

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

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E RENDIMENTO DE GRÃOS NUM  
ARGISSOLO EM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO**

**Letícia Sequinatto  
(Tese de Doutorado)**

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

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E RENDIMENTO DE GRÃOS NUM  
ARGISSOLO EM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO**

LETÍCIA SEQUINATTO  
Engenheira-Agrônoma (UFSM)  
Mestre em Ciência do Solo (UFSM)

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

Porto Alegre (RS) Brasil  
Maio de 2010





***Aos meus pais, CLÓVIS E NOELI,  
por todo o amor, apoio, compreensão  
e por serem o alicerce da minha caminhada,  
DEDICO este trabalho.***

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter-me permitido aqui chegar;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade obtida de realização do curso de Doutorado;

Aos professores e orientadores Carlos Ricardo Trein e Renato Levien, agradeço por todos os conhecimentos e ensinamentos que me foram passados, pela dedicação na discussão e realização dos trabalhos e pela amizade;

Ao professor José Miguel Reichert pela co-orientação, ensinamentos, sugestões e amizade;

Aos professores que contribuíram para a minha formação no Doutorado, em especial ao grande amigo Neroli Pedro Cogo, a quem tenho profunda admiração como profissional e ser humano;

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos;

Aos meus pais Clóvis e Noeli, os quais nunca mediram esforços em seguir juntos na minha jornada, e ao meu irmão Luciano por todo o carinho;

Aos meus amados tios Elói e Olinda. Não possuo palavras para explicar o quão importante é o carinho que recebo de vocês;

Aos colegas, amigos e companheiros de trabalho, e de forma bastante especial ao Michael, Jonatan, Sidi e Osmar, e aos demais, Debiasi, Grazi, Aninha, Diane, Felipe, Guert, Ricardo e Aramis. À todos vocês, os meus sinceros votos de agradecimento, por todas as vezes que, sem medir esforços, contribuíram na realização desse trabalho e pela amizade;

Às grandes amigas, irmãs de coração e colegas de Curso, Chris e Dani. A gente sabe o quanto a amizade é importante em todos os momentos de nossas vidas;

A todos os meus amigos e colegas de curso, e de uma maneira muito especial e carinhosa a Juliana, Fabi, Marquel, Sérgio, Flávio, André, Marcos, Ândrea, Felipe, Tati, Jeane, Paulinha, Ângela, Rosele e Lula.

Obrigada pela amizade e pelos momentos compartilhados;

Ao grande amigo e Secretário do Departamento de Solos, Paulo;

A todos os amigos e amigas que fazem parte do meu cotidiano; todas pessoas importantes na minha vida, que estiveram ao meu lado proporcionando-me muitos momentos de alegria, felicidade e descontração;

Ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria, e às pessoas a ele ligadas (professores, alunos e funcionários), as quais possibilitaram a realização dos trabalhos, em especial a Mayra, pela dedicação nas análises realizadas, e ao Kaiser, pela valiosa amizade, discussões e ajuda;

À Estação Experimental Agronômica da UFRGS e aos funcionários Ozébio e Celso (EEA/UFRGS) pela ajuda no experimento de campo; ao Adão (Laboratório de Química), pelas determinações laboratoriais; ao Jader (Secretário do PPGCS), pela dedicação e competência ao trabalho;

Ao professor Gustavo Merten pela possibilidade obtida na utilização do Laboratório de Sedimentos do IPH para a realização de análises.

A todos vocês, meu MUITO OBRIGADA.

# QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E RENDIMENTO DE GRÃOS NUM ARGISSOLO EM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO <sup>1/</sup>

Autor: Letícia Sequinatto

Orientador: Prof. Dr. Renato Levien

## RESUMO

A recuperação física de solos degradados pela compactação, atingindo um estado de qualidade física adequada, é fundamental para a produção agrícola sustentável. A avaliação de parâmetros físicos, no tempo, é essencial para indicar a qualidade ou degradação do solo decorrente das ações agrícolas de manejo. O objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência de alternativas integradas de manejo do solo para a recuperação física, bem como o tempo necessário à obtenção de qualidade adequada. Para isso, vem sendo conduzido um experimento, desde 2002, em Eldorado do Sul (RS), sobre um Argissolo Vermelho, franco-argilo-arenoso, caracterizado por um elevado grau de compactação inicial e que se constituía em um campo natural degradado. Os tratamentos, manejados sob semeadura direta, englobaram três coberturas do solo no inverno (pousio, aveia preta + ervilhaca e nabo forrageiro), duas profundidades de atuação da haste sulcadora de adubo da semeadora e três condições de tráfego (tráfego de rodados de trator, colhedora e sem tráfego). No verão, semeia-se milho e soja, em rotação anual. Independentemente das coberturas de inverno, a conversão do campo natural degradado a um sistema de produção de grãos, em semeadura direta, reestruturou positivamente o solo, atingindo qualidade física para desempenhar adequadamente as suas funções, em sete anos. Isso foi possível devido à utilização integrada do tráfego controlado e da atuação da haste sulcadora da semeadora em maiores profundidades. Houve recuperação e evolução da estrutura do solo, perante o incremento dos teores de matéria orgânica (e de suas frações), aumento da porosidade e melhor distribuição dos poros e a diminuição da densidade do solo, no tempo. Esses parâmetros influenciaram o comportamento físico-hídrico do solo. A maior retenção de água no solo deu-se na camada superficial, em altos potenciais matriciais. Em menores potenciais matriciais de água no solo, houve maior retenção e água disponível às plantas, no solo trafegado. O índice S indicou melhor qualidade do solo na camada superficial e no solo não trafegado, sendo que a presença de poros grandes neste, aumentou a permeabilidade ao ar. O rendimento do milho e da soja foi maior nos tratamentos com plantas de cobertura de solo no inverno, sem ser afetado pela condição de tráfego e pelas profundidades de atuação da haste. O sistema de manejo do solo adotado foi considerado sustentável, uma vez que atuou conservando os recursos naturais (solo e água), recuperou as funções primordiais do solo e atingiu alto rendimento de culturas produtoras de grãos.

