbono orgânico total; ⁽³⁾ KCl/1 mol L⁻¹; ⁽⁴⁾ Mehlich 1.

A aplicação dos tratamentos de intensidades de pastejo ocorreu após a colheita da soja (safra 2000/2001), quando foi implantada, em maio de 2001, a pastagem hiberna de aveia preta + azevém (*Lolium multiflorum*). A área experimental, em torno de 21 hectares, foi dividida em 12 parcelas (piquetes), cujas áreas variaram de 1,0 a 2,5 ha. As diferentes alturas de manejo do pasto (pressões de pastejo) foram: 10, 20, 30 e 40 cm, além das áreas sem pastejo, arranjadas em blocos ao acaso, com três repetições. As áreas sem pastejo eram localizadas entre os blocos, e constaram de parcelas de 10x10 m. Após a saída dos animais, foram aplicadas (08/12/2001) em superfície 4,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 62%), correspondendo a 2,8 Mg ha⁻¹ quando ajustado o PRNT para 100% (Cassol, 2003).

A pastagem foi constituída de uma mistura de aveia preta e de azevém, sendo a aveia semeada anualmente (100 kg ha⁻¹) e o azevém se estabeleceu por ressemeadura natural. Na maioria dos anos a pastagem foi adubada na base com superfosfato simples, em doses variando de 300 a 400 kg ha⁻¹, com base em análises de solo. Em torno de 45 dias após a semeadura foi feita uma aplicação de N (45 a 90 kg ha⁻¹, na forma de uréia, em função dos objetivos dos estudos conduzidos durante o inverno). Os animais entravam na área na primeira quinzena de julho, onde permaneciam até a primeira quinzena

de novembro (em torno de 110 dias de pastejo). Após o final de cada ciclo de pastejo, foi feita amostragem de solo para avaliar os atributos químicos relacionados com a acidez antes (Novembro de 2001) e após 12, 24, 36 e 48 meses (Novembro de 2002, 2003, 2004 e 2005, respectivamente) da aplicação de calcário.

A soja foi semeada após cada ciclo de pastejo, via semeadura direta, num espaçamento entre linhas de 0,45 m, com adubação de base de 300 kg ha⁻¹ dos fertilizantes superfosfato simples, 0-20-30, 5-20-20, 0-20-30 e 0-20-30 nas safras 2001/02, 2002/03, 2003/04, 2004/05 e 2005/06, respectivamente, e as sementes foram inoculadas com inoculante específico. Os ciclos de cultivo da soja tiveram duração média de em torno de 140 dias. No estágio de maturação fisiológica da soja foram feitas amostragens de solo, nos meses de maio de 2002, 2003, 2004 e 2005, correspondendo, respectivamente, aos 6, 18, 30 e 42 meses após aplicação superficial de calcário. Em função do volume de resultados gerados, optou-se por não apresentar os resultados obtidos aos 18, 30 e 42 meses após a calagem.

Para a caracterização química do solo após os ciclos de pastejo e da soja, coletou-se oito subamostras dentro de cada parcela, visando à obtenção de uma amostra composta representativa. As camadas amostradas foram de 0,0-2,5; 2,5-5,0; 5,0-7,5; 7,5-10,0; 10,0-12,5; 12,5-15,0; 15,0-17,5; 17,5-20,0 e 20,0-25,0 cm. Nessas amostras, foram determinados o pH-H₂O, os teores de cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e alumínio (Al³⁺) trocáveis (KCl 1M), o teor de potássio (K⁺) disponível (Mehlich-1) e o teor de carbono orgânico total (COT) (Tedesco et al., 1995). Também foi determinado o índice SMP com a finalidade de se obter o valor de H+Al, pela equação $\log (H + Al) = 3,020 - 0,371 \text{ SMP}$ (Kaminski et al., 2002). Com esses dados, calculou-se a capacidade de troca de cátions efetiva (CTCef) e as saturações por bases (V) e por alumínio (m).

Os resultados das avaliações realizadas foram submetidos à análise da variância, empregando-se o Teste da Diferença Mínima Significativa (DMS) com $P < 0,05$ para a separação das médias, utilizando-se o seguinte modelo estatístico para a análise da variância:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + A_j + \text{erro } a(i,j) + P_k + \text{erro } b(i,k) + AP_{jk} + \text{erro } c(i,j,k)$$

Onde: B = blocos (i = 1,2,3); A = alturas de manejo do pasto (j = 1,2,3,4,5); C = camadas amostradas (k = 1,2,3, ...,9).

4.3. Resultados e Discussão

O efeito das diferentes pressões de pastejo, representadas pelas alturas de manejo do pasto, sobre atributos químicos do solo relacionados com a acidez, em profundidade e ao longo do tempo pode ser observado nas Figuras 9 a 13. As condições do solo da área experimental anteriormente à aplicação de calcário em superfície, eram bastante ácidas, conforme indicam o pH-H₂O (Figura 9), a saturação por bases (Figura 12) e a saturação por Al³⁺ (Figura 13). Aos seis meses após a calagem, o efeito do calcário sobre o pH na camada superficial do solo (Figura 9) já pode ser observado, chegando a 7,5, 10 e 12,5 cm aos 12, 24 e 36 meses, respectivamente, mantendo-se nessa camada até os 48 meses após a aplicação do calcário. Cabe salientar que ocorreu um período de déficit hídrico na região, entre os meses de dezembro de 2001 e fevereiro de 2002, que pode ter afetado a reatividade do calcário, restringindo o seu efeito corretivo na acidez do solo aos seis meses após a sua aplicação, já que o seu efeito depende, entre outros fatores, do regime hídrico (Amaral, 2002; Alleoni et al., 2005).

Os valores de pH do tratamento SP-0 em todas épocas de avaliação eram ao redor de 4,5 abaixo de 7,5 cm, enquanto que aos 12 meses após, os valores estavam em torno de 4,0 (Figura 9). Isto indica que houve uma subestimação desses valores nessa amostragem, o que faz com que a diferença entre as médias dos tratamentos sejam maiores, colaborando para a ocorrência de interação entre os fatores avaliados nessa época de amostragem.

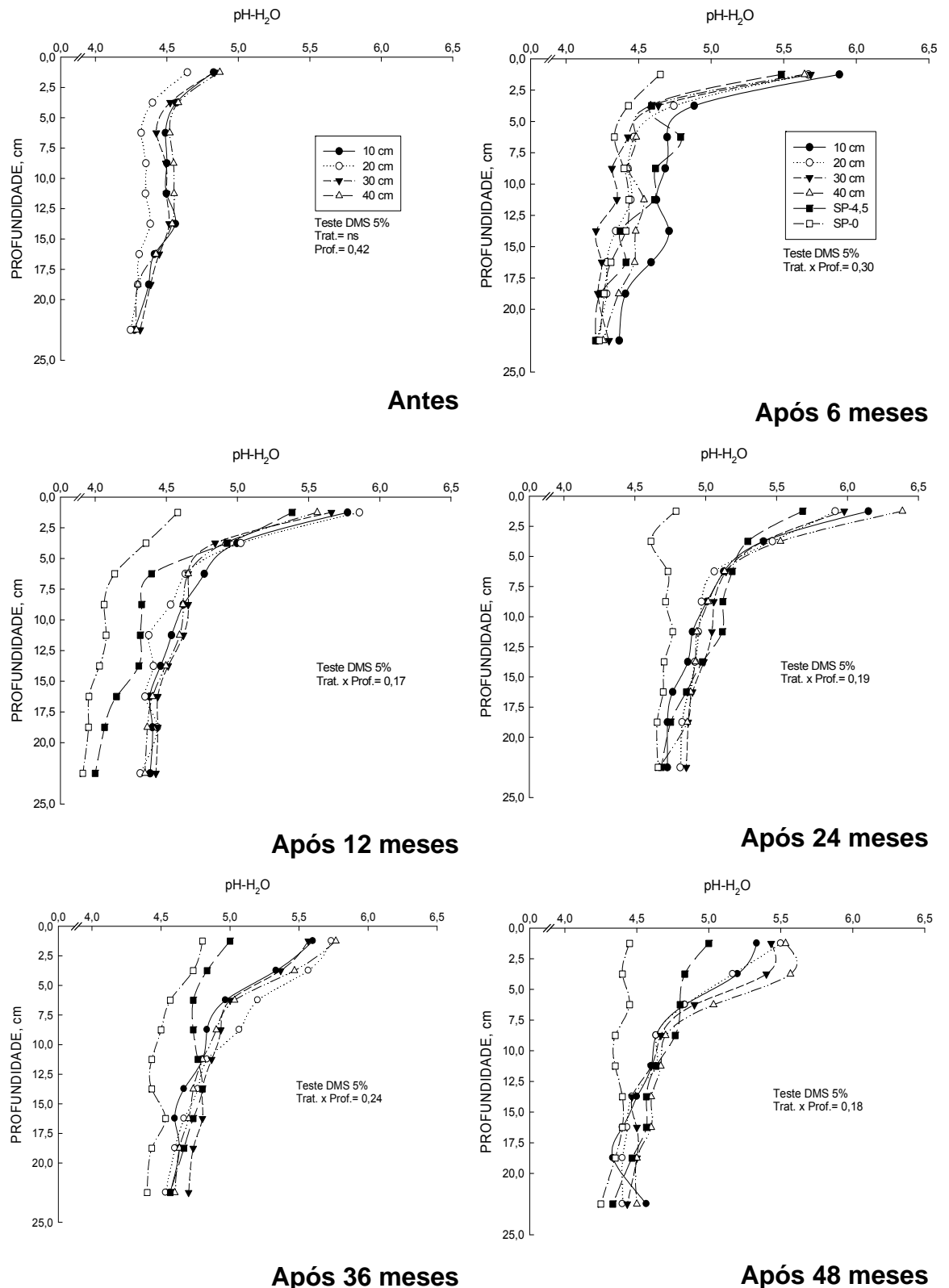


FIGURA 9. Valores de pH em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno.

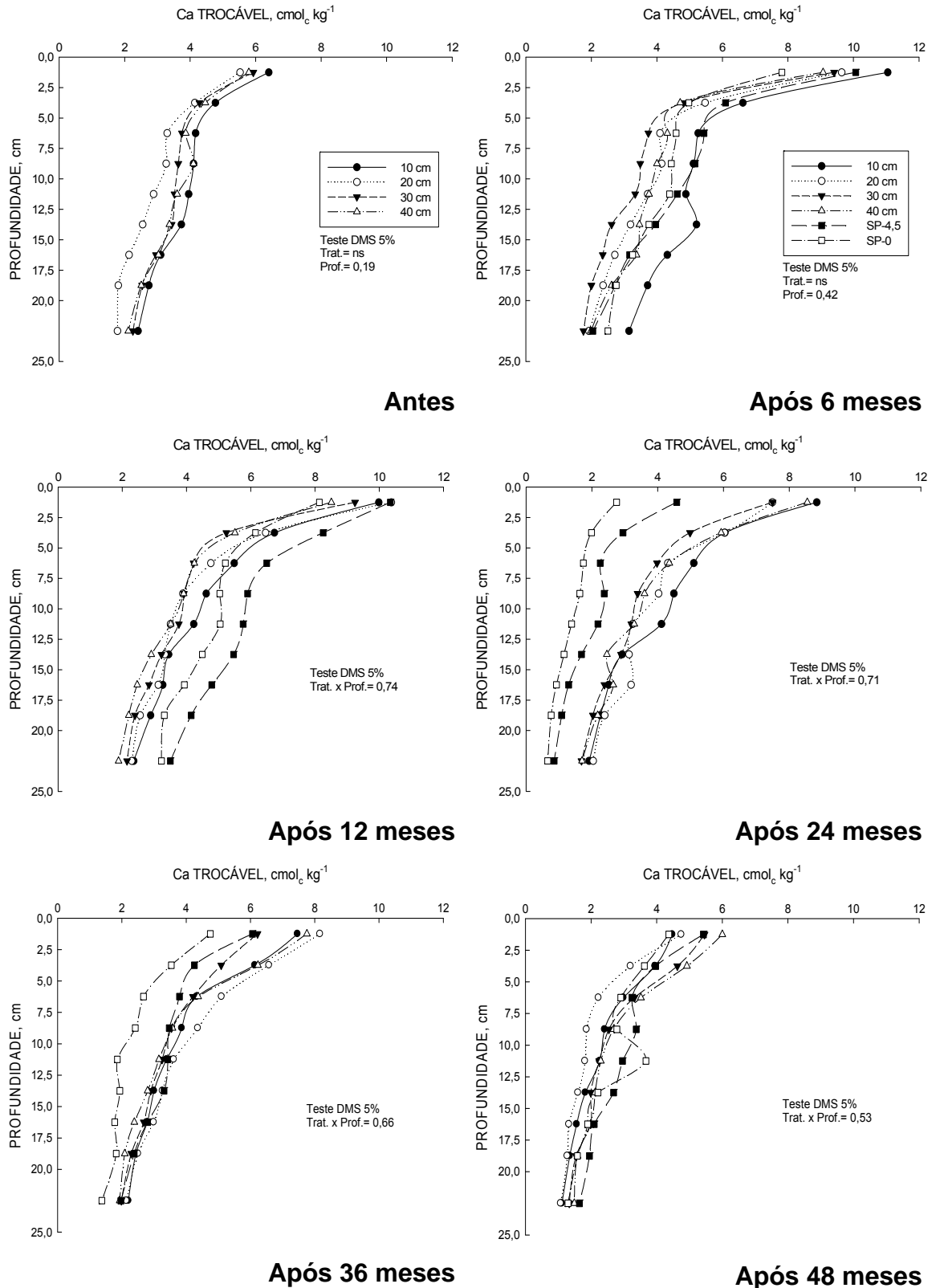


FIGURA 10. Teor de cálcio trocável em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno.

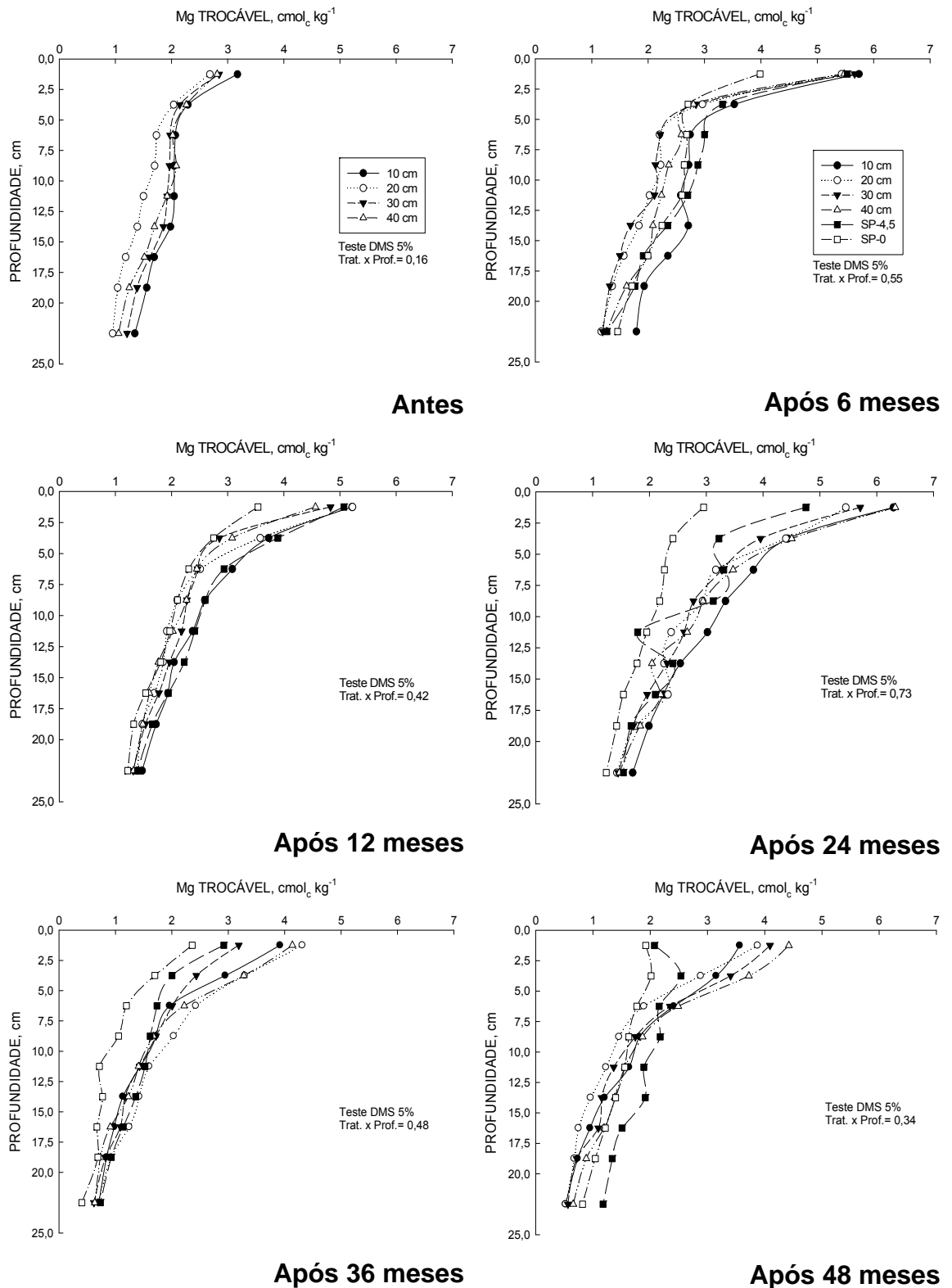


FIGURA 11. Teor de magnésio trocável em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno.