<sup>1/</sup> 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. (141 p.) Maio, 2010. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

# SOIL PHYSICAL QUALITY AND YIELD OF CROPS ON A PALEUDULT IN RECOVERY PROCESS <sup>1/</sup>

Author: Leticia Sequinatto  
Advisor: Prof. Dr. Renato Levien

## ABSTRACT

The physical recovery of soils degraded by compaction, reaching a state of adequate physical quality, is indispensable for the sustainable agricultural production. The evaluation of physical parameters, in due course, is essential to indicate the quality or soil degradation resulting from agricultural actions of management. The objective was to evaluate the efficiency of integrated alternatives of soil management for physical recovery, also the required time to obtain the appropriate quality. For this, an experiment has been conducted since 2002, in Eldorado do Sul (RS) on a Paleudult, sandy clay loam, characterized by a high degree of initial compaction and that was in degraded native grassland. The treatments, managed under no-tillage, have involved three winter cover crops (fallow, black oats + vetch, oilseed radish – *Raphanus Sativus* L.), two driller chisel-type furrow opener action depths and three traffic conditions (tractor wheel traffic, harvester and without traffic). In summer corn and soybean are sown in annual rotation. Regardless of winter cover crops, the conversion of degraded native grassland to a grain production system, under no-tillage, restructured positively the soil, reaching a physical quality to perform adequately their roles in seven years. This was possible before the integrated use of controlled traffic and the performance of higher furrow opener working depths. There was a positive development of soil structure, given the increase in organic matter content (and its fractions), the porosity increase and a better distribution of pores and reduction of soil density, in time. These parameters influenced the physico-hydric soil behavior. The greater water retention occurred in the surface soil layer, in higher potentials. At lower potentials, there was greater retention and plant available water, in trafficked soil. The index S indicated better soil quality in the surface soil layer and in the no-trafficked soil, where the presence of large pores increased the permeability to air. Under favorable water conditions, the yield of corn and soybeans were higher for winter cover crops, without being affected by traffic condition and the depths of action of the furrow opener. The soil management system adopted was considered sustainable as it appeared conserving natural resources (soil and water), recovered the essential functions of the soil and reached good yield of grain crops.

<sup>1/</sup> 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. (141 p.) May, 2010. Financial support by CNPq.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 CAPÍTULO I. CENÁRIO ATUAL DO CONHECIMENTO EM RECUPERAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DO SOLO .....</b>	<b>5</b>
2.1 Qualidade do solo .....	5
2.2 Recuperação de solo degradado visando a qualidade física .....	7
2.2.1 Solo degradado pela compactação .....	7
2.2.2 Manejo de solo para a recuperação física .....	9
2.3 Indicadores de qualidade do solo.....	16
2.3.1 Matéria orgânica do solo e suas frações .....	16
2.3.2 Densidade e porosidade do solo .....	19
2.3.3 Retenção de água no solo .....	21
2.3.4 Índice S.....	22
2.3.5 Permeabilidade do solo ao ar .....	23
2.4 Considerações .....	25
<b>3 CAPÍTULO II. EVOLUÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMA AGRÍCOLA PARA RECUPERAÇÃO DE SOLO DEGRADADO .....</b>	<b>27</b>
3.1 Introdução .....	27
3.2 Material e Métodos.....	30
3.2.1. A área experimental.....	30
3.2.1.1 Localização e histórico da área experimental .....	30
3.2.1.2 Tratamentos para o manejo do solo .....	33
3.2.1.3 Implantação e condução das culturas de inverno e verão .....	34
3.2.2 Teor de matéria orgânica do solo e respectivas frações granulométricas .....	36
3.2.3 Densidade e porosidade do solo .....	37
3.2.4 Análise estatística dos dados .....	38
3.3 Resultados e Discussão .....	39
3.3.1 Massa seca da parte aérea das coberturas de inverno .....	39
3.3.2 Teor de matéria orgânica do solo e respectivas frações	

granulométricas .....	41
3.3.3 Densidade e porosidade do solo .....	51
3.4 Conclusões.....	61
<b>4. CAPÍTULO III. COMPORTAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DE UM ARGISSOLO SUBMETIDO A PRÁTICAS DE MANEJO MELHORADORAS DA SUA ESTRUTURA.....</b>	<b>63</b>
4.1 Introdução .....	63
4.2 Material e Métodos .....	66
4.3 Resultados e Discussão .....	71
4.3.1 Curva de retenção de água no solo .....	71
4.3.2 Índice S.....	79
4.3.3 Permeabilidade do solo ao ar .....	86
4.4 Conclusões.....	91
<b>5 CAPÍTULO IV. RENDIMENTO DO MILHO E DA SOJA E RELAÇÕES COM A QUALIDADE FÍSICA DE UM ARGISSOLO SUBMETIDO A PRÁTICAS DE MANEJO MELHORADORAS DE SUA ESTRUTURA.....</b>	<b>93</b>
5.1 Introdução .....	93
5.2 Material e Métodos .....	96
5.3 Resultados e Discussão .....	97
5.3.1 Rendimento da cultura da soja .....	99
5.3.2 Rendimento da cultura do milho .....	104
5.4 Conclusões.....	108
<b>6 CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>110</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>
<b>8 APÊNDICES .....</b>	<b>134</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química do solo antes da instalação do experimento (Beutler, 2005). .....	30
Tabela 2. Caracterização física do solo antes da instalação do experimento (adaptada de Beutler, 2005). .....	31
Tabela 3. Densidade, porosidade total, macroporosidade (MAC) e microporosidade do solo (MIC), avaliadas em novembro de 2006, em função do tráfego de rodados de máquinas (Debiasi, 2008). .....	32
Tabela 4. Produção de massa seca da parte aérea das culturas de cobertura de solo no inverno.....	40
Tabela 5. Teor de matéria orgânica do solo (MOS) em função da cultura de cobertura de inverno no solo, da cultura de verão antecessora a amostragem e da camada de avaliação (junho/2009). .....	42
Tabela 6. Teor de matéria orgânica do solo (MOS) em função da cobertura de inverno e da camada avaliada, em junho dos anos de 2006 e de 2009. ....	44
Tabela 7. Matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOM) em função da cobertura de solo no inverno, da cultura de verão antecessora a amostragem e da camada de avaliação (junho/2009). ....	48
Tabela 8. Matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOM) em função da cobertura de solo no inverno, em junho dos anos de 2006 e de 2009. ....	50
Tabela 9. Densidade do solo (Ds) em função da cobertura de solo no inverno, do tráfego e da camada de avaliação (dezembro, 2008). .....	51
Tabela 10. Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo em função da profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora-adubadora (dezembro, 2008). .....	54

Tabela 11. Porosidade total do solo em função da cobertura de inverno, do tráfego e da camada de avaliação (dezembro, 2008).....	56
Tabela 12. Macroporosidade do solo em função da cobertura de inverno, do tráfego e da camada de avaliação (dezembro, 2008).....	57
Tabela 13. Microporosidade do solo em função da cobertura de inverno, do tráfego e da camada de avaliação (dezembro, 2008).....	58
Tabela 14. Densidade do solo (Ds) e matéria orgânica do solo (MOS) em função da cobertura de inverno, do tráfego e da camada de avaliação.....	71
Tabela 15. Distribuição do diâmetro de poros ( $\mu\text{m}$ ), porosidade total (Pt), macroporosidade (MAC) e microporosidade (MIC), em diferentes condições de tráfego, cobertura de inverno e camadas de solo.....	75
Tabela 16. Conteúdo de água no solo na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível às plantas (ADP) para os sistemas de manejo incluindo diferentes coberturas de solo no inverno e situações de tráfego, em diferentes camadas de solo.....	77
Tabela 17. Índice S para o Argissolo em função do manejo com diferentes condições de tráfego e cobertura de solo no inverno, calculado a partir das curvas de retenção de água.....	79
Tabela 18. Permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) em função do tráfego e da cobertura de solo no inverno em diferentes tensões de água e camadas de solo.....	88
Tabela 19. Efeito da cobertura do solo no inverno sobre o rendimento de grãos cultura da soja. Safra 2008/2009.....	99
Tabela 20. Efeito da condição de tráfego (rodados do trator, rodados da colhedora e solo não trafegado) sobre o rendimento de grãos da cultura da soja. Safra 2008/2009.....	102
Tabela 21. Efeito da profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora-adubadora sobre o rendimento de grãos da cultura da soja. Safra	

2008/2009.....	103
Tabela 22. Efeito da cobertura do solo no inverno sobre o rendimento de grãos da cultura do milho. Safra 2008/2009. ....	105
Tabela 23. Efeito da condição de tráfego (rodados do trator, rodados da colhedora e solo não trafegado) sobre o rendimento de grãos da cultura do milho. Safra 2008/2009.....	106
Tabela 24. Efeito da profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora-adubadora sobre o rendimento de grãos da cultura do milho. Safra 2008/2009.....	107

## RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1. Representação esquemática de uma parcela experimental subdividida, em função da profundidade de atuação da haste sulcadora, e as linhas de plantio (L1... L10) coincidentes com o tráfego de colhedora (RC) ou trator (RT) , ou não trafegadas (NT).....34
- Figura 2. Coleta de amostras indeformadas de solo para as análises físicas. .38
- Figura 3. Evolução, com o tempo, dos teores de matéria orgânica do solo e de suas frações, em duas camadas de solo (0,0 – 0,06 m e 0,10 – 0,15 m).....60
- Figura 4. Evolução, com o tempo, da densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade do solo, em duas situações de tráfego de rodados de maquinários (com e sem) e em duas camadas de solo (0,0 – 0,06 m e 0,10 – 0,15 m).....61
- Figura 5. Permeâmetro utilizado para determinação da permeabilidade do ar no solo ( $K_a$ ) em amostras de estrutura preservada. Fonte: VOSSBRINK (2004). Adaptado por Brandt (2009). .....69
- Figura 6. Curvas de retenção de água, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten, para diferentes condições de tráfego (A1, A2 e A3) e cobertura de inverno (B1, B2 e B3), em três camadas de solo. \*, <sup>ns</sup> - Significativa e não significativa respectivamente, pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro. 73
- Figura 7. Comportamento do índice S em função da densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ ), nas camadas de 0,02 – 0,05m, 0,10 – 0,13 m e de 0,10 – 0,23 m. \* representa que o modelo ajustado é significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F.....81
- Figura 8. Comportamento do índice S em função porosidade total ( $P_t, m^3\ m^{-3}$ ) e da macroporosidade do solo ( $MAC, m^3\ m^{-3}$ ). \* representa que o modelo ajustado é significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F. ....82
- Figura 9. Comportamento do índice S em função da matéria orgânica do solo ( $MOS, g\ kg^{-1}$ ). \* representa que o modelo ajustado é significativo a  $p \leq 0,01$  pelo

teste F.....	84
Figura 10. Comportamento da água disponível as plantas (ADP, kg kg <sup>-1</sup> ) em função do índice S. * o modelo ajustado é significativo a p≤0,01 pelo teste F.	85
Figura 11. Relação entre o espaço aéreo ( $\epsilon_a$ ) e a permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) em diferentes tensões (-6 kPa, -10 kPa, -33 kPa, -100 kPa).....	90
Figura 12. Precipitação, temperatura média do ar e evapotranspiração potencial referentes ao período de desenvolvimento das culturas de verão, o milho e a soja, na safra 2008/2009. Fonte: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia/UFRGS. ....	98