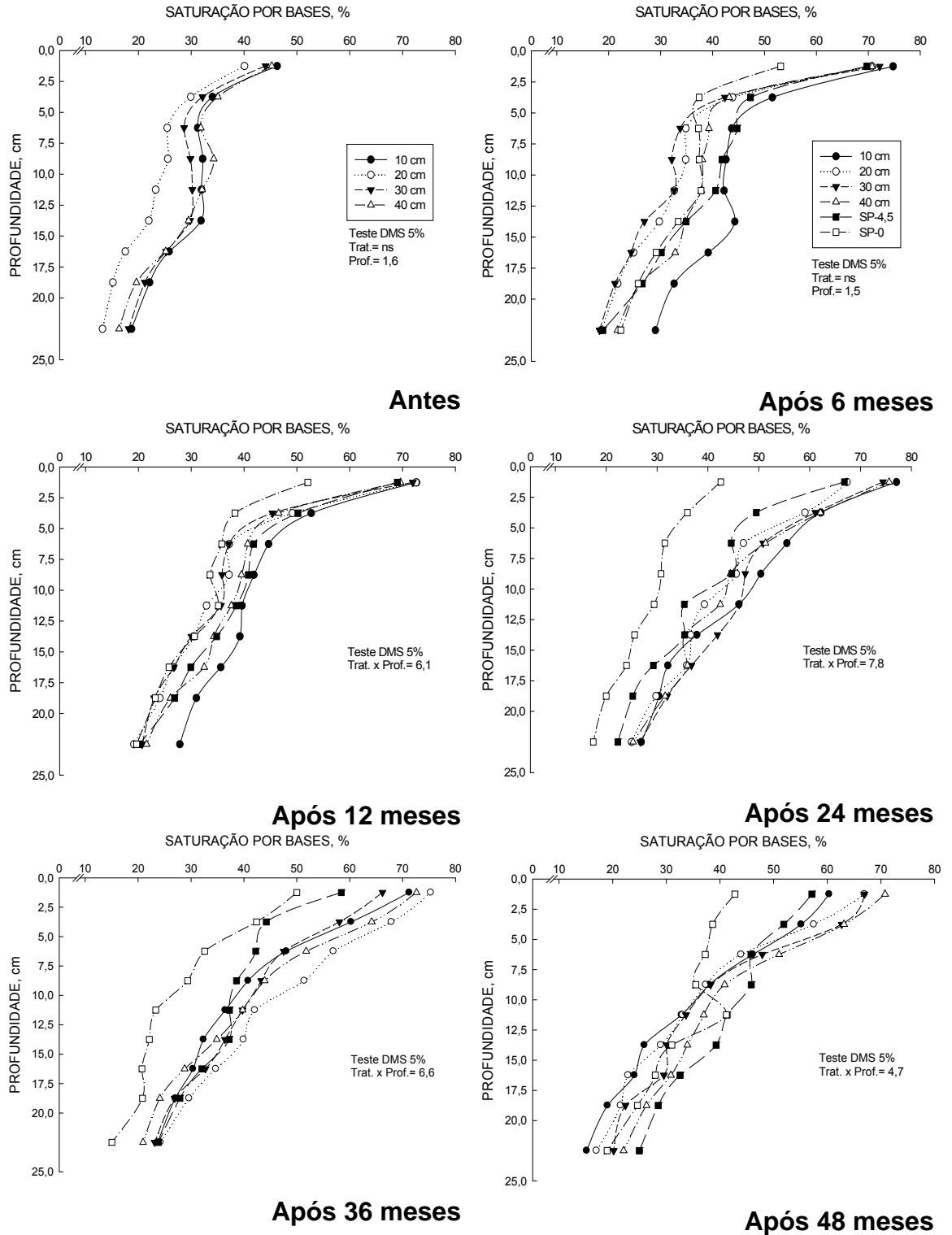


FIGURA 12. Valores de saturação por bases em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno.

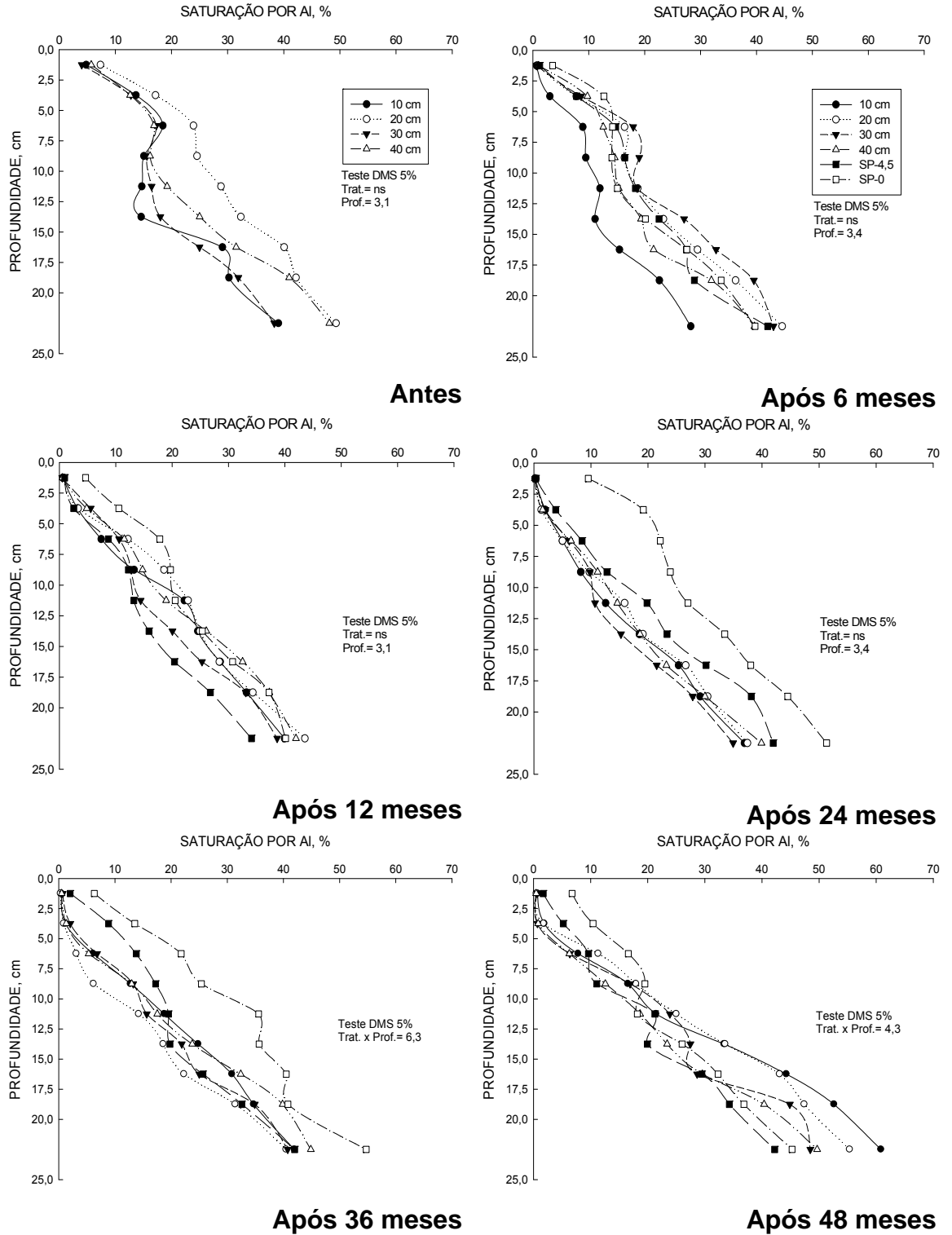


FIGURA 13. Valores de saturação por alumínio em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno.

Para os teores de Ca trocável (Figura 10), houve efeito ($P < 0,05$) da calagem após dois anos da aplicação até a profundidade de 25 cm, que se manteve até os 24 meses. Já, aos 36 e 48 meses, apesar de ainda haver diferença entre as médias, verifica-se que os teores desse atributo são menores, com uma diminuição e uniformização dos seus teores ao longo do perfil do solo. Acredita-se que na amostragem aos 12 meses, houve uma superestimação dos teores de Ca trocável nos tratamentos sem pastejo (SP-4,5 e SP-0), sobretudo no SP-0, pois, nas amostragens subseqüentes, os valores de Ca^{2+} trocável foram numericamente menores. É importante ressaltar que aos 24 meses após a calagem, houve um efeito benéfico da presença dos animais na ação do calcário, pois teores desse nutriente foram maiores ($P < 0,05$) em todas as profundidades, possivelmente pela liberação de AOBPM oriundos da degradação dos resíduos animais, que estariam desempenhando a função de carreadores orgânicos de cálcio em profundidade.

Aos seis meses após a calagem superficial, os teores de Mg^{2+} trocável somente foram maiores ($P < 0,05$) nos tratamentos com calcário em relação à área SP-0 na camada de 0-2,5 cm, fato que se repetiu aos 12 meses (Figura 11). Já, aos 24 meses, alguns tratamentos com pastejo influenciaram positivamente os teores de Mg^{2+} trocável até a profundidade de 10 cm, mantendo-se assim aos 36 meses e retrocedendo aos 7,5 cm de profundidade aos 48 meses após a calagem.

Como o Ca^{2+} trocável responde por grande parte da saturação por bases (Figura 12), esta apresentou comportamento semelhante, ocorrendo diferenças ($P < 0,05$) até os 25 cm de profundidade aos 24 meses após a calagem. Os valores e as diferenças praticamente se mantiveram aos 36 meses, sendo que, aos 48 meses sofreram uma pequena queda, principalmente na camada superficial do solo.

A saturação por Al foi pouco afetada pela calagem, apresentando aos 24 meses uma tendência de efeito do calcário, a qual se confirmou ($P < 0,05$) aos 36 meses após a calagem (Figura 13), quando se observou efeito até 17,5 cm de profundidade. Se for considerado o valor de saturação por Al de 10%, estabelecido pela CQFS RS/SC (2004) para tomada de decisão de reaplicação de calcário, nota-se que o calcário foi eficaz na correção do Al trocável somente até a profundidade de 5 cm aos seis meses após a sua

aplicação na maior pressão de pastejo, estendendo esse efeito até 7,5 cm aos 12 meses e mantendo-se nesse nível nas demais épocas de amostragem. A ocorrência de poucas interações entre os fatores para esse atributo pode ser explicada pela variabilidade dos resultados, com coeficiente de variação atingindo o valor de 28,31%, na amostragem feita 48 meses após a calagem.

O calcário atingiu, então, o seu pico máximo de reação aos 24 meses após a sua aplicação, momento no qual foram observados os maiores valores de pH, Ca^{2+} trocável, Mg^{2+} trocável e saturação por bases (Figuras 9 a 12 respectivamente) e menor de saturação por Al (Figura 13). Aos 36 meses após a calagem, o solo começou a mostrar evidências de que o efeito corretivo do calcário sobre a acidez estava cessando, pela diminuição dos valores de pH (Figura 9) e dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis (Figuras 10 e 11, respectivamente). Isso veio a ser confirmado aos 48 meses, quando se verificou a manifestação mais acentuada do processo de reacidificação do solo.

Os resultados obtidos no presente estudo concordam com vários relatos da literatura (Caires et al., 1998; Petreire & Anghinoni, 2001; Caires et al., 2003; Gatiboni et al., 2003), no sentido que o efeito da calagem superficial no SPD pode ocorrer em profundidade, uma vez que foram observados os seus efeitos até os 25 cm de profundidade, 24 meses após a calagem.

Tendo em vista que, de forma geral, não houve diferenças entre as intensidades de pastejo sobre os atributos de acidez avaliados, são apresentados os seus valores médios e comparados aos respectivos valores sem pastejo e/ou sem calcário (Figura 14). Essa ação positiva ($P < 0,05$) da presença dos animais ocorreu para todos os atributos avaliados, porém com diferente intensidade: no cálcio trocável até 25 cm (Figura 14b), no magnésio trocável até 5,0 cm (Figura 14c) e na saturação por bases até 5,0 cm (Figura 14d).

A verificação da eficiência da calagem em corrigir a acidez do solo, considerando valores preestabelecidos como ideais, é mais adequada do que a comparação estatística entre as médias de tratamentos, pois em algumas circunstâncias pequenas diferenças entre os valores dos atributos podem ser

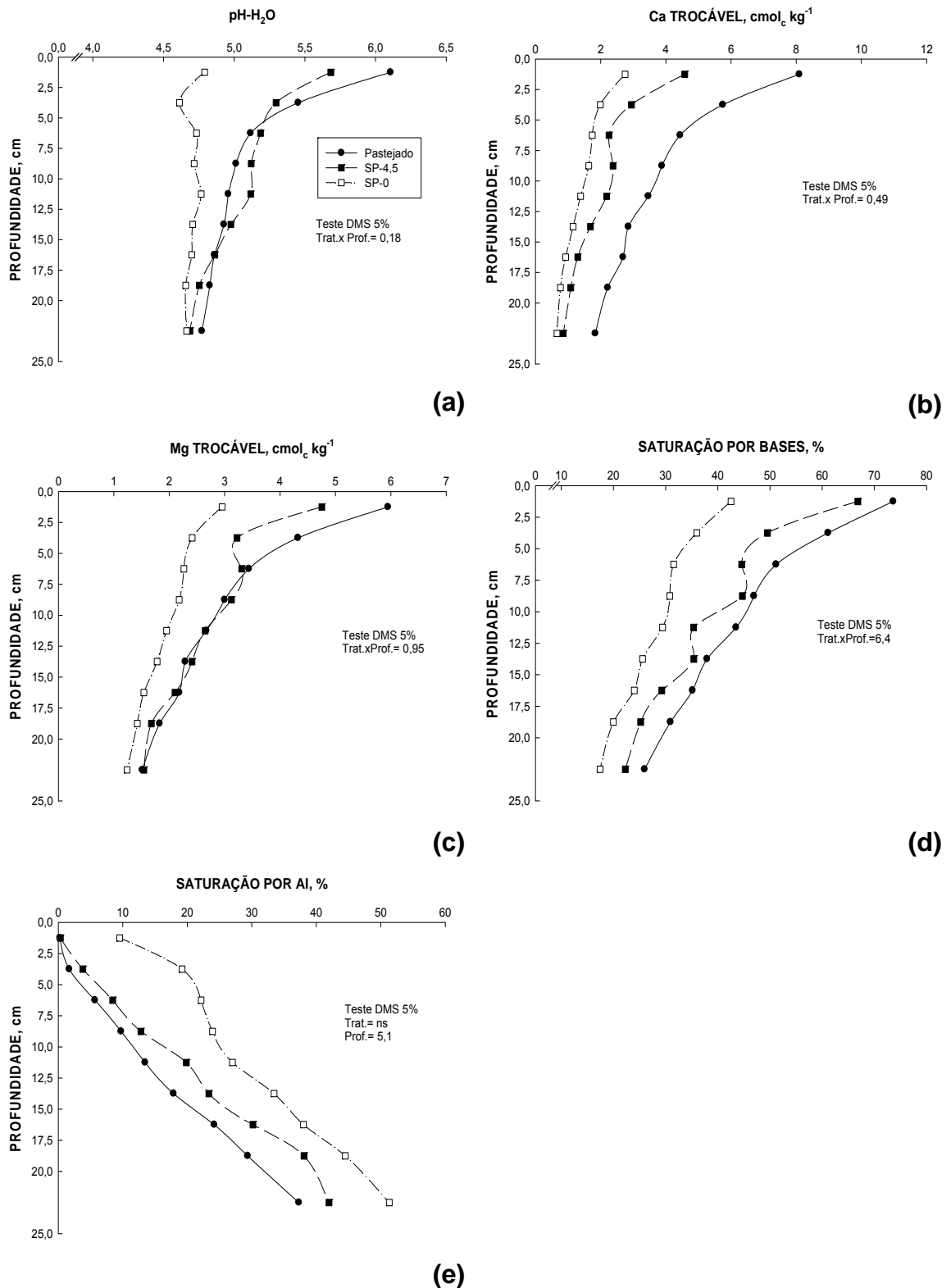


FIGURA 14. pH do solo (a), Ca trocável (b) e Mg trocável (c), saturação por bases (d) e saturação por Al (e) 24 meses após a aplicação de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo no inverno. (ns= não significativo).

consideradas estatisticamente significativas, porém do ponto de vista agrônomo podem não ter significado importante (Kaminski et al., 2005). Assim, considerando as recomendações da CQFS RS/SC (2004), relacionadas à acidez do solo, para o cultivo da soja em plantio direto consolidado: pH > 5,5, saturação por bases > 65% e saturação por Al < 10%; tais condições foram somente satisfeitas no momento de máxima ação do calcário, até aproximadamente 2,5 cm para pH e saturação por bases (Figura 14a, d, respectivamente) e até o redor de 7,5 cm para a saturação por Al (Figura 14e), sempre com a indicação desses efeitos se manifestarem em maior profundidade (5,0, 5,0 e 10 cm, respectivamente) quando da presença dos animais. É importante ressaltar que esse pouco efeito em profundidade decorre do fato de que a quantidade de calcário aplicada ($2,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ PRNT 100%) é bem mais baixa daquela recomendada (em torno de $4,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ – Tabela 1) para soja em plantio direto consolidado (CQFS RS/SC, 2004).

A presença dos animais em áreas com integração lavoura-pecuária promove um aumento da complexidade da dinâmica da correção da acidez, em função do pisoteio animal (alteração de atributos físicos do solo), do pastejo (afeta a biomassa vegetal sobre o solo) e dos excrementos animais (adiciona ligantes orgânicos). No contexto da correção da acidez do solo em áreas sob SPD e integração lavoura-pecuária, muito pouco se conhece, sendo carente de informações, para que se possam fazer recomendações de manejo da calagem específicas para esses sistemas, já que está ocorrendo uma expressiva expansão de sistemas de produção no Brasil.