## RELAÇÃO DE APÊNDICES

Apêndice 1. Croqui do experimento, safra 2007 a 2008. ....	135
Apêndice 2. Croqui do experimento, safra 2008 a 2009. ....	136
Apêndice 3. Croqui do experimento, safra 2009 a 2010. ....	137
Apêndice 4. Teores de nutrientes e pH em água do solo da área experimental, em função da cobertura de inverno e da época de avaliação.....	138
Apêndice 5. Permeabilidade do solo ao ar (Ka) em função da cobertura de inverno e do tráfego em diferentes tensões de água no solo, na camada de 0,02 – 0,05 m. ....	139
Apêndice 6. Permeabilidade do solo ao ar (Ka) em função da cobertura de inverno e do tráfego em diferentes tensões de água no solo, na camada de 0,10 – 0,13 m. ....	140
Apêndice 7. Permeabilidade do solo ao ar (Ka) em função da cobertura de inverno e do tráfego em diferentes tensões de água no solo, na camada de 0,20 – 0,23 m. ....	141

## 1 INTRODUÇÃO

Há alguns anos, tornou-se preocupante o fato de que a utilização antrópica do solo, com revolvimento excessivo através das operações agrícolas, carreava, via erosão hídrica, grande quantidade de solo e fertilizantes para fora das lavouras, empobrecendo não somente o solo, mas também o ecossistema. Com o surgimento do sistema de manejo do solo utilizando a semeadura direta (SD), onde há baixo revolvimento, houve redução das perdas de solo. No entanto, pouco se conhecia acerca do dinamismo existente na atmosfera do solo, dos processos físicos, químicos e biológicos ocorrentes, e influenciados por esse novo sistema. A partir da década de 90, pelo movimento investigativo da comunidade científica, começou-se a busca pela qualidade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas, em especial a SD, com vistas à conservação de todos os recursos do ecossistema.

Perante as pesquisas promissoras desenvolvidas pela comunidade científica, concluiu-se que a SD melhora consideravelmente a estrutura de solo degradada, no decorrer do tempo. Em contrapartida, com a SD, também surgiram problemas como a compactação dos solos induzida pelo tráfego de máquinas agrícolas e o não revolvimento do solo. A compactação é uma forma degradativa dos solos, não exclusivamente causada pelo tráfego de maquinário agrícola, mas também originada pelo pisoteio animal, em sistemas pecuaristas. Tanto o trânsito de máquinas quanto o de animais nas lavouras gera níveis de compactação maiores e mais prejudiciais, quando ocorrem com condições inadequadas de conteúdo de água no solo. É preocupante o fato, já que a compactação constitui-se em um processo de redução de volume de um solo, com implicações sobre a movimentação de água e de gases no seu

interior e, conseqüentemente, sobre o desenvolvimento de plantas e rendimento de culturas.

A recuperação da estrutura física de solos degradados e o controle da compactação em SD têm relação direta com as práticas de manejo adotadas dentro do sistema. Estas práticas de manejo são agregadas à SD, e, se promovem condições físicas adequadas para o desenvolvimento radicular e da parte aérea de plantas, normalmente concorrem para que o solo melhore sua qualidade física.

Dessa forma, surgem indagações acerca de que medidas adotar para alcançar a desejável qualidade física do solo, dentro de sistemas de manejo que utilizam a SD, promovendo além da recuperação da estrutura de solo degradada, a redução dos problemas ocasionados pela compactação, oriunda do tráfego agrícola. Uma das medidas é a utilização de plantas de cobertura de inverno. São inúmeros os trabalhos realizados pela comunidade científica mostrando que as raízes dessas espécies atuam melhorando a estrutura de solo, agindo principalmente sobre a agregação. Outrossim, são responsáveis pelo incremento nos teores de matéria orgânica do solo, tanto devido as suas raízes, quanto à parte aérea em decomposição sobre o solo. Os resíduos vegetais ainda agem como proteção física, evitando ou minimizando as perdas de solo por erosão hídrica, além de atenuar as cargas aplicadas pelos rodados agrícolas. Outras opções de manejo do solo incluem a utilização de técnicas como o uso do tráfego controlado, onde isolam-se áreas trafegadas daquelas não trafegadas, e o uso de hastes sulcadoras de semeadoras para a deposição de adubo, trabalhando a profundidades maiores do que 0,1 m. Isso pode acelerar o processo de recuperação do solo e minimizar os efeitos da compactação pelo tráfego agrícola sobre as culturas de verão.

No entanto, ainda não há estudos que indiquem qual o tempo necessário para a recuperação de um solo degradado fisicamente, atingindo um estado físico estável e com qualidade, pelo uso continuado do manejo de solo em SD, incluindo plantas de cobertura, o tráfego controlado e o uso de hastes sulcadoras atuando a maiores profundidades. Por outro lado, há resultados que indicam que numa escala evolutiva de tempo há melhora de

diversos parâmetros de solo e, conseqüentemente, do desenvolvimento e rendimento das culturas.

Perante isso, a hipótese geral desta pesquisa é de que um Argissolo, degradado fisicamente, passando a receber uso continuado de manejo de solo com SD, aliado à utilização de plantas de cobertura de inverno, tráfego controlado e maior profundidade de atuação das hastes sulcadoras da semeadora, tem a capacidade de estar recuperado em um período de tempo inferior a dez anos. Isso representa que, ao final desse período, o solo tem qualidade física adequada para desempenhar as suas funções na obtenção da produção agrícola sustentável do ponto de vista social, econômico e ambiental.

Um breve histórico da área experimental de desenvolvimento da presente pesquisa, mostra que a degradação física do solo, classificado como um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico, deveu-se primordialmente ao revolvimento intenso do solo através da aração, gradagem e enxada rotativa, durante vários anos, resultando em desestruturação. Posteriormente (década de 90) a área passou a ser utilizada como campo natural com pastoreio intensivo até o ano de 2002, quando se deu início a execução da presente pesquisa. Naquele momento, o cenário encontrado era de alta degradação física, devida principalmente à compactação. Mesmo apresentando esse problema, a conversão do campo degradado para SD foi feita diretamente, sem ocorrer a mobilização pela escarificação, objetivando avaliar o tempo necessário para que houvesse a recuperação física do solo.

Desde a instalação do experimento até o presente momento, foram realizados dois trabalhos de tese. O primeiro deles por Beutler (2005) apresentando a caracterização física inicial do solo degradado, e durante o período de condução experimental deteve-se mais nos atributos relacionados a solo-máquina. Na sequência, Debiasi (2008) estudou alguns aspectos físicos de solo que foram melhorados, atribuindo esse efeito principalmente às plantas de cobertura de solo no inverno e ao tráfego controlado. Com os resultados encontrados, este autor evidencia que possivelmente o solo, após quatro anos de aplicação dos tratamentos, tenha atingido um estado físico estável, em função do manejo.

Na perspectiva de que a estrutura física desse solo continue sendo melhorada no decorrer do tempo, a proposta da presente pesquisa objetivou

deter-se mais profundamente em estudos sobre indicadores físico-hídricos de qualidade física e a repercussão do estado atual do solo sobre o rendimento de culturas. Os estudos farão referência a indicadores de qualidade do solo, tais como a matéria orgânica e suas frações particulada e associada aos minerais, a porosidade e a densidade do solo, bem como sua evolução até o cenário atual; a água no solo, através da curva de retenção; o índice S; e ao fluxo de ar no solo. Ao final, buscar-se-á provar a hipótese, já definida anteriormente, e entender melhor os processos físicos ocorrentes, os quais agindo conjuntamente no complexo e dinâmico ambiente do solo, tornaram possível a recuperação da estrutura do solo, na área experimental, ao longo do tempo.

## **2 CAPÍTULO I. CENÁRIO ATUAL DO CONHECIMENTO EM RECUPERAÇÃO E QUALIDADE FÍSICA DO SOLO**

### **2.1 Qualidade do solo**

A qualidade do solo, almejada em sistemas agrícolas sustentáveis, tem recebido crescente atenção na pesquisa em ciência do solo. Importante, não somente por representar as condições físicas, químicas e biológicas do solo, mas também porque está intimamente relacionada ao desenvolvimento de plantas e à conservação dos recursos naturais. Perante isso, diversos conceitos de qualidade do solo estão presentes na literatura, onde um dos mais consagrados é o de Karlen et al. (1997) referindo-se como sendo a capacidade do solo em desempenhar ou não adequadamente as suas funções. Funções essas que Reichert et al. (2003) enumerou resumidamente em três: servir como meio para o crescimento de plantas, exercer regulação e participação do fluxo de massa e energia no ambiente e atuar como filtro ambiental.

Intensificadas as discussões sobre a qualidade do solo, a partir de 1990, a preocupação da comunidade científica é relacionar a mesma à sustentabilidade agrícola, levando em consideração o fator tempo. Nesse sentido, para o Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a qualidade do solo é conceituada como a capacidade do solo em desempenhar as suas funções no momento atual e a preservação dessas funções para uso futuro (USDA – NRCS, 2008). Para isso, é fundamental respeitar a capacidade de uso das terras e proporcionar manejo adequado aos solos explorados.

A maioria dos estudos em qualidade do solo está centrada na

identificação de um parâmetro capaz de servir como indicador. Esse indicador, fundamentalmente, tem o intuito de avaliar o uso de práticas de manejo do solo, monitorando no tempo as mudanças nas propriedades e nos processos do solo, na sustentabilidade e na qualidade ambiental (Doran & Parkin, 1994; Doran, 1997; Karlen et al., 2001). No sentido sistêmico, um indicador de qualidade do solo deve descrever a maioria dos processos ecológicos do solo (Doran, 1997). No entanto, é visível a dificuldade em se estabelecer um indicador, ou como colocado por Reinert et al. (2006), um parâmetro que inclua as propriedades físicas do solo e que se relacione com o crescimento e desenvolvimento de plantas. Além do mais, a origem, tal como o uso dos solos, não são fatores homogêneos. Dessa forma, fica clara a dificuldade de se ter uma resposta, ao crescimento e desenvolvimento de plantas, relacionando-a a um único parâmetro, seja ele físico, químico ou biológico, já que todos agem conjuntamente no dinâmico ambiente do solo.

Em se tratando de qualidade do solo, várias linhas de pesquisa vêm sendo conduzidas. Uma das linhas de pesquisa busca identificar os melhores indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, e teve como pioneiros os pesquisadores Doran & Parkin (1994) e Larson & Pierce (1994). Outra linha de pesquisa trata a matéria orgânica como o melhor indicador de qualidade de solo (Karlen et al., 1992; Lal, 1997; Seybold et al., 1998; Pulleman et al., 2000; Carter, 2001; Franzluebbers, 2002; Shukla et al., 2006). Por último, uma linha de pesquisa em qualidade do solo alternativa, de abordagem sistêmica, a qual analisa processos no sistema solo-planta e não busca os melhores atributos de solo (Addiscott, 1995; Vezzani, 2001).

Fazendo inferência à primeira linha de pesquisa citada anteriormente, a qualidade do solo avaliada sob o ponto de vista físico, busca integrar processos ocorrentes no dinâmico ambiente do sistema solo. Streck (2007) salienta que a qualidade física apresenta grande influência sobre os processos químicos e biológicos do solo e, por consequência, tem papel central em estudos sobre a qualidade dos solos. A qualidade física do solo engloba fatores relacionados à estrutura do solo, definida por Brewer e Sleeman (1960) como sendo a condição física expressa pela dimensão, forma e arranjo das partículas sólidas e dos poros a ela associados. Uma estrutura do solo adequada às plantas é aquela que, além de ser estável, propicia a existência

de poros para o armazenamento de água disponível às plantas, para a infiltração e transmissão de água e para a aeração, bem como não apresente resistência ao crescimento das raízes (Oades, 1984).

Os estudos sobre a qualidade física do solo têm sido relacionados aos sistemas de manejo do solo. Nesse sentido, Fliebbach et al. (2007) citam que nenhuma prática isolada de manejo aumentará a qualidade do solo, mas sim estratégias integradas. Dessa forma, tem sido amplo o número de estudos que relacionam manejos de solo com a semeadura direta (SD). Em termos práticos, a adoção desse sistema normalmente ocorre depois que o solo já apresenta problemas, especialmente de degradação estrutural (Braidá, 2004). Nessas condições, a acomodação natural das partículas desestruturadas, associada à falta de matéria orgânica e de resíduos vegetais na superfície do solo e ao tráfego de máquinas e animais, resulta, normalmente, em compactação em níveis prejudiciais às plantas (Braidá, 2004). Assim, é função da pesquisa encontrar o melhor sistema de manejo de solo e o tempo necessário para que solos degradados atinjam adequada qualidade física, desempenhando as suas funções perante a produção agrícola e à conservação do ambiente.