Nesse sistema de integração, AOBPM liberados durante a decomposição dos resíduos animais, principalmente esterco, podem estar funcionando como carreadores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no perfil do solo. Por outro lado, o pastoreio pode estar influenciando as espécies componentes do pasto, aveia forrageira e azevém, a exsudar compostos orgânicos, que também podem incrementar o efeito em profundidade. Esta possibilidade poderia explicar o efeito mais homogêneo na área, uma vez que a distribuição dos resíduos animais é heterogênea e as amostragens de solo foram feitas evitando as áreas de concentração dos animais. Dentre os AOBPM exsudados pelas plantas e os liberados durante a degradação dos resíduos culturais, pode-se citar, como principais, o cítrico, o málico e o oxálico (Kochian, 1995;

Ma et al., 2001). Esses ácidos, além de outros, também são encontrados no esterco bovino (Baziramakenga & Simard, 1998). Deste modo, é possível que, de forma semelhante ao observado para AOBPM de origem vegetal, os AOBPM de origem animal possam estar formando complexos com Ca^{2+} e Mg^{2+} , favorecendo a sua descida no perfil do solo. Na tentativa de verificar o efeito de AOBPM, oriundos do esterco bovino e de resíduos vegetais, e identificar tais compostos, foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação, descritos no Apêndice 1. No entanto, não foi possível identificar esses compostos na solução percolada do solo, com a aplicação de distintas doses de esterco bovino.

Os teores de COT do solo se diferenciaram apenas na última avaliação, aos 48 meses (Figura 15), entre os tratamentos com maior adição de resíduos vegetais ao solo com relação àqueles com menor adição (10 e 20 cm), na camada de 7,5-10 cm, o que parece ser pouco provável. Pela significância estatística dessa análise, poder-se-ia afirmar que os resultados concordam, ao menos em parte, com a expectativa de que o aumento de resíduo vegetal, com o tempo, promove aumento dos teores de COT do solo, principalmente nos tratamentos com maior adição de resíduo ao solo. Apesar dessa significância, os teores de COT do solo nas várias épocas de amostragem são bastante próximos.

Para a manutenção, no tempo, dos teores iniciais de matéria orgânica do solo sob SPD, nas condições climáticas do RS, as adições anuais de resíduo vegetal da parte aérea ao solo não podem ser inferiores a $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Lovato et al., 2004; Nicoloso, 2005). No presente estudo, a quantidade média de resíduo vegetal (resíduo remanescente mais a parte aérea do pasto) que permaneceu sobre o solo, após os três ciclos de pastejo foram de 1,98, 3,59, 5,32, 6,06 e $7,78 \text{ Mg ha}^{-1}$, para os tratamentos 10, 20, 30 e 40 cm e SP, respectivamente. Se for considerada a razão entre a massa seca da parte aérea e o rendimento de grãos da soja, no momento da colheita, de 0,8 (Herzog et al., 2004), tem-se a produção média de resíduo de soja, ao longo das quatro safras avaliadas, de 2,91, 3,04, 2,95, 3,28 e $3,03 \text{ Mg ha}^{-1}$, nas alturas de manejo do pasto de 10, 20, 30 e 40 cm e na área SP, respectivamente. Desta forma, para a manutenção dos teores de COT iniciais do solo, o indicado é manejar o pasto entre 20 e 30 cm de altura. Com a adição

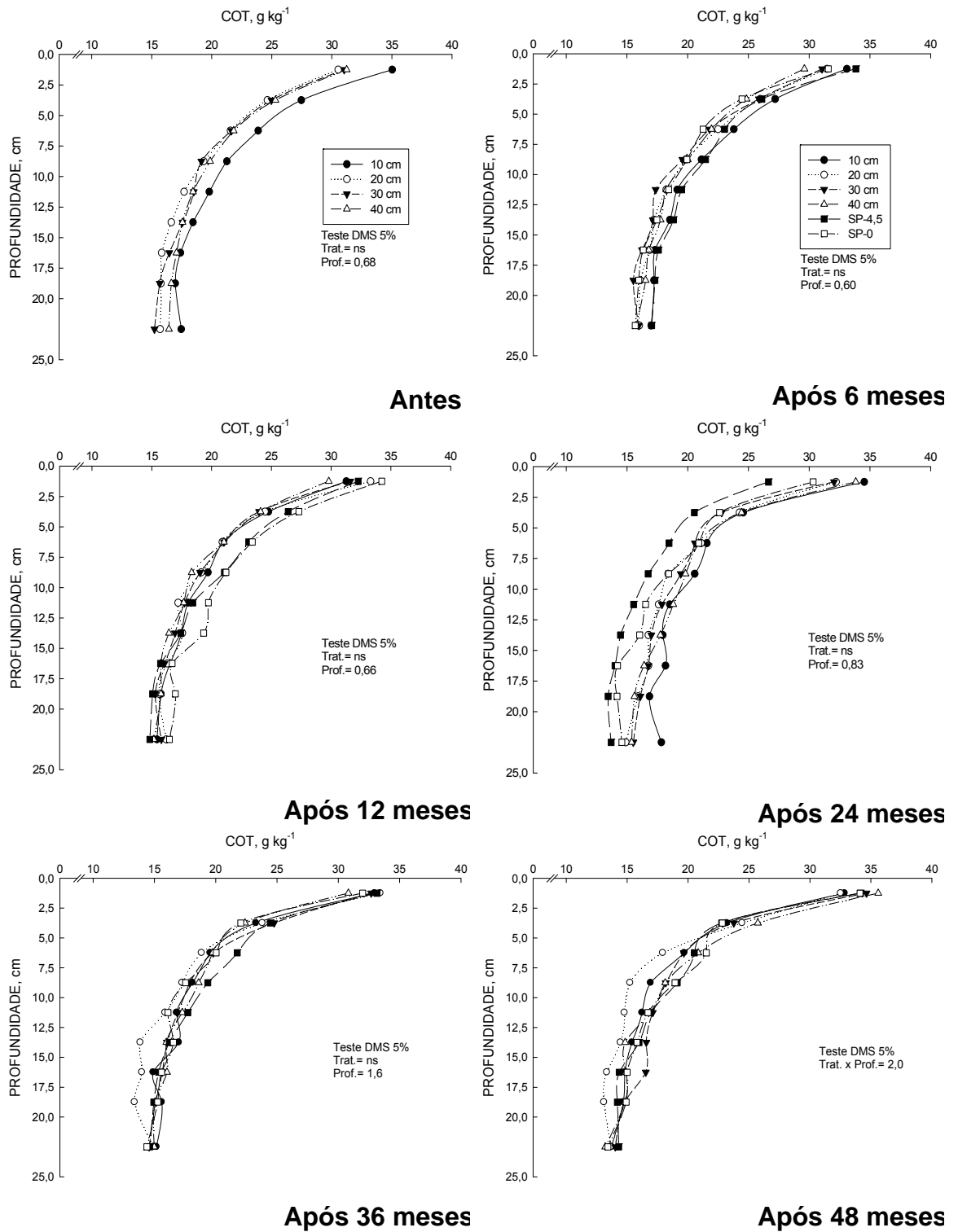


FIGURA 15. Teores de carbono orgânico total (COT) em diferentes profundidades e épocas da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária com pressões de pastejo no inverno.

diferenciada de resíduos principalmente no inverno, espera-se que com o passar do tempo haja uma diferenciação dos teores de COT do solo nas distintas pressões de pastejo.

Alterações no teor de COT, em função da utilização de distintas práticas de manejo do solo e de culturas, não têm sido facilmente detectadas devido a interferências de outros fatores e da variabilidade natural do solo. O efeito de mudanças no manejo tem sido detectado na fração particulada da matéria orgânica, que é uma fração mais lábil e mais facilmente alterada (Haynes, 2005).

Pelos resultados obtidos, pode-se verificar que as diferentes quantidades de resíduos adicionadas ao solo e as diferentes pressões de pastejo não afetaram o efeito do calcário em profundidade, como foi presumido. Esperava-se que nas menores alturas de manejo do pasto, e conseqüente menor adição de resíduos vegetais, o calcário teria a sua ação corretiva da acidez mais restrita, o que não se confirmou. Ao contrário, os resultados de pH, de cálcio e magnésio trocáveis e de saturação por bases obtidos no tratamento de menor altura do pasto (Figuras 9 a 12), mostram valores numericamente maiores desses atributos. A partir disso, foi levantada a hipótese de que os AOBPM, oriundos da decomposição das fezes, principalmente, de bovinos estariam favorecendo a correção da acidez, fato que não se confirmou (Apêndice 1).

4.4 Conclusões

O calcário aplicado na superfície do solo em plantio direto e integração lavoura-pecuária tem efeito máximo na correção da acidez do solo aos 24 meses. Após esse tempo, esse efeito tende a regredir, porém mantendo níveis de acidez inferiores aos da condição inicial sem calagem após 48 meses.

No seu ponto máximo de reação, o calcário aplicado nesse sistema de cultivo promove aumento dos teores de pH, cálcio trocável, magnésio trocável e saturação por bases e diminuição dos valores de saturação por alumínio até as profundidades de 12,5, 25, 10, 25 e 10 cm, respectivamente.

A presença de bovinos em pastejo favorece os efeitos da calagem

superficial em profundidade, não estando claros os fenômenos e processos responsáveis por esse efeito.

As diferentes quantidades de resíduos adicionadas ao solo após o pastejo de inverno não afetam o teor de carbono orgânico total do solo.

5. CAPÍTULO 4: CARBONO E NITROGÊNIO EM FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA E AGREGAÇÃO DO SOLO EM ÁREA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM DIFERENTES MANEJOS

5.1. Introdução

O teor de matéria orgânica do solo (MOS) tem sido usado como principal atributo para avaliação de qualidade do solo (Franzluebbers & Arshad, 1997; Wander, 2004; Haynes, 2005). Isso se deve à influência da MOS sobre atributos e processos físicos, químicos e biológicos do solo. Alterações no teor de carbono orgânico total do solo (COT) podem ocorrer em função de práticas de manejo do solo; no entanto, dificilmente têm sido detectadas, devido a interferências de outros fatores e da variabilidade natural do solo. As alterações na dinâmica da MOS também causam mudanças nos teores de nitrogênio total (NT) do solo, as quais também têm sido observadas com maior facilidade nas frações lábeis da MOS, como a matéria orgânica particulada (MOP) (Haynes, 2005).

A exploração agrícola interfere na quantidade de carbono adicionada ao solo, em função do manejo do solo e das culturas utilizadas, podendo variar, de baixas adições, em áreas de pousio, a altas adições, em áreas em que são utilizadas culturas que aportam grande quantidade de resíduo ao solo (Lovato et al., 2004). Culturas dotadas de sistema radicular abundante e agressivo, como gramíneas forrageiras perenes, são mais eficientes no aumento dos teores de COT no perfil do solo, pela maior quantidade de fotoassimilados nas raízes, quando comparadas a culturas anuais (Shamoot et al., 1968). Além de aumentar os teores de MOS, a adição de resíduos por sistemas de culturas, pode também aumentar os estoques de C e N no solo, contribuindo para o seqüestro de

C e diminuição da concentração de gases responsáveis pelo efeito estufa (Lal, 2004).

Por serem componentes da MOS, a dinâmica do N está muito relacionada a do C, alterando-se somente os mecanismos de adição e de perda de N no sistema solo (Bayer et al., 2000b). Solos degradados e com baixos teores de C, de forma geral, são deficientes em nitrogênio, o que se torna um fator limitante à adição de C ao solo, principalmente em sistemas de manejo que envolvam apenas gramíneas (Lovato et al., 2004). Desse modo, a adubação nitrogenada e a adição de leguminosas aos sistemas de rotação de culturas, se tornam fundamentais quando se almeja o aumento dos teores de C e de N do solo, a melhoria da sua qualidade e o aumento da produtividade das culturas (Vezzani, 2001).

A MOP, apesar de representar apenas uma pequena porção da massa de solo, é muito importante para a sua qualidade, pois é a principal rota de entrada de C para o solo; a principal fonte de C celular e energia para os microrganismos; a principal via de reciclagem de nutrientes no solo e é essencial para a manutenção da estrutura do solo, sobretudo da macroagregação (Haynes, 2005). Os teores de C e N na fração MOP podem ser rapidamente aumentados em sistemas que minimizem o revolvimento, podendo ser utilizados como indicadores da dinâmica da MOS no curto prazo de tempo (Franzluebbers & Arshad, 1997).

Tendo em mente as observações expostas, espera-se que: 1) os teores de carbono e de nitrogênio na fração da matéria orgânica particulada sejam maiores nas áreas sob pastagens perenes em relação às áreas cultivadas; 2) as pastagens perenes resultem em maiores estoques de carbono e nitrogênio do que as áreas cultivadas e; 3) os agregados de solo encontrados nas áreas de pastagens sejam de maior tamanho e tenham maior estabilidade em água do que os encontrados nas áreas sob cultivo de grãos. Para isso, foi desenvolvido o presente estudo com os objetivos de: 1) avaliar os teores e estoques de carbono e nitrogênio em diferentes frações da matéria orgânica do solo; 2) estabelecer relações dos teores de carbono e de nitrogênio entre as diferentes frações da matéria orgânica do solo com o estado de agregação do solo.

5.2. Material e Métodos

O presente trabalho foi desenvolvido na Fazenda Experimental Dudley Smith, localizada próxima a cidade de Pana (Illinois-EUA). O solo da área é classificado como Argiaquol Vértico méxico, com textura siltosa (71, 707 e 222 kg kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente, na camada de 0-20 cm) e vem sendo conduzido sob sistema convencional de cultivo (SCC) por pelo menos 15 anos.

A área total da fazenda, 90 hectares, onde eram produzidos milho e soja, foi convertida para experimento em 2002, quando foi adotado um sistema de integração lavoura-pecuária. Imediatamente antes da implantação do experimento foi feita uma coleta de solo em 84 pontos na área, na camada de 0-15 cm de profundidade, para sua caracterização e verificação das necessidades de fertilizantes e corretivo da acidez, cujos resultados foram: pH-H₂O= 6,4; P= 32,9 mg dm⁻³; K= 153 mg dm⁻³, C= 16,7 g kg⁻¹ e; N= 1,20 g kg⁻¹.

A área foi dividida em três blocos, com quatro tratamentos cada, sendo eles: 1) pastejo em pastagem perene de inverno (PPI - 6 ha); 2) pastejo em pastagem perene verão (PPV - 2 ha); 3) pastejo de resíduos de milho e de culturas de cobertura do solo no inverno (PMCC - 9,6 ha cada) e; 4) lavoura contínua de milho (CM - 2 ha), sem pastejo (Anexo 2).

A PPI foi constituída de uma mistura de gramíneas (*Festuca arundinacea*, *Dactylis glomerata* e *Lolium perenne*) e leguminosas (*Trifolium pratense* e *T. repens*), assim como a PPV (*Tripsacum dactyloides*, *Andropogon gerardii*, *Schizachyrium scoparium*, *T. pratense* e *T. repens*), a qual foi utilizada para estender a rotação no meio do verão, quando as PPI tornavam-se improdutivas. A lotação utilizada foi de 2,5 e 1,0 animais ha⁻¹ no verão e no inverno, respectivamente.

No tratamento PMCC, foram cultivados, no verão, 9,6 hectares de cada cultura de grãos (milho e aveia). O solo foi preparado, com uma lavração e duas gradagens, em abril para a semeadura da aveia e do milho. Após a colheita da aveia (julho), o solo foi novamente gradeado para a semeadura de uma mistura de culturas de cobertura do solo, composta por aveia (*Avena sp.*), centeio (*Secale cereale*) e nabo forrageiro (*Brassica rapa*), com pastejo no final do outono. No outono, quando as pastagens perenes tornaram-se

improdutivas, devido ao frio, os animais foram movidos para as áreas cultivadas, onde permaneceram durante o inverno, pastejando as espécies de cobertura do solo e os resíduos de milho, que ficaram sobre o solo após a colheita. O método de pastejo foi o de pastejo em faixas (25 x 330 m). Em geral os animais permaneceram nessa área de novembro até março, quando então retornaram a pastejar as áreas com pastagens perenes.

Em janeiro de 2007, foram coletados monólitos com 10x10x20 cm, em três pontos por parcela, os quais foram segmentados em quatro camadas: 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm. Na seqüência, as amostras foram desagregadas manualmente, tomando-se o cuidado de respeitar os pontos de fraqueza entre os agregados, passadas em peneira de 9,50 mm e, então, foram deixadas para secar em temperatura ambiente. Na mesma oportunidade, foram coletadas amostras para a determinação da densidade do solo. Para tanto, foi utilizado um amostrador cilíndrico, com diâmetro interno de 4,0 cm, utilizado para retirada das amostras até 20 cm de profundidade, as quais foram segmentadas nas mesmas profundidades que as amostras destinadas a avaliação dos agregados. A densidade do solo foi obtida pela razão entre a massa do solo e o volume do cilindro utilizado na coleta.