## **2.2 Recuperação de solo degradado visando a qualidade física**

O solo é a base fundamental dos sistemas de produção agrícola. Alteração nas suas propriedades e que afetam a sustentação do crescimento vegetal, e, conseqüentemente, o rendimento de culturas, causam impactos diretos e negativos para o produtor rural e indiretos para as comunidades urbanas. Então, é necessidade premente buscar sistemas agrícolas que sejam sustentáveis ao longo do tempo, de forma que melhorem e/ou mantenham uma estrutura física de solo capaz de exercer as suas funções para o crescimento e ancoragem das raízes, bem como favorecer o suprimento de água, nutrientes e oxigênio (Blainski et al., 2008).

### **2.2.1 Solo degradado pela compactação**

As propriedades físicas de um solo, ou as suas modificações, são

decorrentes, entre outros, do manejo do solo. Referindo-se a manejo do solo, infere-se um número grande de fatores que o tornam mais ou menos favorável ao desenvolvimento das plantas, sem causar prejuízos ao ambiente. A compactação do solo, ocasionada pelo manejo inadequado, que normalmente é resultante do pisoteio animal ou do tráfego de máquinas, é a responsável por modificar as propriedades físicas do solo, com reflexos diretos e negativos sobre o desenvolvimento de plantas. Seja qual for a origem da compactação, o fato é que atinge níveis tão mais altos e negativos às funções primordiais do solo, quanto for o desrespeito à capacidade de suporte do solo e/ou ao uso do mesmo em condições desfavoráveis de conteúdo de água presente, ocasionando grandes deformações de solo. Deformações essas que podem ser irreversíveis. Diante disso, em solos com algum grau de compactação, torna-se necessária a adoção de medidas capazes de reverter este processo e, assim, minimizar os efeitos negativos por ela ocasionados.

Como já salientado, a compactação modifica as propriedades físicas do solo, afetando o desempenho de suas funções. Hillel (1982) define a compactação do solo como sendo um processo de redução de volume (compressão) de um solo não saturado por causas de natureza antropogênica, o qual se encontra relacionado à expulsão de ar. Segundo o mesmo autor, a compressão de um solo saturado é denominada de consolidação, e envolve a saída de água. Assim, a velocidade com a qual um solo se compacta ou consolida depende da permeabilidade do mesmo à água e ao ar.

O aumento da compactação normalmente implica em aumento da densidade do solo, e isso tem influência sobre diversos processos ocorrentes no solo. O aumento da densidade do solo altera a sua porosidade e, conseqüentemente, a quantidade e continuidade de poros, o que interfere sobre o armazenamento, transporte e disponibilidade de água às plantas, bem como no fluxo de gases (Dias Junior & Pierce, 1996; Klein & Libardi, 2002; Peth & Horn, 2006). Aumentos nos valores de densidade resultam em um ambiente onde as raízes têm dificuldade de se desenvolver, seja pela dificuldade de penetrarem no solo ou pelo acesso restrito a água ou minimização das trocas gasosas. Normalmente isso ocorre conjuntamente, caracterizando um ambiente radicular que não repercutirá em bom desenvolvimento de plantas

(Lipiec et al., 1991; Unger & Kaspar 1994; Secco, 2003; Beulter & Centurion, 2004).

A compactação, quando oriunda exclusivamente do tráfego agrícola em SD onde há baixo revolvimento do solo, é influenciada em maior ou menor grau, de acordo com as características das máquinas que transitam nas lavouras e do conteúdo de água no solo. A compactação superficial do solo pelo tráfego de máquinas depende da pressão de contato entre o pneu e o solo, enquanto que a subsuperficial está relacionada ao peso sobre os rodados (Sánchez-Girón, 1996; Jorajuria & Dragui, 1997; Raper, 2005). Neste sentido, Sánchez-Girón (1996) considera que a compactação subsuperficial é aquela que ocorre a profundidades maiores do que 0,3 m. Conforme o mesmo autor, em qualquer um dos casos, a compactação só ocorre se a tensão exercida pelos rodados ultrapassar a resistência do solo à deformação. Dessa forma, fatores tais como a elevada carga por eixo, a pequena largura do pneu e alta pressão de inflação do pneu, têm aumentado a compactação do solo. Associado a isso, conteúdos de água no solo desfavoráveis para o manejo, utilizando maquinários, pode potencializar o grau de compactação (Brida, 2004).

O conteúdo de água do solo é o fator mais importante na determinação do grau de compactação produzido pelo tráfego (Hamza & Anderson, 2005). Segundo Pinto (2002) o ensaio de Proctor Normal, criado pelo engenheiro americano R. R. Proctor em 1933, evidencia a existência de um conteúdo de água no solo onde a compactação é máxima, o qual depende principalmente do teor de argila e de MOS (Ball et al., 2000) e da energia de compactação (Pinto, 2002). Brida (2004) explica que este comportamento ocorre porque, quando o solo está seco, o aumento dos conteúdos de água no solo resulta na formação de filmes de água ao redor das partículas, o que reduz o atrito e facilita a compactação. No entanto, acima de um determinado valor (conteúdo de água crítico), o acúmulo de água no espaço poroso gera pressões neutras que dissipam parte da energia aplicada, reduzindo a compactação.

### **2.2.2 Manejo de solo para a recuperação física**

Almejando a qualidade dos solos para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, torna-se necessário a adoção de manejo adequado do solo em SD, que minimize os efeitos negativos da compactação, desencadeadora das alterações das propriedades físicas do solo, que repercutem em efeitos diretos e negativos sobre o desenvolvimento de plantas. Uma das práticas que vem sendo preconizada para diminuir o grau de compactação e para a melhora da estrutura de solo degradada, em SD, engloba o uso de sistemas de rotação de culturas que incluam plantas de cobertura do solo (Torres & Saraiva, 1999; Hamza & Anderson, 2005). Tal possibilidade fundamenta-se na abertura de bioporos pelo sistema radicular destas espécies (Dexter, 1991) e no aumento do teor de matéria orgânica do solo (MOS) (Oades, 1993), o que ocorre de forma mais efetiva na superfície do solo.

A redução do grau de compactação do solo pelas plantas de cobertura, evidenciada em alguns trabalhos (Torres & Saraiva, 1999; Migliarina et al., 2000; Stone & Silveira, 2001; Abreu et al., 2004; Bhattacharyya et al., 2006), não se confirma em outros (Teixeira et al., 2003; Genro Junior et al., 2004). Além disso, a diminuição do grau de compactação por plantas de cobertura demonstra ser um processo lento (Corsini & Ferraud, 1999). No entanto, Debiasi (2008), após quatro anos de condução de um experimento, em Argissolo, anteriormente degradado fisicamente por pisoteio animal, relatou a eficiência das plantas de cobertura de solo na redução da compactação do solo.

O aumento na estabilidade dos agregados, em virtude do uso de plantas de cobertura, é bem documentado na literatura (Silva & Mielniczuk, 1997a,b; Campos et al., 1999; Wohlenberg et al., 2004; Conceição, 2006; Debiasi, 2008). De acordo com Dexter (1991), as raízes formam agregados através da abertura de novos poros e/ou aumento do diâmetro dos pré-existentes, originando, assim, bioporos que, conforme Oades (1993), caracterizam-se por serem longos, contínuos, cilíndricos e apresentarem paredes lisas e suavemente curvadas. Após a decomposição das raízes, estes bioporos podem ser utilizados pelo sistema radicular de outras culturas como caminho para penetrar camadas compactadas (Dexter, 1991). Quanto à densidade média do solo, ela não é alterada pela abertura de bioporos, haja vista que a acomodação das raízes é feita às custas da redução do espaço

poroso do solo localizado ao redor das mesmas.

Existe pouca informação a respeito da eficiência das diferentes culturas de cobertura em melhorar a estrutura do solo, de forma que o desafio que se interpõe à pesquisa é detectar quais são as espécies mais eficientes para a formação de uma estrutura de solo estável e, posteriormente, incorporá-las em um sistema de produção, sem que o mesmo perca sua rentabilidade (Oades, 1993; Unger & Kaspar, 1994; Chan & Heenan, 1996). Entre os trabalhos mais elucidativos a respeito da melhoria das propriedades físicas, em virtude do uso de plantas de cobertura, encontra-se o realizado por Chan & Heenan (1996). Nesta pesquisa, os autores observaram que as espécies de cobertura testadas (tremoço, cevada, canola e ervilha forrageira) melhoraram a qualidade física do solo; porém, apresentaram diferenças na habilidade de produzir e estabilizar agregados. Bhattacharyya et al. (2006), avaliando diferentes sucessões de culturas, em um solo com  $220 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, localizado numa região cujo clima é subtropical, concluíram, após quatro anos de condução do experimento, que a substituição do trigo por lentilha ou ervilha forrageira, em sucessão à soja, aumentou o volume de água disponível e a condutividade hidráulica saturada e não saturada, além de diminuir significativamente a densidade do solo, o que foi mais evidente na camada de 0 a 0,15 m. Miglierina et al. (2000), estudando o efeito de sistemas de rotação de culturas e da adubação sobre as propriedades físicas de um solo arenosiltoso, encontraram que a rotação dois anos trigo/dois anos aveia preta ou triticale + ervilhaca, na condição fertilizada, resultou em maior teor de carbono orgânico e maior volume de água disponível, em função do incremento na quantidade de poros de tamanho médio (0,19 e 8,81  $\mu\text{m}$ ), comparativamente ao sistema trigo/trigo não fertilizado. Da mesma forma, Abreu et al. (2004), em trabalho realizado sobre um Argissolo, há dez anos sob SD, obtiveram que o tratamento soja precedida de escarificação diminuiu a resistência do solo à penetração em relação ao solo descoberto e à soja ou crotalária sob SD. Porém, a maior condutividade hidráulica do solo saturado foi obtida para o tratamento crotalária em SD, o que foi atribuído à formação e manutenção de poros verticais e contínuos ao longo do perfil, em função do sistema radicular mais persistente desta espécie. Em contrapartida, a literatura apresenta algumas pesquisas em que o efeito das plantas de cobertura sobre as

propriedades físicas não foi comprovado, como as realizadas por Teixeira et al. (2003) e Genro Junior et al. (2004). Isso, no entanto, pode estar relacionado ao tempo de utilização dessas plantas de cobertura dentro do sistema, que foi inferior há três anos.

Na literatura também evidenciam-se os efeitos do acúmulo de resíduos vegetais, advindos das plantas de cobertura, sobre o solo. Por um lado, o acúmulo vegetal pode atenuar as cargas aplicados sobre os solos. Dao (1996) observou que a remoção dos resíduos vegetais da superfície do solo resultou em aumentos na densidade do solo entre 0 e 0,05 m, cultivado sob SD. Por outro lado, promoveu o aumento nos teores de MOS da camada superficial (Bayer & Mielniczuk, 1997; Corazza et al., 1999; Amado et al., 2001). Isso tem origem no baixo grau de revolvimento do solo, resultando em menores taxas de decomposição do material orgânico, por ficar menos exposto ao ataque dos microorganismos do solo. No entanto, a quantidade de material vegetal adicionado na superfície e a quantidade de matéria orgânica acumulada no solo são dependentes do sistema de culturas adotado (Bayer et al., 2000; Amado et al., 2001). Aqueles sistemas que incluem culturas com alta produção de matéria seca resultam, em geral, em maiores acúmulos de MOS.