Uma subamostra, da amostra desagregada e seca, foi moída o suficiente para passar em peneira de 2 mm. Dessa subamostra, foram pesadas 10 gramas para a separação da fração particulada, por meio de peneiramento, empregando-se o método "Turbo-POM" (Marriott & Wander, 2006). Após a obtenção da MOP, essa fração e uma nova alíquota do solo <2 mm foram moídas para obtenção de uma amostra pulverizada, nas quais foram determinados os teores de C e N nas frações da MOP (C-MOP e N-MOP) e total (COT e NT), utilizando-se um analisador automático de C e N (Costech Analytical Elemental Combustion System 4010, Valencia, CA). O teor de carbono associado aos minerais foi obtido pela diferença entre o COT e C-MOP. Foram calculados os estoques de C e N, em ambas as frações da MOS, pelo método da massa equivalente.

Das amostras que foram passadas na peneira de 9,50 mm, após a secagem, foi retirada uma subamostra de 25 g para determinação da estabilidade de agregados em água, seguindo a metodologia descrita por Kemper & Chepil (1965), com agregados <9,50 mm (Capenedo & Mielniczuk,

1990). As amostras foram postas no topo de um conjunto de peneiras, com malhas de 4,75, 2,00, 1,00 e 0,25 mm, contidas num recipiente com água até o nível de um fino filme de água na base da peneira do topo, onde as amostras foram deixadas por 10 minutos para umedecerem por capilaridade. Na seqüência, as amostras foram agitadas verticalmente, por 10 minutos, de forma que, na posição mais baixa do ciclo do agitador, elas ficavam totalmente submersas. A massa de solo retido em cada peneira foi passado para recipientes de alumínio e levados para secagem em estufa, a 105°C por no mínimo 24 horas, sendo posteriormente pesadas. Foi descontada a fração areia nas alíquotas de solo retidas em cada peneira, dispersando o solo com 20 ml de uma solução de hexametáfosfato de sódio (5%).

Ao final, foram obtidas cinco classes de agregados (>4,75, 4,75-2,00, 2,00-1,00, 1,00-0,25 e <0,25), sendo a menor classe obtida por diferença da massa de solo adicionada (25 g) e o somatório das demais classes. Foram calculados o percentual de agregados para cada classe e o diâmetro médio ponderado (DMP), de acordo com Conceição (2006).

Os resultados das avaliações realizadas foram submetidos à análise da variância, empregando-se o Teste da Diferença Mínima Significativa (DMS) com $P < 0,05$ para a separação das médias, utilizando-se do seguinte modelo estatístico para a análise da variância:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + \text{erro } a(i,j) + P_k + \text{erro } b(i,k) + AP_{jk} + \text{erro } c(i,j,k)$$

Onde: B = blocos (i = 1,2,3); T = tratamentos (j = 1,2,3,4); C = camadas amostradas (k = 1,2,3,4).

5.3. Resultados e discussão

Com exceção da relação C:N total da MOS e da densidade do solo, todas as demais variáveis apresentaram interação ($P < 0,05$) entre sistema de manejo e a profundidade. O COT (Figura 16), ao contrário do que freqüentemente tem sido relatado (Wander, 2004; Haynes, 2005), mostrou-se sensível aos sistemas de manejo adotados, apresentando maiores teores em todas as camadas do solo no tratamento PMCC, enquanto que, em geral, a PPI apresentou valores intermediários e a PPV e o CM apresentaram valores

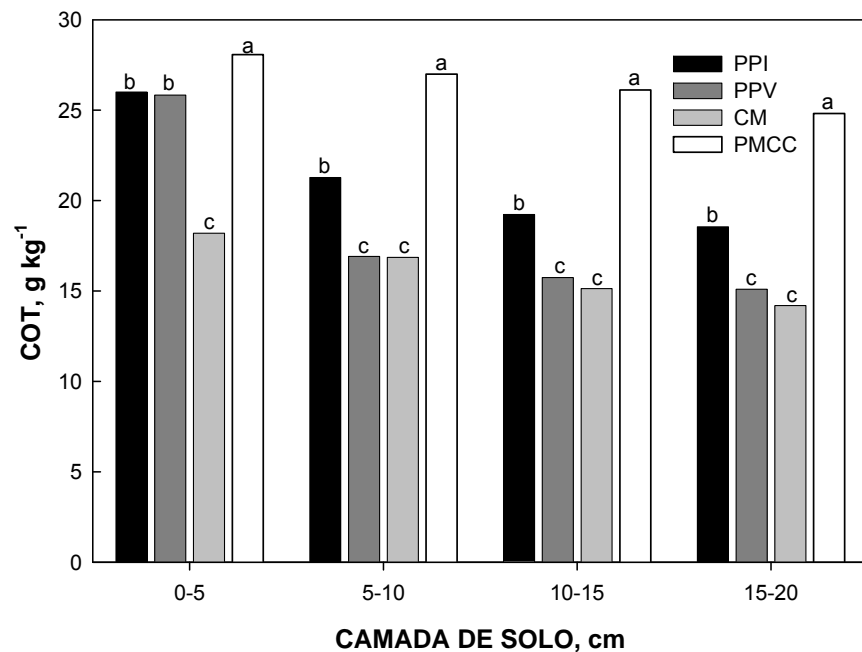


FIGURA 16. Carbono orgânico total (COT) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.

menores que os demais, mas semelhantes entre si. O NT (Figura 17) apresentou comportamento semelhante ao do COT, com exceção da camada superficial (0-5 cm), onde não foram verificadas diferenças entre as áreas de pastagem e a área cultivada com grãos no verão e pastejada no inverno. Os teores de C e N na fração particulada da MOS (Figuras 18 e 19, respectivamente), apresentam comportamento similar, com maiores teores no PMCC em todas as camadas, exceto na de 0-5 cm, na qual os valores de N foram maiores na PPV. Os teores C da MOP corresponderam de 28,5 a 6,3% (PPV nas camadas de 0-5 e 15-20 cm, respectivamente) dos teores de COT do solo (Figura 20), enquanto que os teores de N-MOP corresponderam de 25,6 (PPV na camada de 0-5 cm) a 4,5% (PPI na camada de 15-20 cm) do NT do solo (Figura 21). A relação C:N da MOS do solo não diferiu entre os manejos utilizados (Figura 22), ao contrário da fração particulada, que mostrou-se sensível aos tratamentos (Figura 23), apresentando valores maiores e similares nas diferentes camadas de solo na área cultivada com grãos no verão e pastejo no

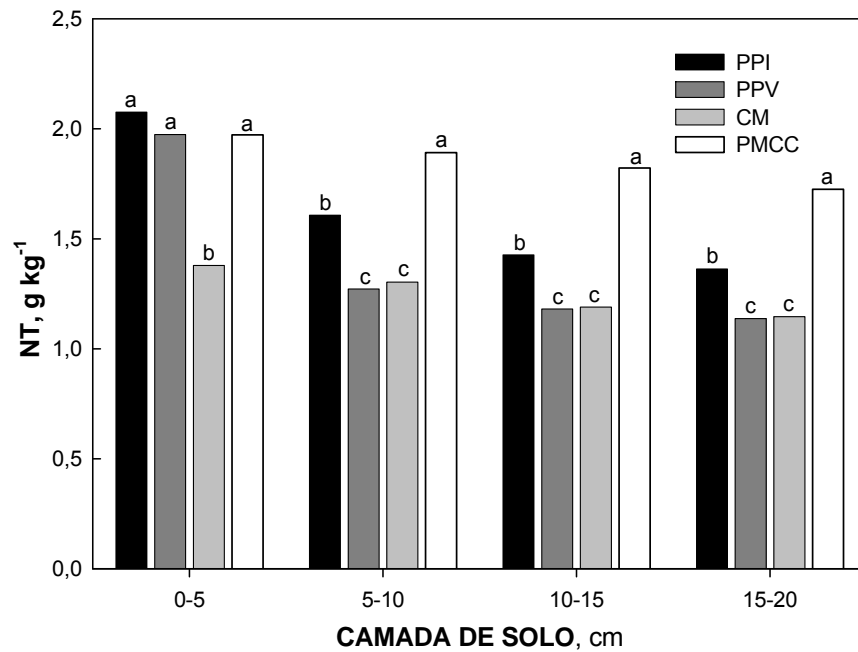


FIGURA 17. Nitrogênio total (NT) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.

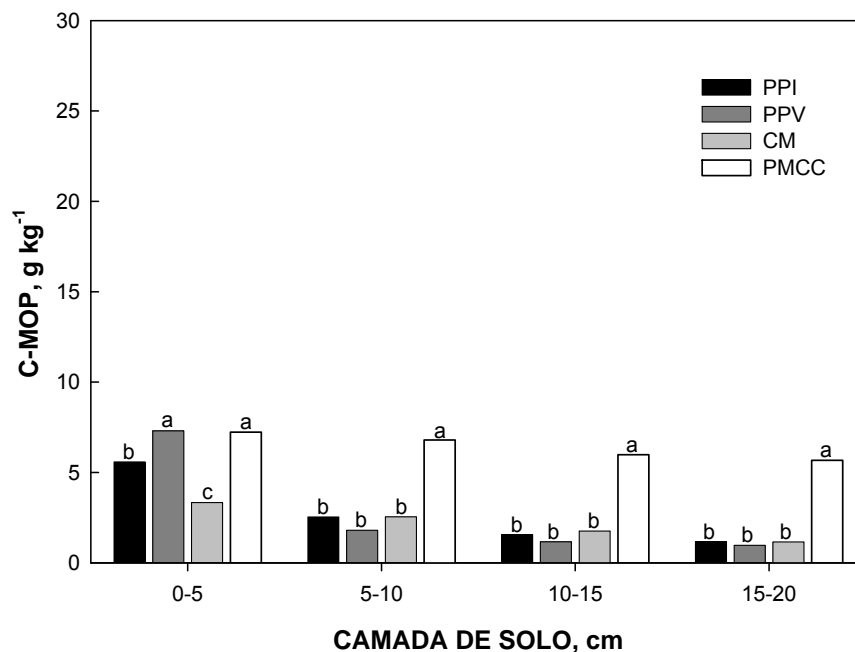


FIGURA 18. Teor de C na matéria orgânica particulada do solo (C-MOP) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.

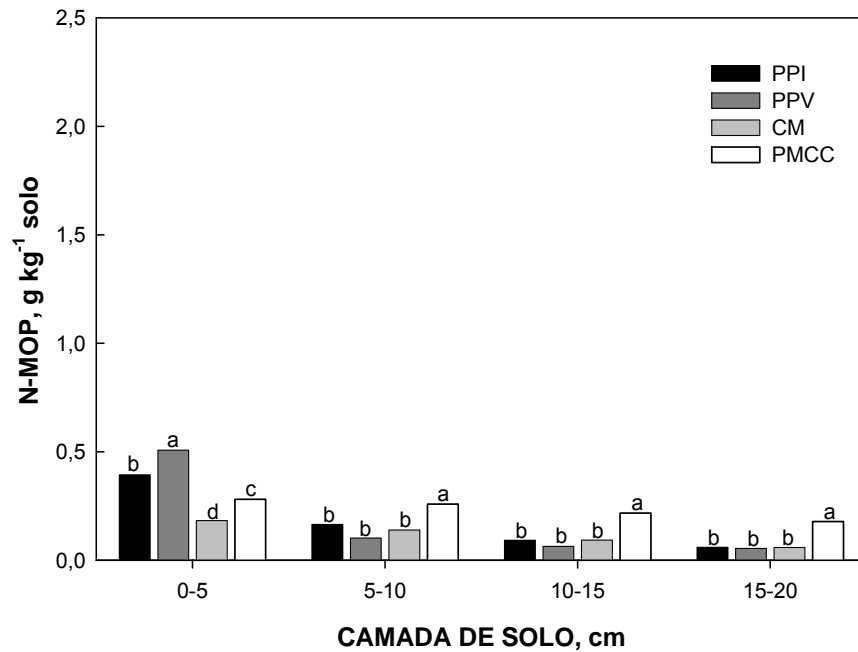


FIGURA 19. Teor de N na matéria orgânica particulada (N-MOP) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.

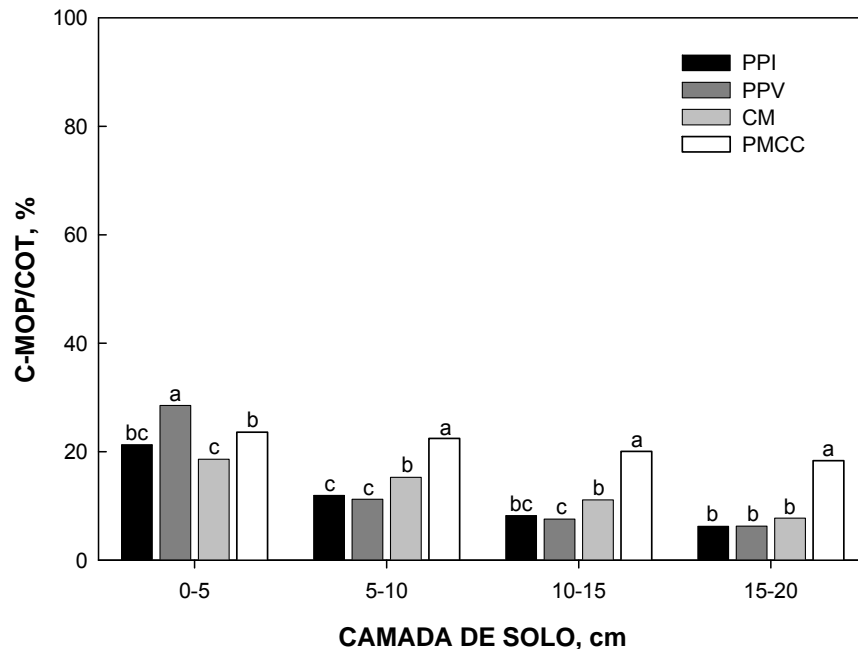


FIGURA 20. Proporção do carbono orgânico total do solo (COT) na forma de carbono na matéria orgânica particulada (C-MOP) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.

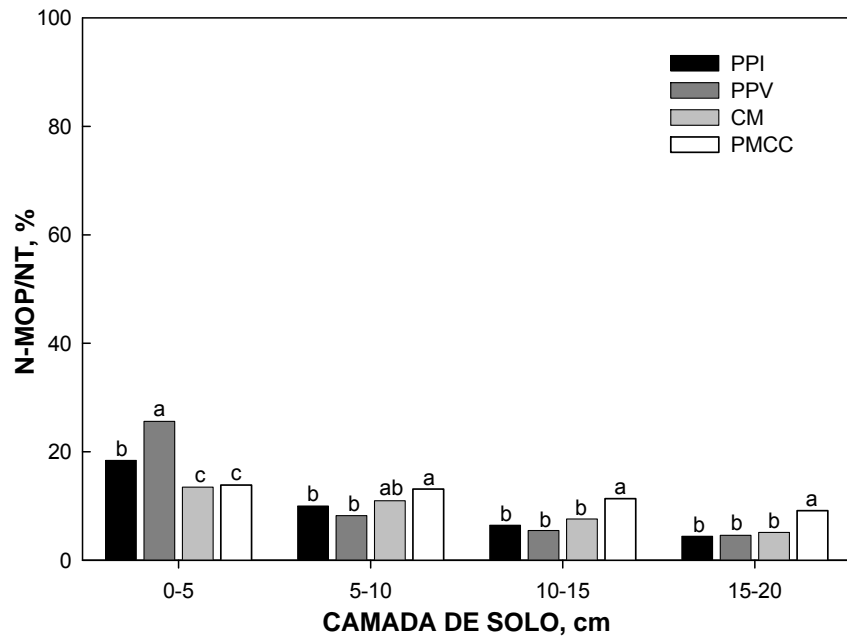


FIGURA 21. Proporção do nitrogênio total do solo (NT) na forma de nitrogênio na matéria orgânica particulada (N-MOP) em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.

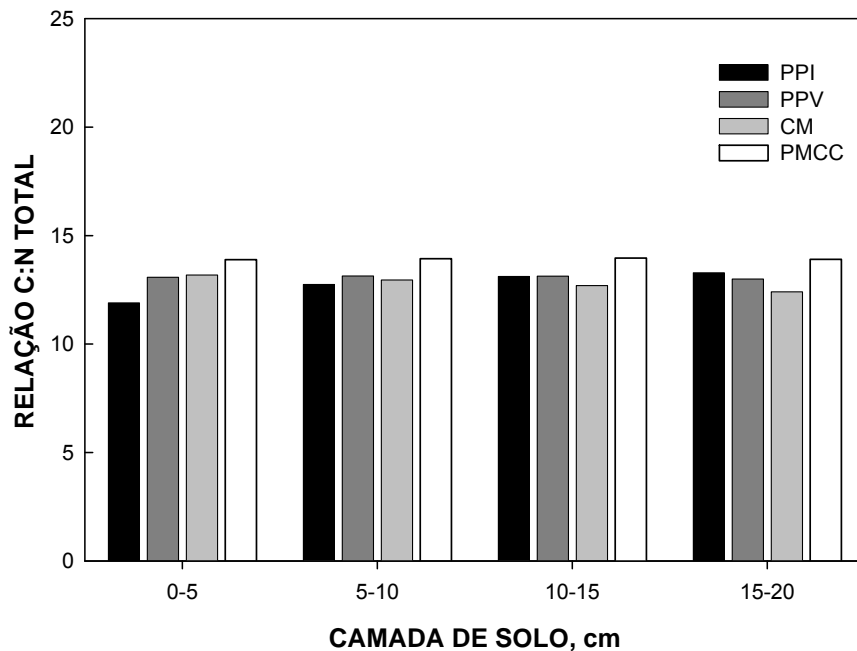


FIGURA 22. Relação C:N da matéria orgânica do solo em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.

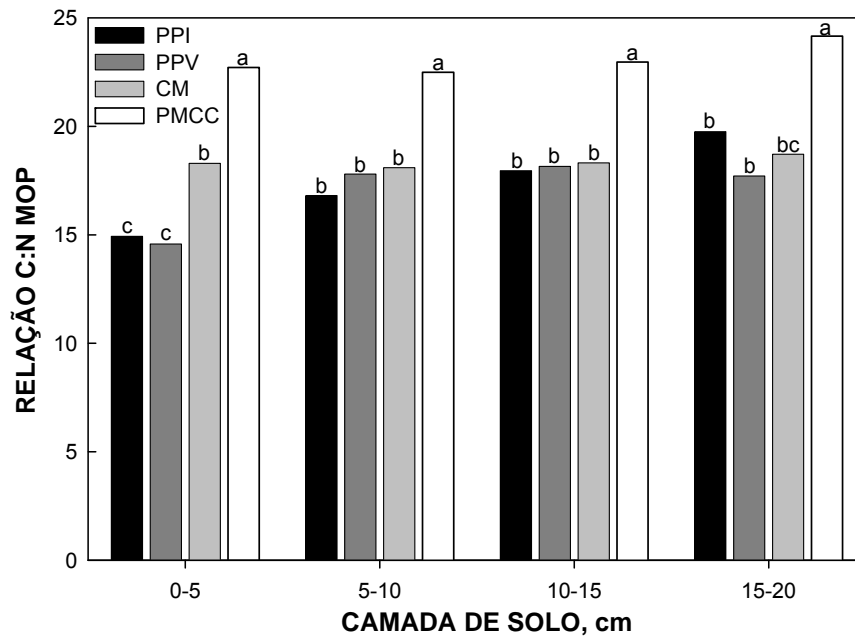


FIGURA 23. Relação C:N da matéria orgânica particulada do solo em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.

inverno (PMCC) e os menores nas áreas com pastagens na camada de 0-5 cm.

Apesar de não haverem diferenças ($P > 0,05$) entre os manejos adotados, valores maiores de densidade do solo foram observados na PPV em relação aos demais manejos (Figura 24), sendo, por isso, escolhida como padrão de densidade para os demais tratamentos, que tiveram as camadas de solo ajustadas em relação a esse tratamento para o cálculo dos estoques de C e N nas frações total e particulada da MOS. Os estoques de C e N na fração total e de C na MOP seguiram a tendência dos resultados anteriores, havendo maiores estoques na área cultivada com aveia e milho para grãos no verão e com pastejo no inverno (PMCC), não diferindo, em alguns casos, das áreas de pastagens de inverno (COT e NT) e de verão (C-MOP e N-MOP) (Tabelas 10 e 11).

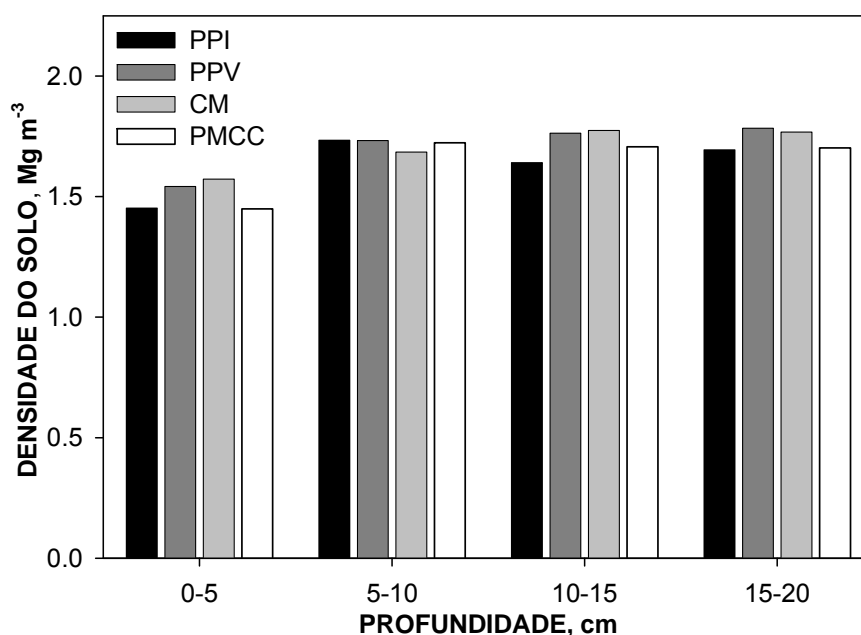


FIGURA 24. Densidade do solo em em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura) do solo.

Os maiores teores de C e N nas frações total e particulada da MOS, do tratamento PMCC, no entanto, não se refletiram em melhores índices de estabilidade de agregados em água (Figuras 25a a 25d), fazendo com que esse tratamento se comportasse de forma similar à área cultivada continuamente com milho (CM), que, em geral, apresentou os valores mais baixos em todos os atributos mencionados anteriormente. Na PPI foram encontrados os agregados mais estáveis em água, sendo observadas, de forma generalizada, as maiores diferenças nas classes de agregados >4,75 e <0,25 mm. Esses resultados se refletiram no DMP dos agregados (Figura 25e), tendo a PPI agregados de maior tamanho em todas as profundidades, enquanto que os demais manejos não se diferenciaram entre si, com exceção da camada de 0-5 cm, onde a PPV apresentou comportamento intermediário entre a PPI e os demais tratamentos.

Os maiores teores de C e N nas frações total e particulada da MOS (Figuras 16 a 19) na área cultivada com culturas de grãos no verão e pastejada durante o inverno (PMCC), podem ser explicados pela maior adição média de resíduos culturais de milho e aveia durante o ano ($\approx 9 \text{ Mg ha}^{-1}$) em relação à pastagem perene de verão (PPV) ($\approx 3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) e à pastagem perene de

inverno (PPI) ($\approx 1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$). A incorporação do resíduo vegetal no solo implica em uma distribuição mais uniforme dos teores de C e N nas diferentes camadas de solo analisadas em ambas as frações da MOS no PMCC.

TABELA 10. Estoques de C nas frações total (COT) e particulada (C-MOP) da matéria orgânica em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura).

Camada	Tratamentos			
	PPI	PPV	CM	PMCC
----- cm -----	----- COT, Mg ha ⁻¹ -----			
0-5	20,04ab	19,92b	14,02c	21,65a
5-10	18,43b	14,65c	14,60c	23,38a
10-15	16,95b	13,88c	13,34c	23,02a
15-20	16,55b	13,46c	12,66c	22,13 ^a
Camada	----- C-MOP, Mg ha ⁻¹ -----			
0-5	4,31b	5,62a	2,58c	5,58a
5-10	2,20b	1,56b	2,21b	5,88a
10-15	1,37b	1,03b	1,55b	5,27a
15-20	1,03b	0,87b	1,03b	5,06a

TABELA 11. Estoques de N nas frações total (NT) e particulada (N-MOP) da matéria orgânica em diferentes camadas e sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura).

Camada	Tratamentos			
	PPI	PPV	CM	PMCC
----- cm -----	----- NT, Mg ha ⁻¹ -----			
0-5	1,60a	1,52a	1,06b	1,52a
5-10	1,39b	1,10c	1,13c	1,64a
10-15	1,26b	1,04c	1,05c	1,61a
15-20	1,22b	1,01c	1,02c	1,54a
Camada	----- N-MOP, Mg ha ⁻¹ -----			
0-5	0,30b	0,39a	0,14d	0,22c
5-10	0,14b	0,09b	0,12b	0,22a
10-15	0,08b	0,06b	0,08b	0,19a
15-20	0,05b	0,05b	0,05b	0,16a

Os teores mais elevados de NT na camada superficial nas áreas com pastagens perenes (Figura 17) podem ser devido à presença de leguminosas nas pastagens (*T. pratense* e *T. repens*), cujos resíduos ricos em N se acumulam na superfície. Esse efeito tem maior expressão na fração particulada da MOS (Figura 19). A diferença entre as áreas de pastagens (PPV e PPI) pode ser devida ao maior acúmulo de N na fração particulada da MOS

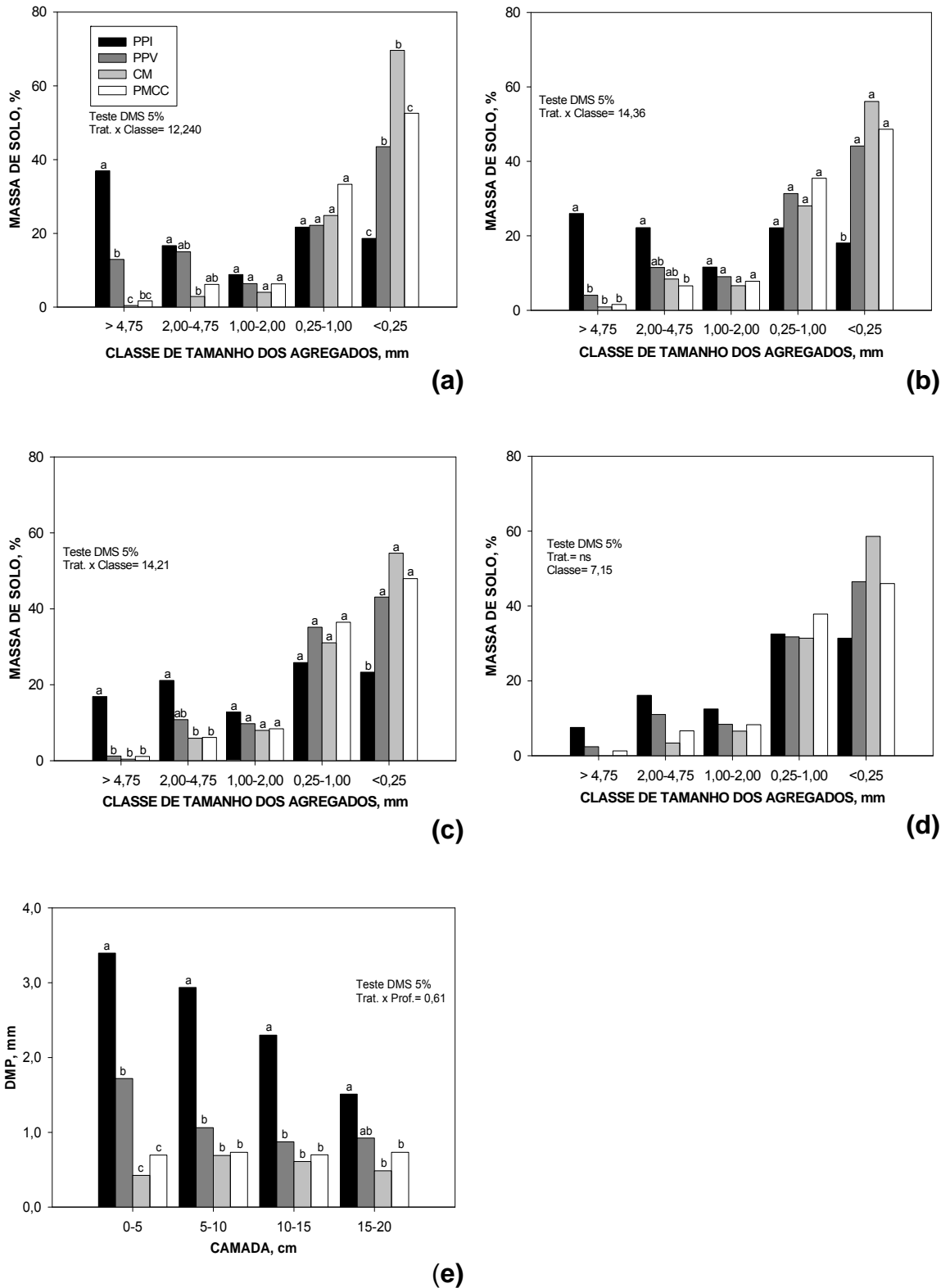


FIGURA 25. Distribuição de classes dos agregados nas camadas de 0-5 (a), 5-10 (b), 10-15 (c) e 15-20 (d) cm e diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados (e) em diferentes sistemas de manejo (PPI- pastagem perene de inverno; PPV- pastagem perene de verão; CM- lavoura contínua de milho e; PMCC- pastejo de resíduo de milho e culturas de cobertura).

na PPV, o que estaria proporcionando um maior acúmulo de C. Esses resultados estão de acordo com os relatos de Vezzani (2001) e Lovato et al. (2004), nos quais é destacada a importância N no aumento dos teores de C do solo, seja adicionado por meio de fertilizantes ou por meio de rotação de culturas com leguminosas.

Os menores teores de N-MOP, observados na camada de 0-5 cm, no tratamento CM (Figura 19), podem estar relacionados com a alta relação C:N do resíduo do milho, o que favorece a imobilização de N na biomassa microbiana. Os teores mais elevados de N no tratamento PMCC nas profundidades 5-10, 10-15 e 15-20 cm, tanto na fração total como na particulada (Figuras 17 e 19), podem ser devidos há vários fatores. Nesse sistema de manejo, as duas culturas de grãos, milho e aveia, receberam adubação nitrogenada (150-190 e 60 kg N ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente). Além disso, entre as culturas de cobertura utilizadas foi cultivado o nabo forrageiro, que possui grande capacidade de reciclar o N do solo (Aita et al., 2001). Outro fator que pode estar influenciando, são as excreções animais, urina e fezes, pois grande parte do N consumido durante o pastejo é retornada ao solo na forma de dejetos (Haynes & Williams, 1993).

Os teores de C e N na MOP correspondem a cerca de 20% dos teores totais do solo (Figuras 20 e 21) e essa proporção diminui à medida que se aprofunda no perfil do solo, indicando que grande parte do C, e conseqüentemente do N, no solo está associada a fração mineral do solo, rico em minerais 2:1 e com elevada capacidade de troca de cátions (CTC). Esses dados dão uma idéia da labilidade da MOS, pois a MOP é a fração mais lábil da MOS e mais influenciada pelo manejo, podendo ser utilizada como índice de qualidade do solo (Haynes, 2005), em função da gama de benefícios que essa fração da MOS proporciona ao ambiente solo.

Na camada superficial (0-5 cm), para todos os manejos e nas demais camadas para o PMCC (Figura 20), os valores da relação C-MOP/COT (20 a 45%) estão de acordo com relatos da literatura, enquanto que os valores da relação N-MOP/NT (13 a 40%) estão de acordo com a literatura até a profundidade de 10 cm (Cambardella & Elliott, 1992; Franzluebbbers & Arshad, 1997), ficando abaixo desses valores nas demais camadas.

Apesar dos valores totais de C e N terem sido sensíveis aos diferentes manejos adotados (Figuras 16 e 17), quando foi calculada a relação C:N da MOS, esse comportamento não se repetiu (Figura 22), corroborando com vários relatos citados por Haynes (2005), que destacam a dificuldade de se verificar diferenças entre sistema manejo de solo e de culturas, num curto período de tempo, sobre a MOS, quando se avalia apenas os teores totais de C e N. Já, a relação C:N da MOP (Figura 23), foi sensível aos distintos manejos, mostrando o efeito do acúmulo de N na camada superficial nas áreas sob pastagens, com menores valores da relação C:N, e o efeito da adição de resíduos de gramíneas (milho, aveia e centeio) no PMCC, com maiores valores dessa relação. Tais resultados indicam que a MOP do PMCC é formada por resíduos menos decompostos que nos demais tratamentos (Marriott & Wander, 2006), o que pode ser explicado pela maior adição de resíduos ao solo e ao fato desse resíduo ser adicionado ao solo em duas oportunidades durante o ano. Observa-se também que não há uma dependência entre as relações C:N das frações total e particulada da MOS, devido ao fato da MOP representar 25% ou menos da MOS do solo. Essa relação é mais clara quando a MOP representa grande parte da MOS, o que frequentemente não ocorre em solos agrícolas (Wander, 2004).

A relação C:N da MOS e de suas frações têm sido empregada como índice de qualidade do solo, porém, a sua interpretação tem sido muito difícil, pela variação da relação C:N da MOP que, ao longo do ano, num mesmo local, pode apresentar variação maior do que em amostras coletadas em diferentes locais (Wander, 2004).

Seguindo a mesma tendência dos teores de C e N, o PMCC apresentou os maiores ($P < 0,05$) estoques C e N em ambas as frações da MOS, com exceção da camada de 0-5 cm para o N-MOP, onde os mesmos foram maiores nas áreas sob pastagens (Tabelas 10 e 11). O preparo do solo no PMCC promoveu a homogeneização dos estoques de C e N em profundidade. Esse comportamento dos estoques de C e N nas frações total e particulada da MOS é resultante dos mesmos fatores discutidos anteriormente para os teores de C e N, como a maior adição de resíduos e a sua incorporação no PMCC e a presença e acúmulo de resíduos de leguminosas na camada superficial das áreas sob pastagem. Tais resultados indicam

comportamento oposto daquele relatado por Ogle et al (2005) e Conant et al., (2007), quando comparadas áreas sob SCC e pastagens perenes, em que freqüentemente são observadas diminuições nos teores e estoques de C e N do solo em áreas sob SCC.

O contínuo preparo do solo com aração e gradagem promove a diminuição dos estoques de C e N do solo e essa diminuição está relacionada com a região climática onde está se trabalhando, obedecendo a seguinte ordem: clima tropical úmido > clima tropical seco > clima temperado úmido > clima temperado seco (Franzluebbers et al., 2001). De acordo com essas observações, os resultados obtidos podem estar sendo influenciados pela baixa temperatura no inverno (média normal inferior a -2°C) no Estado de Illinois (Illinois State Climatologist Office, 2008), em que a atividade dos microrganismos no solo é baixa, que aliada a alta adição de resíduos pelos cultivos no PMCC, resulta em aumento dos teores e estoques de C e N nesse manejo.

Apesar de ter apresentado os maiores teores e estoques de C e N na MOS e na MOP, o PMCC apresentou em torno de 60% da massa de agregados na classe $<0,25$ mm, o que indica baixa estabilidade de agregados (Figuras 25a a 25d). O acúmulo de agregados em classes de tamanho menores que 1,00 mm se deve ao fato dessas unidades estruturais permanecerem estáveis quando submetidas a rápido umedecimento e de não serem destruídas pelo preparo do solo e outras práticas agrícolas. Essas unidades são constituídas, na sua maior parte, por estruturas de 2 a 20 μm de diâmetro, as quais são mantidas unidas pela ação de diversos agentes cimentantes presentes no solo (Tisdall & Oades, 1982).

Na camada superficial (0-5 cm), se destacou a PPI, que apresentou maior estabilidade de agregados, com cerca de 60% dos agregados com diâmetro superior a 2 mm (Figura 25a). Por esses resultados, os teores de C e N, em ambas as frações da MOS, não foram os fatores determinantes da estabilidade de agregados nesse sistema de manejo (PPI). O não revolvimento do solo, evitando o rompimento dos agregados, aliado ao sistema radicular das espécies de gramíneas quem compõem o pasto, parecem serem os fatores determinantes da estabilidade de agregados. As áreas sob pastagem diferem quanto à estabilidade de agregados até os 15 cm de profundidade,

considerando a maior classe de agregados (>4,75 mm), o que já não ocorre quando se considera a classe subsequente de tamanho dos agregados. Essa diferenciação pode ser devida, em parte, à presença dos animais em pastejo por maior período de tempo nas áreas de PPI que, ao mesmo tempo em que se alimentam do pasto, estimulam as espécies vegetais a emitirem novas raízes, aumentando a quantidade de raízes em relação à PPV, o que pode estar estabilizando agregados de maior tamanho.

Essa diferença entre a estabilidade de agregados na PPI e os demais manejos, pode ser observada quando se calcula o DMP dos agregados (Figura 25e), pelo qual se verifica que o DMP nesse tratamento, até os 15 cm de profundidade, é, no mínimo, o dobro dos demais tratamentos.

Agregados estáveis em água, maiores que 2,00 mm, têm sua estabilidade mantida por raízes finas e por hifas de fungos em solo com alto teor de C, enquanto que em solos com baixos teores de C (<10 g kg⁻¹) a estabilidade é mantida por agentes cimentantes de caráter transitório (Tisdall & Oades, 1982). Assim sendo, a estabilidade de agregados maiores que 2,00 mm é dependente das práticas de manejo adotadas (Silva & Mielniczuk, 1997), uma vez que o sistema radicular das culturas têm conformação e modo de ação diferenciado, o que então pode se refletir em diferentes níveis de estabilidade. Gramíneas perenes, em função de apresentarem sistema radicular mais denso e melhor distribuído no solo, favorecem a ligação entre partículas minerais do solo e agregados, formando novos agregados e auxiliando na sua estabilização (Silva & Mielniczuk, 1997). Além disso, de acordo com os mesmos autores, as gramíneas perenes apresentam periódica renovação do sistema radicular e distribuição uniforme de exsudatos liberados pelas mesmas no solo, que estimulam a atividade microbiana no solo, colaborando, dessa forma, também para o aumento da formação e estabilização de agregados. Esse efeito pode ser potencializado com o cultivo conjunto de gramíneas e leguminosas, tanto em pastagens como em sistemas de rotação de culturas em áreas agrícolas (Wohlenberg et al., 2004).

5.4. Conclusões

O sistema de preparo convencional do solo com cultivo de grãos de aveia e milho no verão e pastejo de resíduos de milho e de espécies de cobertura do solo no inverno, é mais efetivo no acúmulo de carbono e nitrogênio, aumentando tanto os seus teores quanto estoques, nas frações total e particulada da matéria orgânica do solo em ambiente temperado.

Os maiores teores e estoques de carbono no solo na área com cultivo de grãos no verão e pastejo no inverno não se refletiram em agregados maiores e mais estáveis em água.

6. CONCLUSÕES GERAIS

É perfeitamente possível a utilização de sistemas de integração lavoura pecuária em áreas de plantio direto, cultivadas com soja no verão e com culturas de cobertura de solo durante o inverno em condições de clima subtropical. O manejo do pasto de aveia+azevém em alturas entre 20 e 30 cm de altura: 1) não promove compactação do solo; 2) não é prejudicial ao estabelecimento inicial e ao rendimento de grãos da soja; 3) não restringe o efeito em profundidade do calcário aplicado em superfície; 4) estimula o efeito em profundidade do calcário pela presença de bovinos e; 5) adiciona ao solo resíduo vegetal suficiente para manter os teores de carbono do solo nas condições de clima subtropical do Rio Grande do Sul.

O calcário aplicado em superfície em área de integração lavoura pecuária sob sistema plantio direto apresenta máxima reação aos 24 meses após sua aplicação, com efeitos sobre pH, cálcio trocável, magnésio trocável, saturação por bases e saturação por alumínio até as profundidades de 12,5, 25, 10, 25 e 10 cm, respectivamente.

Em ambiente de clima temperado, como a região do *Corn Belt* americano, com a utilização de sistemas de integração lavoura pecuária sob sistema convencional de cultivo é possível o acúmulo de carbono em níveis superiores ao de pastagens perenes. Esse maior acúmulo de carbono, no entanto, não resulta em melhora da estrutura do solo, pois nesse caso o método de preparo do solo é mais importante.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L. **Propriedades hídricas e mecânicas afetadas por sistemas de manejo e variabilidade espacial de um Argissolo**. Santa Maria : UFSM, 2000. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

AITA, C.; BASSO, C. J.; CERETTA, C. A.; GONÇALVES, C. N.; DA ROS, C. O. Plantas de cobertura de solo como fontes de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.4, p.1157-1165, 2001.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeito da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.717-723, 2001.

ALLEN, V. G.; BAKER, M. T.; SEGARA, E.; BROWN, C. P. Integrated irrigated crop-livestock system in dry climates. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.99, n.2, p.346-360, 2007.

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de Cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.6, p.923-934, 2005.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; SPAGNOLLO, E.; DE CAMPOS, B. H. C.; DA VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, WI, v.35, n.4, p.1599-1607, 2006.

AMARAL, A. S. **Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de água na superfície**. 2002. 107 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.4, p.695-702, 2001.

AMBROSI, I.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; ZOLDAN, S. M. Lucratividade e riscos de sistemas de produção de grãos combinados com pastagens de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.10, p.1213-1219, 2001.

ASSMANN, T. S.; RONZELLI JÚNIOR, P.; MORAES, A.; ASSMANN, A. L.; KOEHLER, H. S.; SANDINI, I. Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.675-683, 2003.

BASSANI, H. J. **Propriedades físicas induzidas pelo plantio direto e convencional em área pastejada e não pastejada**. Santa Maria : UFSM, 1996. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1996.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; CERETTA, C. A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.53, n.2, p.95-104, 2000a.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.7, p.677-683, 2004.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.54, n.1-2, p.101-109, 2000b.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; AMADO, T. J. C. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. **Geoderma**, Orlando, FL., v.133, n.3-4, p.258-268, 2006a.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.86, n.2, p.237-245, 2006b.

BAZIRAMAKENGA, R.; SIMARD, R. R. Low molecular weight aliphatic acid contents of composted manures. **Journal of Environmental Quality**, Madison, WI, v.27, n.3, p.557-561, 1998.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A.; ALMEIDA, E. X.; KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de ofertas de forragem de capim-elefante anão cv. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p.1047-1054, 2000.

BERTOL, I.; GOMES, K. E.; DENARDIN, R. B. N.; MACHADO, A. Z.; MARASCHIN, G. E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.5, p.779-786, 1998.

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**, Collingwood, VIC, v.37, n.4, p.743-760, 1999.

BOUMA, J. **Guide to study of water movement in soil pedons above the watertable**. Madison: University of Wisconsin, 1973. 194 p.

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

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistemas de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, n.1, p.27-34, 1998.

CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.2, p.275-286, 2003.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132 p.

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

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.1, p.99-105, 1990.

CASSOL, L. C. **Relação solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. 2003. 157f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CLARK, J. T.; RUSSELL, J. R.; KARLEN, D. L.; SINGLETON, P. L.; BUSBY, W. D.; PETERSON, B. C. Soil surface property and soybean yield response to corn stover grazing. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.96, n.5, p.1364-1371, 2004.

CONAB. 2008. **Sexto levantamento de avaliação da safra 2007/08 - Março de 2008**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 10/03/2008.

CONANT, R. T.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; SWAN, A.; WILLIAMS, S. Impacts of periodic tillage on soil C stocks: A synthesis. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.95, n.1-2, p.1-10, 2007.

CONCEIÇÃO, P. C. **Proteção física da matéria orgânica do solo em solos do Sul do Brasil**. 2006. 145 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CORREA, J. C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.1, p.107-114, 1995.

CQFS RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre, 2004. 400 p.

EDWARDS, W. M.; NORTON, L. D.; REDMOND, C. E. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v.52, n.2, p.483-487, 1988.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/SOLOS, 1999. 412 p.

FONTANELI, R. S.; AMBROSI, I.; SANTOS, H. P.; IGNACZAK, J. C.; ZOLDAN, S. M. Análise econômica de sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.11, p.2129-2137, 2000.

FRANCHINI, J. C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.533-542, 1999a.

FRANCHINI, J. C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MALAVOLTA, E. Dynamic of ions in acid soil leached with green manure residues extracts and pure solutions of organic acids. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2267-2276, 1999b.

FRANCHINI, J. C.; BORKERT, C. M.; FERREIRA, M. M.; GAUDÊNCIO, C. A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.459-467, 2000.

FRANZLUEBBERS, A. J. Integrated crop-livestock systems in the southeastern USA. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.99, n.2, p.361-372, 2007.

FRANZLUEBBERS, A. J.; ARSHAD, M. A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v.61, n.5, p.1382-1386, 1997.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Crop and cattle responses to tillage systems for integrated crop-livestock production in the Southern Piedmont, USA. **Renewable Agriculture and Food Systems**, Cambridge, v.22, n.3, p.168-180, 2007.

FRANZLUEBBERS, A. J.; HANEY, R. L.; HONEYCUTT, C. W.; ARSHAD, M. A.; SCHOMBERG, H. H.; HONS, F. M. Climatic influences on active fractions of soil organic matter. **Soil Biology & Biochemistry**, Orlando, FL, v.33, n.7-8, p.1103-1111, 2001.

GATIBONI, L. C. **Oferta de forragem de pastagem natural afetada pela adubação fosfatada e introdução de espécies forrageiras de inverno**. Santa Maria : UFSM, 1999. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-

Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J. P. C.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.2, p.283-290, 2003.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.82, n.1, p.121-145, 2005.

HAYNES, R. J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. **Advances in Agronomy**, Madison, WI, v.85, n.2, p.221-268, 2005.

HAYNES, R. J.; WILLIAMS, P. H. Nutrient Cycling and Soil Fertility in the Grazed Pasture Ecosystem. **Advances in Agronomy**, Madison, WI, v.49, n.1, p.119-199, 1993.

HERZOG, R. S.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R. Produtividade de soja em semeadura direta influenciada por profundidade do sulcador de adubo e doses de resíduo em sistema irrigado e não irrigado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.771-780, 2004.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um Argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.3, p.573-580, 2005.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; GATIBONI, L. C.; BORTOLUZZI, E. C.; XAVIER, F. M. Resposta de culturas à aplicação de calcário em superfície ou incorporado ao solo em campo nativo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.4, p.605-609, 2000.

KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; MARTINS, J. R.; SANTOS, E. J. S.; TISSOT, C. A. Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.1107-1113, 2002.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C. A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanism of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Revision Plant Physiology Plant Molecular Biology**, Palo Alto, CA, v.46, n.1, p.237-260, 1995.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Orlando, FL, v.123, n.1-2, p.1-22, 2004.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistema de integração

lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.1131-1140, 2007.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v.44, n.3, p.450-457, 1980.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, New York, NY, v.1, n.1, p.277-294, 1985.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.1, p.175-187, 2004.

MA, J. F.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organics acids. **TRENDS in Plant Science**, Londres, v.6, n.6, p.273-278, 2001.

MARRIOTT, E. E.; WANDER, M. M. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v.70, n.3, p.950-959, 2006.

MELLO, J. S. Fundamentos para integração lavoura-pecuária no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.3, p.612-613, 1996.

MELLO, L. M. M. **Integração agricultura-pecuária em plantio direto: atributos físicos e cobertura residual do solo, produção de forragem e desempenho econômico**. Ilha Solteira : USP, 2001. 72 f. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Agronomia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.

MELLO, N. A. Degradação física dos solos sob integração lavoura pecuária. In: ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL., Pato Branco, 2002. **Anais...** Pato Branco, 2002. p.43-60.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.411-416, 1993.

MORAES, A.; LUSTOSA, S. B. C. Efeito do animal sobre as características do solo e a produção da pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE AVALIAÇÃO DE PASTAGENS COM ANIMAIS, Maringá, 1997. **Anais...** Maringá, 1997. p.129-149.

MORAES, A.; PELISSARI, A.; ALVES, S. J.; CARVALHO, P. C. F.; CASSOL, L. C. Integração lavoura-pecuária no Sul do Brasil. In: ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL, Pato Branco, 2002. **Anais...** Pato Branco, 2002. p.3-42.

MORAES, M. F.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; COSCIONE, A. R. Ion mobility in acid soils with surface application of lime, organic acid and crop residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.4, p.673-684, 2007.

NICOLOSO, R. S. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto**. Santa Maria : UFSM, 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

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**, Collingwood, VIC, v.52, n.1, p.37-43, 2001.

ILLINOIS STATE CLIMATE OFFICE. 2008. **State-wide Records and Normals**. Disponível em: <http://www.sws.uiuc.edu/atmos/statecli/>. Acesso em: 20/02/2008.

OGLE, S. M.; BREIDT, F. J.; PAUSTIAN, K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. **Biogeochemistry**, Netherlands, v.72, n.1, p.87-121, 2005.

PALADINI, F. L. S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.2, p.135-140, 1991.

PETRERE, C.; ANGHINONI, I. Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.4, p.885-895, 2001.

POTAFOS. 2007. **Como a planta da soja se desenvolve**. Disponível em: <http://www.potafos.org>. Acesso em: 15/02/2007.

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.675-684, 1998.

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**, Collingwood, VIC, v.44, n.2, p.317-331, 1993.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; XAVIER, F. M. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.2, p.263-268, 2000a.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E. C.; GATIBONI, L. C. Alterações de atributos químicos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.4, p.797-805, 2000b.

RUSSELLE, M. P.; FRANZLUEBBERS, A. J. Introduction to "Symposium: Integrated crop-livestock systems for profit and sustainability". **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.99, n.2, p.323-324, 2007.

RUSSELLE, M. P.; ENTZ, M. H.; FRANZLUEBBERS, A. J. Reconsidering integrated crop-livestock systems in north America. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.99, n.2, p.325-334, 2007.

SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACHADO, A. Z. M.; OLIVEIRA, H. Pastoreio de aveia e compactação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.69, n.1, p.32-34, 2002.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. Santa Maria : UFSM, 2003. 108 f. (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.5, p.797-904, 2004.

SHAMOOT, S.; MCDONALD, L.; BARTHOLO.WV. Rhizo-Deposition of Organic Debris in Soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, WI, v.32, n.6, p.817-820, 1968.

SILVA, A. P.; INHOFF, S.; CORSI, M. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.70, n.1, p.83-90, 2003.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.1, p.113-117, 1997.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p.191-199, 2000.

SMITH, C. W.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactibility and compressibility. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.43, n.3/4, p.335-354, 1997.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. V. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. V., eds. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.1-21.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELLI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.533-542, 2004.

SULC, R. M.; TRACY, B. F. Integrated crop-livestock systems in the U.S. corn belt. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.99, n.2, p.335-345, 2007.

TANNER, C. B.; MAMARIL, C. P. Pasture soil compaction by animal traffic. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v.51, n.6, p.329-331, 1959.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.19, n.1, p.111-119, 1991.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; WOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic-Matter and Water-Stable Aggregates in Soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.33, n.2, p.141-163, 1982.

TREIN, C. R.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia+trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.1, p.105-111, 1991.

UHDE, L. T.; COGO, N. P.; TREIN, C. R.; LEVIEN, R. Comportamento da sucessão trevo/milho, em área com e sem pastejo intensivo, sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.3, p.493-501, 1996.

VEZZANI, F. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

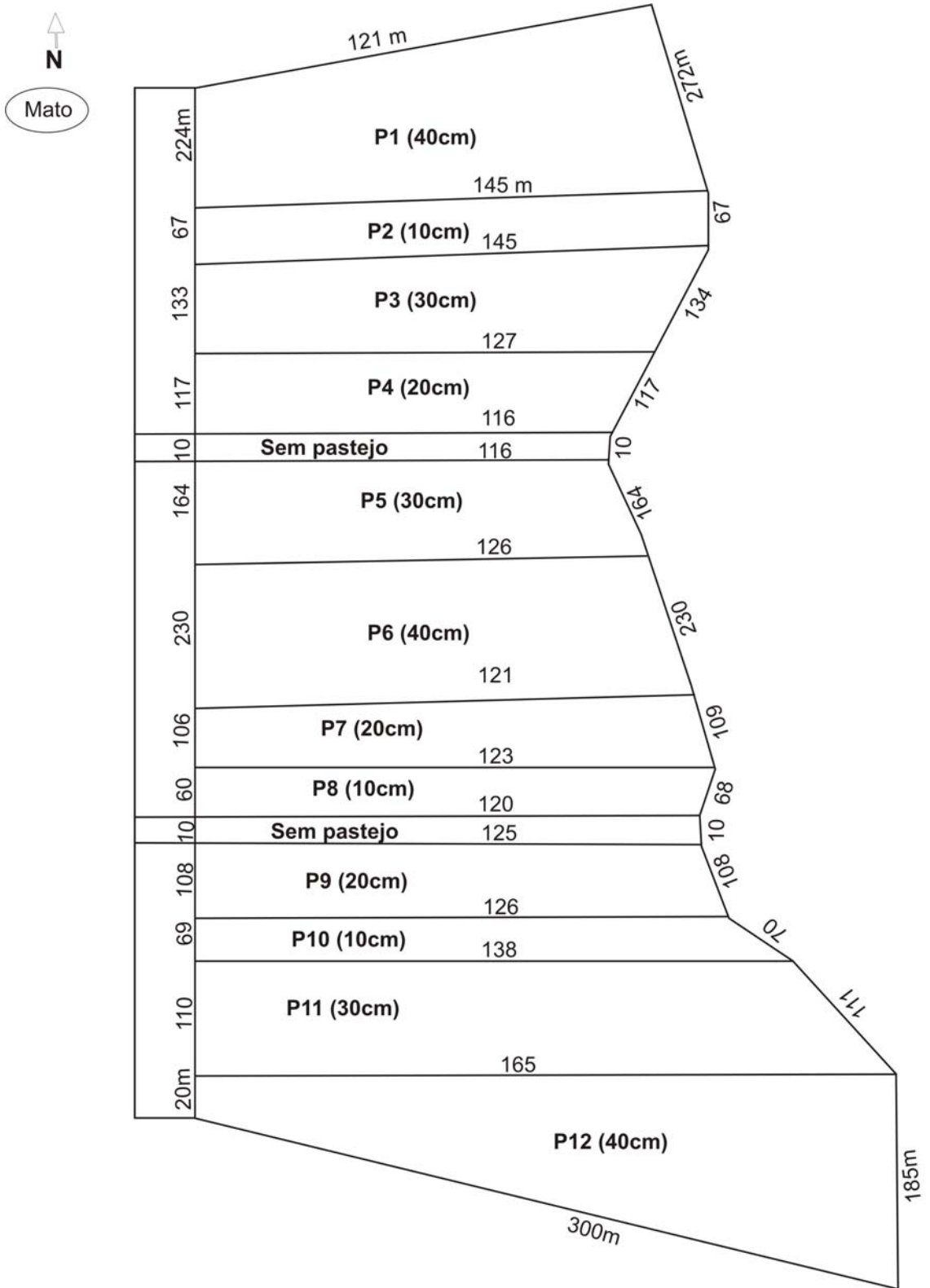
WANDER, M. M. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. In: MAGDOFF, F.; WEIL, R., eds. **Advances in Agroecology**. Boca Raton: CRC Press, 2004. p.67-102.

WILLATT, S. T.; PULLAR, D. M. Changes in soil physical properties under grazed pastures. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, VIC, v.22, n.3, p.343-348, 1983.

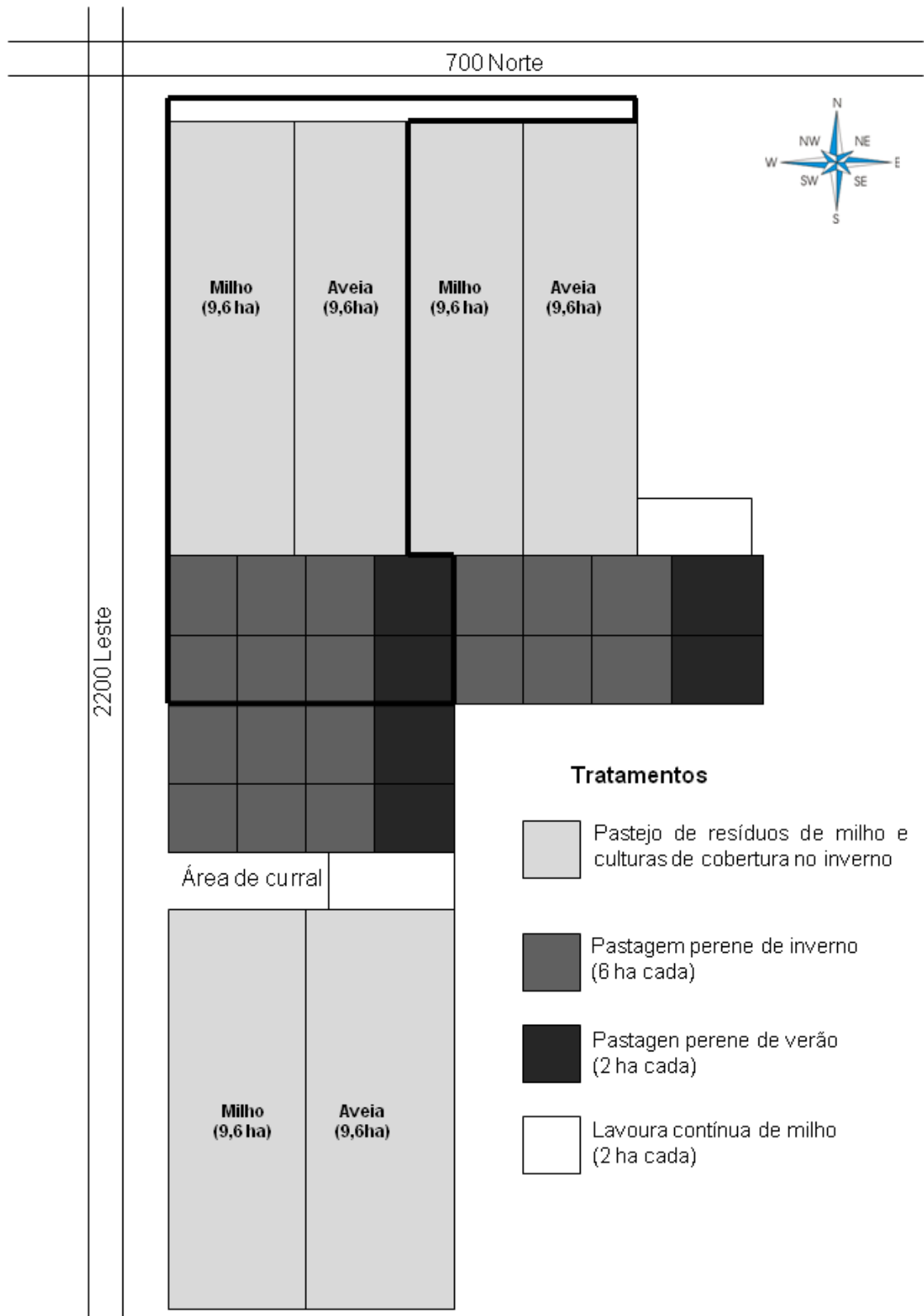
WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, H. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p.891-900, 2004.

YANG, X. M.; WANDER, M. M. Tillage effects on soil organic carbon distribution and storage in a silt loam soil in Illinois. **Soil & Tillage Research**, Orlando, FL, v.52, n.1-2, p.1-9, 1999.

8. ANEXOS



Anexo 1: Croqui da área experimental de São Miguel das Missões.



Anexo 2: Croqui da área experimental da *Dudley Smith Farm* (Pana – Illinois/EUA) referente ao ano 2005/06.

9. APÊNDICES

APÊNDICE 1: ÁCIDOS ORGÂNICOS DE BAIXO PESO MOLECULAR PROVENIENTES DO ESTERCO E SEU EFEITO NA DINÂMICA DO CALCÁRIO EM SOLO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

INTRODUÇÃO

Com a adoção do sistema de plantio direto (SPD) surgiram dúvidas quanto à aplicação do calcário no solo em relação ao sistema convencional de cultivo (SCC), já que nesse último o calcário é aplicado e incorporado, em função da sua reatividade no solo, e no SPD, a aplicação é feita em superfície. Esta nova situação gerou muitos questionamentos no meio técnico e entre produtores, pois havia o entendimento de que a aplicação superficial causaria uma diminuição na eficiência da calagem. Com o passar do tempo, verificou-se, em alguns trabalhos (Pöttker & Ben, 1998; Rheinheimer et al., 2000b; Rheinheimer et al., 2000a; Amaral & Anghinoni, 2001) que a calagem superficial tem seus efeitos, sobre a acidez do solo, restritos à camada superficial e em outros (Caires et al., 1998; Petreire & Anghinoni, 2001; Caires et al., 2003; Gatiboni et al., 2003), que os efeitos dessa prática poderiam atingir camadas mais profundas do solo. Vários fatores (solo, clima, rotação de culturas, manejo do solo e características do calcário) interagem na determinação do efeito, em profundidade, do calcário aplicado em superfície. São vários os mecanismos responsáveis pela dinâmica de reação do calcário no solo, que afetam a sua dinâmica em profundidade. Dentre eles, se pode citar, a translocação de cátions divalentes (Ca^{2+} e Mg^{2+} , principalmente) e a amenização da fitotoxicidade do alumínio por compostos orgânicos liberados

pelos resíduos vegetais ou durante a sua degradação (Franchini et al., 1999a; Franchini et al., 2000; Amaral, 2002; Moraes et al., 2007)

Em áreas sob SPD, ocorre a liberação de AOBPM na degradação de resíduos vegetais que permanecem na superfície, os quais atuam como ligantes orgânicos, favorecendo o aumento de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e a diminuição do Al fitotóxico em profundidade (Miyazawa et al., 1993; Franchini et al., 1999b; Franchini et al., 2000). Dentre os AOBPM exsudados pelas plantas e que podem ser liberados durante a degradação dos resíduos vegetais, pode-se citar como principais o cítrico, o málico e o oxálico (Kochian, 1995; Ma et al., 2001). Alguns desses AOBPM também podem ser encontrados nos excrementos de bovinos, ocorrendo principalmente o acético, o fórmico e o oxálico e, em quantidades menores, o málico, o láctico, o propiônico, o cítrico e o aconítico (Baziramakenga & Simard, 1998).

Alguns trabalhos têm sido realizados no intuito de verificar o efeito dos AOBPM liberados durante a decomposição ou adicionados na forma de extratos, na dinâmica da acidez do solo (Miyazawa et al., 1993; Franchini et al., 1999b; Franchini et al., 2000). Observa-se, em alguns casos, efeitos significativos, os quais podem ser devidos a fatores diversos, dentre eles o tipo de solo e a dose de resíduos utilizada, chegando em alguns casos a atingir doses maiores 40 Mg ha^{-1} de resíduo vegetal (Moraes et al., 2007).

Em função do grande volume de pesquisas recentemente desenvolvidas em áreas sob SPD, houve avanço do conhecimento sobre a dinâmica da acidez em áreas puramente de lavouras, com aplicação de calcário na superfície. Já, com respeito a sistemas integrados de produção (lavoura e pecuária), pouco se conhece. Acredita-se que a entrada de animais nas áreas de lavouras cause um aumento da complexidade da dinâmica da correção da acidez do solo, uma vez a presença dos animais na pastagem estaria beneficiando o seu efeito em profundidade (Cassol, 2003).

À semelhança do que tem sido relatado para resíduos de origem vegetal, espera-se que os AOBPM presentes no esterco bovino possam agir com carreadores de cátions divalentes (Ca^{2+} e Mg^{2+}) no perfil do solo e também reagir com o Al^{3+} trocável da solução do solo, diminuindo a sua fitotoxicidade. De acordo com Wright et al. (1985), esses efeitos são acelerados quando o

corretivo é misturado com esterco bovino, o que pode estar ligado à presença de AOBPM no esterco.

Este trabalho teve por objetivos: a) verificar o efeito de resíduos animais (fezes bovina) e vegetais (aveia) sobre a dinâmica da correção da acidez a partir da aplicação superficial de calcário e; b) identificar AOBPM na solução percolada do solo após a aplicação de esterco bovino na superfície do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido junto a Universidade de Illinois em Urbana-Champaign (UIUC, Illinois-EUA), com amostras coletadas em um Argiaquol Vértico méxico, com textura siltosa (71, 707 e 222 kg kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente, na camada de 0-20 cm), com pH-H₂O = 6,4; P = 32,9 mg dm⁻³; K= 153 mg dm⁻³, C = 16,7 g kg⁻¹ e; N = 1,20 g kg⁻¹.

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e em vasos. As amostras foram coletadas nas áreas com lavoura contínua de milho, do experimento descrito no Item 5.2, a fim de evitar um possível efeito de resíduos animais previamente depositos no solo. Para atender os objetivos deste estudo, foram conduzidos dois experimentos, que são descritos na seqüência.

Experimento 1

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em colunas de PVC com diâmetro de 10 cm e altura aproximada de 15 cm, nas quais foi coletada, no dia 20/10/2006, a camada de solo de 0-10 cm de profundidade. As colunas tiveram a sua parte inferior revestida por uma fina tela plástica, a qual foi presa às colunas de PVC com fita adesiva. As colunas permaneceram em casa de vegetação recebendo em torno de 50 ml de água a cada dois dias, a fim de evitar a secagem do solo e o seu desprendimento das paredes da coluna. Na borda superior da coluna de solo em contato com a parede do tubo de PVC, foi aplicada parafina derretida, para impedir o fluxo de água por essa região. No dia 17/12/2006 foram aplicados os seguintes tratamentos na superfície do solo: 1) resíduo vegetal de aveia (5,27 Mg ha⁻¹); 2) calcário (2 Mg

ha⁻¹ na forma de CaCO₃); 3) esterco bovino (26,2 Mg ha⁻¹); 4) resíduo vegetal + calcário; 5) esterco + calcário; 6) resíduo vegetal + esterco + calcário e; 7) testemunha. As colunas permaneceram na casa de vegetação por um período de 90 dias, recebendo 50 ml de água por dia, para manter o solo com adequado teor de umidade.

Passados os 90 dias, o restante dos resíduos remanescente sobre o solo, em cada tratamento, foram cuidadosamente retirados e a coluna de solo foi segmentada nas camadas de 0-2,5, 2,5-5, 5-7,5 e 7,5-10 cm. As amostras foram estocadas em sacos plásticos, identificadas, secas em estufa a 60°C e então enviadas para o Laboratório de Análises de Solo da *Virginia Tech University (Virginia Cooperative Extension, Soil Testing Laboratory)*, onde foram determinados o pH-H₂O e os teores Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ trocáveis. O teor de Al³⁺ trocável não foi analisado, uma vez que o solo não apresenta problemas de toxidez por esse elemento em função do pH em água ser maior que 5,5. Com esses resultados, foram calculadas a CTC estimada e a saturação por bases do solo. A CTC estimada é calculada conforme a seguir:

$$\text{CTC estimada} = \text{Acidez (cmol}_c \text{ kg}^{-1}) + \text{Soma de bases (cmol}_c \text{ kg}^{-1})$$

$$\text{Acidez (cmol}_c \text{ kg}^{-1}) = 37,94 - (5,928 \times \text{pH-tampão Mehlich})$$

Os resultados das avaliações foram submetidos à análise de variância, utilizando-se o teste de DMS (P<0,05) para a comparação entre médias, considerando o delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições. O modelo estatístico utilizado para esta análise foi:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + T_j + \text{erro a (i,j)} + P_k + \text{erro b (i,k)} + TP_{jk} + \text{erro c (i,j,k)}$$

onde:

R = repetição (i= 1,2,3); T = tratamentos (j= 1,2,...,7); P = camada de solo (k = 1,2,3,4).

Experimento 2

Para este experimento, foram coletadas, na mesma data de coleta do Experimento 1, colunas de solo com diâmetro e altura de 10 cm, nas quais foi amostrada a camada de 0-5 cm do solo. Essas colunas foram levadas para laboratório, onde foi colocada uma fina rede plástica na extremidade inferior da coluna, para impedir que o solo caísse, em caso do mesmo se desprender das paredes do tubo de PVC. Para a coleta da solução lixiviada do solo, foi posto

na parte inferior da coluna um funil de plástico, colado na coluna de PVC, com cola quente siliconada. Este conjunto foi colocado sobre um suporte de madeira, que o mantinha suspenso. Da mesma forma que no experimento anterior, desde a coleta até o momento do início do experimento, as colunas receberam em torno de 50 ml de água destilada, a cada dois dias, a fim de evitar o secamento do solo e o seu desprendimento das paredes do vaso.

No dia 07/05/2007 foram aplicadas doses de esterco bovino (82% de umidade) correspondentes, em base seca, a 20, 40, 60 e 80 Mg ha⁻¹ na superfície do solo. Feito isso, os vasos foram levados para casa de vegetação, onde diariamente receberam 50 ml de água destilada, a fim de manter adequado teor de umidade.

As coletas de solução percolada do solo aconteceram a cada três dias, a partir da implantação do experimento, sendo feitas quatro coletas, totalizando 12 dias de experimento. A curta duração do experimento se justifica pelo fato dos AOBPM serem rapidamente degradados pela microbiota do solo, o que pode tornar o seu efeito sobre a dinâmica da correção da acidez do solo irrelevante (Moraes et al., 2007).

Para coleta da solução, as colunas foram levadas para laboratório, onde, em torno de seis horas antes do início da coleta da solução, foram adicionados em cada coluna 50 ml de água destilada, com a finalidade de diminuir a heterogeneidade dos teores de umidade entre as colunas e permitir o estabelecimento de um equilíbrio entre a fase sólida e a solução do solo. Passado esse período, foram adicionados mais 50 ml de água para coleta da solução percolada do solo. Em torno de uma hora após a essa adição, foram adicionados mais 50 ml de água, uma vez que na primeira tentativa não se obteve quantidade suficiente de solução para as análises a serem feitas. A solução percolada foi recolhida, após descartados os 5 ml inicialmente lixiviados, em recipientes de vidro de 20 ml, coletando-se em torno de 35 ml de solução em cada coluna (2 frascos por coluna).

Após a coleta da solução, as amostras foram levadas para o laboratório (*Illinois Waste Management and Research Center – WMRC*, Champaign-Illinois), onde foram feitas as análises dos AOBPM. Nesse laboratório as amostras foram mantidas em temperaturas em torno de 2 a 4°C até o processamento das análises. As amostras foram passadas em filtros de

disco de 0,45 μm em torno de uma semana após a chegada da primeira bateria de amostras no WMRC. As filtrações das duas amostragens seguintes foram feitas no mesmo dia da coleta ou no máximo um dia após. No intuito de se verificar a eficiência da filtração a 0,45 μm , foi feita a filtração de três amostras em cada coleta em um filtro do mesmo tipo, mas com diâmetro de poros de 0,22 μm , que pode promover esterilização das amostras, devido ao reduzido diâmetro dos poros. A determinação dos AOBPM foi feita utilizando técnicas de cromatografia iônica. As condições de trabalho do cromatógrafo foram as seguintes: coluna Dionex IonPak AS11 (4 x 250 mm) com uma coluna guarda Dionex IonPak AG11 (4 x 50 mm); auto-injetor Dionex modelo AS50; gerador de eluente Dionex EG40 utilizando um cartucho de KOH (Cartucho Dionex EluGen); bomba Dionex GS50; detector de condutividade (Dionex ED50); supressor Dionex ASRS Ultra II (4 mm); volume de injeção de 25 μL ; fluxo de 2 ml min^{-1} ; gradiente de concentração do eluente (KOH), tendo uma concentração inicial de 5 mM, do tempo 0,1 até 3,5 minutos a concentração mudou linearmente de 5 mM para 7,8 mM, dos 3,5 até os 4,5 minutos a concentração mudou linearmente de 7,8 para 25 mM, a qual foi mantida até o tempo de 8 minutos, quando então a concentração foi restabelecida para a concentração inicial no tempo de 8 até 8,5 minutos. Os instrumentos foram controlados usando um microcomputador dotado de um software cromatográfico da Dionex (Chromeleon v.6.80).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de quantidades de esterco e de aveia (maturação fisiológica) equivalentes a 26,2 e 5,3 Mg ha^{-1} , respectivamente, não afetaram a acidez do solo ao longo das colunas a partir da aplicação superficial de calcário (Tabela 1). Foi observado maior teor de Mg^{2+} trocável onde houve a aplicação de esterco, em relação aos demais tratamentos, apenas na camada de 0-2,5 cm. Nos demais atributos (pH, cálcio trocável e saturação por bases), apesar das tendências apresentadas na aplicação de esterco de serem numericamente maiores, eles não diferiram dos demais na camada superficial. Os teores numericamente maiores de Ca e Mg trocáveis, na camada superficial, podem ser devidos ao fato de que as fezes são a principal via

utilizada pelos animais para excreção desses cátions (Haynes & Williams, 1993).

TABELA 1. Atributos químicos de Argiaquol Mésico sob cultivo convencional de milho submetido à aplicação superficial de resíduo vegetal (Res.), calcário (Calc.) e esterco (Est.) e suas combinações, mantido por 90 dias em casa de vegetação.

Camada cm	Tratamentos							Média
	Res.	Res.+Calc.	Res.+Calc.+Est.	Est.	Est.+Calc.	Calc.	Testemunha	
----- pH-H ₂ O -----								
0-2,5	6,06ab ¹	6,01b	6,18ab	6,24a	6,11ab	6,08ab	6,07ab	6,11
2,5-5	5,86a	5,79a	5,77a	5,79a	5,72a	5,78a	5,86a	5,80
5-7,5	5,81a	5,78a	5,75a	5,77a	5,76a	5,67a	5,76a	5,76
7,5-10	5,87bcd	6,07a	5,96ab	5,74cde	5,88abc	5,64e	5,69de	5,83
Média	5,87	6,07	5,96	5,74	5,88	5,64	5,69	
----- Ca ²⁺ , cmol _c kg ⁻¹ -----								
0-2,5	5,70	5,48	6,56	6,02	5,61	5,60	5,69	5,81A ²
2,5-5	5,66	5,11	5,43	5,45	5,50	5,53	5,90	5,51C
5-7,5	5,41	5,14	5,59	5,48	5,65	5,68	6,04	5,57BC
7,5-10	5,65	5,52	5,56	5,64	5,98	6,04	6,00	5,77AB
Média	5,60B ³	5,31C	5,79AB	5,65AB	5,69AB	5,71AB	5,91A	
----- Mg ²⁺ , cmol _c kg ⁻¹ -----								
0-2,5	1,53bc	1,29e	1,45cd	1,76a	1,61b	1,42d	1,57b	1,52
2,5-5	1,39ab	1,19c	1,31b	1,35b	1,35b	1,34b	1,47a	1,34
5-7,5	1,33b	1,20c	1,36b	1,36b	1,37b	1,36b	1,49a	1,35
7,5-10	1,41cd	1,32d	1,37d	1,41bcd	1,48abc	1,51ab	1,54a	1,43
Média	1,41	1,25	1,37	1,47	1,45	1,41	1,52	
----- Saturação por Bases, % -----								
0-2,5	97,5abc	98,1ab	97,2abc	99,3a	98,2ab	94,7c	96,3bc	97,3
2,5-5	93,7a	93,0a	92,5a	91,5a	90,8a	91,5a	93,3a	92,3
5-7,5	94,7ab	93,3b	92,0bc	92,2bc	89,9c	93,2b	96,4a	93,1
7,5-10	93,7ab	96,3a	94,5ab	92,8b	94,0ab	93,4ab	93,3b	94,0
Média	94,9	95,2	94,1	93,9	93,2	93,2	94,8	

¹ Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si.

² Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna (médias de profundidade), não diferem entre si.

³ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula em itálico na linha (médias de tratamento), não diferem entre si.

Dessa forma, não se confirmou a hipótese de trabalho inicialmente formulada, de que AOBPM oriundos da degradação do esterco estariam formando complexos com produtos resultantes da dissolução do calcário, colaborando para o aumento dos teores desses cátions (Ca e Mg trocáveis) e dos valores de pH do solo em profundidade.

A não verificação dos efeitos da aplicação superficial nos atributos químicos em profundidade (Experimento 1) pode ser devido a vários fatores,

entre eles, a não ocorrência dos AOBPM no solo ou sua ocorrência em concentrações muito baixas, principalmente nos tratamentos com a aplicação de esterco, que é o principal alvo da investigação. Além disso, outro fator que pode estar colaborando para essa não ocorrência de efeitos é elevada saturação por bases do solo (>90%), como se pode observar no tratamento testemunha. Na tentativa de esclarecer essas dúvidas, foi conduzido o Experimento 2.

Os resultados obtidos nesse experimento indicam que não foi possível a identificação e a quantificação de AOBPM, como o málico, o tartárico, o fumárico, o oxálico e o cítrico (Tabelas 2 e 3), durante os 12 dias de condução do experimento, o que pode ser devido a uma série de fatores discutidos na seqüência.

Muitas amostras apresentaram um largo pico no mesmo tempo de retenção esperado para o ácido tartárico (Tabelas 2 e 3). Porém, isso parece se tratar de impurezas, além do pico do ácido orgânico, não permitindo estimar o nível de impureza baseando-se apenas nos tempos de retenção. Acredita-se tratar-se de impurezas, pois os picos são mais largos que aqueles dos padrões desse ácido. Tal fato foi comprovado pela análise de amostras *spiked* (um pequeno volume dos padrões concentrados é adicionado às amostras e a amostra original é comparada com a amostra *spiked*). A análise qualitativa de alguns picos *spiked* mostraram picos largos (devido às impurezas presentes) com um pico mais fino no meio (padrão de ácido tartárico *spiked* na amostra original). Como os teores do ácido orgânico são determinados pelo cálculo da área sob o pico, a presença do pico mais largo (impurezas) faz com que tenhamos uma superestimação dos teores reais. Sendo assim, o verdadeiro teor de ácido tartárico pode ser qualquer valor menor que os teores apresentados nas Tabelas 2 e 3.

TABELA 2. Teores de ácidos orgânicos de baixo peso molecular na solução percolada do solo, em três repetições, aos três e seis dias após a aplicação de doses de esterco bovino em um Argiaquol Mésico (Pana, IL).

Tratamento	Repetição	----- $\mu\text{g mL}^{-1}$ -----			
		Málico	Tartárico	Fumárico+Oxálico	Cítrico
----- Três dias após -----					
Testemunha	1	< 0,05	$\leq 1,1$	< 0,12	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 2,6$	< 0,12	< 0,05
	3	0,12	$\leq 1,2$	< 0,12	0,12
20 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 35,0$	< 0,12	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 30,0$	< 0,12	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 27,0$	< 0,12	< 0,05
40 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 36,0$	< 0,12	0,61
	2	< 0,05	$\leq 42,0$	< 0,12	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 28,0$	2,00	0,63
60 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 130,0$	< 0,12	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 130,0$	< 0,12	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 110,0$	< 0,12	< 0,05
80 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 210,0$	< 0,12	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 43,0$	< 0,12	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 23,0$	< 0,12	< 0,05
----- Seis dias após -----					
Testemunha	1	< 0,05	$\leq 0,50$	< 0,12	< 0,05
	2	0,15	$\leq 1,60$	< 0,12	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 0,50$	< 0,12	< 0,05
20 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 34,0$	< 0,12	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 8,10$	< 0,12	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 8,90$	< 0,12	< 0,05
40 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 20,0$	< 0,12	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 31,0$	< 0,12	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 45,0$	< 0,12	< 0,05
60 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 44,0$	< 0,12	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 84,0$	< 0,12	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 110,0$	< 0,12	< 0,05
80 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 150,0$	< 0,12	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 87,0$	< 0,12	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 140,0$	< 0,12	< 0,05

TABELA 3. Teores de ácidos orgânicos de baixo peso molecular na solução percolada do solo, em três repetições, aos nove e doze dias após a aplicação de doses de esterco bovino em um Argiaquol Mésico (Pana, IL).

Tratamento	Repetição	Málico Tratárico Fumárico+Oxálico Cítrico			
		----- $\mu\text{g mL}^{-1}$ -----			
----- Nove dias após -----					
Testemunha	1	< 0,05	$\leq 2,3$	< 0,10	< 0,05
	2	0,15	$\leq 2,1$	< 0,10	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 1,5$	< 0,10	< 0,05
20 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 11,0$	< 0,10	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 12,0$	< 0,10	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 3,0$	< 0,10	< 0,05
40 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 20,0$	< 0,10	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 34,0$	< 0,10	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 13,0$	1,00	< 0,05
60 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 14,0$	< 0,10	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 77,0$	< 0,10	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 65,0$	< 0,10	< 0,05
80 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 76,0$	< 0,10	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 30,0$	< 0,10	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 99,0$	< 0,10	< 0,05
----- Doze dias após -----					
Testemunha	1	< 0,05	$\leq 2,2$	< 0,10	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 2,5$	< 0,10	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 1,4$	< 0,10	< 0,05
20 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 9,7$	< 0,10	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 4,5$	0,55	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 3,4$	< 0,10	< 0,05
40 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 5,5$	< 0,10	< 0,05
	2	< 0,05	≤ 18	< 0,10	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 1,5$	< 0,10	< 0,05
60 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 8,1$	< 0,10	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 55,0$	< 0,10	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 32,0$	< 0,10	< 0,05
80 Mg ha ⁻¹	1	< 0,05	$\leq 51,0$	< 0,10	< 0,05
	2	< 0,05	$\leq 38,0$	< 0,10	< 0,05
	3	< 0,05	$\leq 98,0$	< 0,10	< 0,05

Quanto aos ácidos fumárico e oxálico, houve coeluição desses dois ácidos orgânicos, não sendo possível sua determinação de forma isolada. Com o detector de condutividade que foi utilizado, o fator de resposta para esses dois componentes foram próximos um ao outro e, por isso, os resultados são dados como teores de ácido fumárico + ácido oxálico, os quais têm boa acurácia. Como poucas amostras mostraram picos para esses dois

componentes e esses foram em baixas concentrações, o fato da coeluição desses dois compostos não representou grande problema na avaliação dos teores de AOBPM nas amostras.

Algumas amostras *spiked* mostraram muito baixa recuperação da quantidade de padrões dos ácidos orgânicos, adicionadas nas amostras originais. Pelo fato da quantidade de padrões adicionada nas amostras originais ser conhecida, o pico da amostra *spiked* deveria apresentar um acréscimo na proporção da quantidade adicionada. Se o pico aumenta exatamente na quantidade esperada, a recuperação seria de 100%, mostrando que teria sido possível recuperar toda a quantidade adicionada à amostra original. Tipicamente, são aceitos valores de recuperação dos padrões *spiked* entre 80-120%, sendo que freqüentemente os resultados são bem melhores do que isso. Porém, nas amostras analisadas a recuperação dos AOBPM adicionados ficou bem abaixo dos valores tipicamente observados, sendo que em algumas amostras a recuperação da quantidade *spiked* foi de 0%, indicando que não houve aumento nos picos das amostras *spiked*. Este fato indica que os ácidos orgânicos adicionados nas amostras *spiked* foram degradados enquanto as amostras aguardavam para serem analisadas. Na tentativa de contornar esse problema, foram preparadas novas amostras *spiked*, as quais foram analisadas pouco tempo após a adição dos padrões dos ácidos orgânicos. Os resultados obtidos após esse procedimento mostraram que, na maioria dos casos, a recuperação das quantidades *skipped* foi muito maior que as amostras inicialmente *spiked*, o que suporta a teoria da degradação dos AOBPM adicionados no primeiro conjunto de amostras, as quais aguardaram mais tempo para serem analisadas após a adição dos padrões.

Fato semelhante pode ter acontecido com as amostras originais, que ficaram estocadas em geladeira, a uma temperatura de 2 a 4°C, por um período em torno de 12 dias até serem analisadas, o que pode ter propiciado a degradação, em algum grau, dos AOBPM presentes nas amostras, tornando praticamente impossível a sua detecção.

Acredita-se que essa degradação possa ter sido causada por microrganismos presentes na solução percolada do solo, mesmo após as amostras terem sido filtradas em membrana de 0,45 µm. Na comparação entre

os filtros de 0,45 μm e 0,22 μm , se verificou que a utilização dos filtros com menor diâmetro não teve efeito na determinação dos AOBPM, com exceção dos picos do ácido tartárico,. A passagem da solução no filtro de 0,22 μm diminui os picos impuros, variando de 45 a mais de 90%, aumentando a eficiência dessa filtragem com o inverso do tempo de espera das amostras para serem analisadas, sendo observados valores maiores que 90% nas amostras filtradas no momento em que chegaram ao laboratório.

CONCLUSÕES

A adição de esterco bovino e resíduos de aveia não afeta o efeito corretivo do calcário em profundidade a partir da sua aplicação superficial.

O ácido tartárico é o único AOBPM que se encontra na solução percolada do solo, porém não foi possível a mensuração exata da sua quantidade, devido à ocorrência de impurezas que apresentam o mesmo tempo de retenção desse composto.

Os teores dos ácidos málico, fumárico, oxálico e cítrico, presentes na solução percolada do solo são menores do que o limite de detecção dos instrumentos utilizados para tal. Isso pode ser devido ao fato de ter havido degradação desses AOBPM ou pela ocorrência dos mesmos em baixos teores no esterco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, A. S. **Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de água na superfície**. 2002. 107 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.4, p.695-702, 2001.

BAZIRAMAKENGA, R.; SIMARD, R. R. Low molecular weight aliphatic acid contents of composted manures. **Journal of Environmental Quality**, Madison, WI, v.27, n.3, p.557-561, 1998.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso

aplicados na superfície em sistemas de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, n.1, p.27-34, 1998.

CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.2, p.275-286, 2003.

CASSOL, L. C. **Relação solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. 2003. 157f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FRANCHINI, J. C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.533-542, 1999a.

FRANCHINI, J. C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MALAVOLTA, E. Dynamic of ions in acid soil leached with green manure residues extracts and pure solutions of organic acids. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2267-2276, 1999b.

FRANCHINI, J. C.; BORKERT, C. M.; FERREIRA, M. M.; GAUDÊNCIO, C. A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.459-467, 2000.

GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J. P. C.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.2, p.283-290, 2003.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanism of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Revision Plant Physiology Plant Molecular Biology**, Palo Alto, CA, v.46, n.1, p.237-260, 1995.

MA, J. F.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organics acids. **TRENDS in Plant Science**, Londres, v.6, n.6, p.273-278, 2001.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.411-416, 1993.

MORAES, M. F.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; COSCIONE, A. R. Ion mobility in acid soils with surface application of lime, organic acid and crop residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.4, p.673-684, 2007.

PETRERE, C.; ANGHINONI, I. Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.4, p.885-895, 2001.

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.675-684, 1998.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; XAVIER, F. M. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.2, p.263-268, 2000a.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E. C.; GATIBONI, L. C. Alterações de atributos químicos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.4, p.797-805, 2000b.

WRIGHT, R. J.; HERN, J. L.; BALIGAR, V. C.; BENNETT, O. L. The effect of surface applied soil amendments on barley root growth in acid subsoil. **Communication in Soil Science Plant Analysis**, New York, NY, v.16, n.2, p.179-192, 1985.