A dinâmica de decomposição e liberação de N de resíduos culturais provenientes de plantas de cobertura de solo é dependente da relação C/N destas. Os resíduos de leguminosas têm grande importância como fornecedores de N, podendo contribuir para a diminuição da acidez do solo e da relação C/N da MOS (Hargrove, 1986). Entretanto, diversos estudos (Wagger, 1989; Ranells & Wagger, 1992; Da Ros, 1993; Ranells & Wagger, 1996; Aita & Giacomini, 2003) evidenciaram que as leguminosas, devido a sua baixa relação C/N, são rapidamente decompostas após o seu manejo, mesmo em sistema de manejo com a SD, o que resulta num assincronismo entre a liberação e a demanda de N pelas culturas sucessoras. Os resíduos de gramíneas possuem relação C/N maior, porém, em contrapartida, promovem a melhoria da estrutura do solo, por possuírem maior conteúdo de lignina, possibilitando aumento de ácidos carboxílicos e ácidos húmicos nos substratos (Primavesi, 1982), favorecendo a estruturação e a estabilidade dos agregados do solo (Fassbender & Bornemisza, 1994), tornando-o menos suscetível à compactação. Pode-se obter uma relação C/N intermediária, consorciando

leguminosas e gramíneas, conforme demonstraram Heinrichs et al. (2001) e Aita & Giacomini (2003) para o consórcio aveia preta e ervilhaca comum. Além da relação C/N, as proporções dos carboidratos estruturais e lignina também podem ser alteradas nos resíduos culturais de espécies consorciadas (Ranells & Wagger, 1996), o que pode provocar alterações na taxa de decomposição dos resíduos culturais, uma vez que esse processo é controlado por diversos atributos intrínsecos aos resíduos (Trinsoutrot et al., 2000), além de também estar melhorando a estrutura do solo.

A eficiência das plantas de cobertura em recuperar solos degradados e/ou diminuir o efeito do tráfego agrícola na compactação do solo, pode ser melhorada se esta prática for complementada pela limitação do tráfego de máquinas a determinadas regiões dentro da lavoura (tráfego controlado) e pelo uso de hastes sulcadoras para deposição do adubo, atuando a maiores profundidades. Há evidências de que estas práticas diminuem o grau de compactação (Botta et al., 2007; Veiga et al., 2007; Debiasi, 2008). No entanto, pouco se sabe a respeito do período de tempo que o solo, em SD, leva para adquirir uma estrutura estável para desempenhar adequadamente as suas funções (Karlen, et al., 1997).

Há diferentes definições, conforme os autores, quanto ao tráfego controlado. No entanto, o intuito é o mesmo, ou seja, eliminar o tráfego excessivo dentro dos sistemas agrícolas. Nesse sentido, Raper & Kirby (2006) afirmam que uma forma muito útil de limitar a compactação de solo é separando-se as áreas usadas para crescimento de raízes daquelas usadas para tráfego de maquinário agrícola. Laguë et al. (2003), definem o tráfego controlado como um sistema de produção no qual a área de cultivo e as pistas de tráfego são distintas e permanentemente separadas. Dessa forma, as pistas de tráfego são propositalmente compactadas e podem resistir ao tráfego adicional sem se deformar, tendo ainda como fator positivo o aumento na eficiência de tração dos pneus. Por sua vez, as áreas de produção entre as pistas são usadas exclusivamente para a semeadura, não sofrendo compactação pelo tráfego das máquinas. Assim, a compactação é, de certa forma, controlada e eliminada de toda a lavoura, restringindo-se a faixas exclusivas, com exceção da compactação natural do solo.

Com a eliminação do tráfego nas áreas de cultivo há uma enorme

contribuição para o aumento do rendimento de grãos (Laguë et al., 2003). No entanto, Raper & Kirby (2006) afirmam que, apesar dos benefícios advindos com a adoção do sistema de tráfego controlado, o aumento do rendimento depende de inúmeros fatores tais como distribuição de chuvas, condições de solo e espécies de plantas. Lima et al. (2005) estudaram as modificações na porosidade do solo, oriundas do tráfego de máquinas agrícolas, e concluíram que a compactação superficial, causada pela exploração agrícola e pelo tráfego de máquinas, afetou a forma e a distribuição do espaço poroso do solo, o que pode influenciar na água armazenada no solo, na permeabilidade de ar e no rendimento de culturas.

Além dos efeitos positivos sobre o controle da compactação do solo, a adoção de um sistema de tráfego controlado também tem influência positiva sobre a redução de custos e no incremento do rendimento de grãos. Li et al. (2006) encontraram, sob tráfego controlado, um aumento de 9,4 % no rendimento das culturas de inverno e verão, quando comparado às parcelas que receberam tráfego em toda área. Um estudo sobre tráfego controlado nas culturas de milho, trigo e sorgo, realizado pela Aciar (1998), na Austrália, mostrou que o rendimento médio dos grãos cultivados sob tráfego controlado foi 16% maior do que quando cultivados de maneira convencional, ilustrando o consistente aumento no rendimento da produção que acontece quando o solo não está sujeito ao tráfego anual das rodas dos tratores. Este estudo avaliou dois sistemas de produção: cultivo convencional sem tráfego controlado e plantio direto com tráfego controlado. Para as áreas onde se utilizou o sistema de tráfego controlado, a renda total foi cerca de 30% maior. O parâmetro de maior redução foi o custo com combustível, reduzindo quase 60% no tráfego controlado.

No sentido de melhorar a qualidade física do solo, acelerando a sua recuperação e minimizando os efeitos da compactação do solo pelo tráfego de máquinas, em SD, pode ser também citada o uso de hastes sulcadoras de semeadoras para deposição do adubo, em substituição aos discos duplos e operando a maiores profundidades do que estes. Tal procedimento possibilita o rompimento localizado de camadas compactadas superficialmente, as quais são comuns em semeadura direta (Klein & Boller, 1995; Tormena et al., 1998; Abreu et al., 2004; Genro Junior et al., 2004), e são as mais prejudiciais às

culturas (Unger & Kaspar, 1994).

A deposição do adubo pela utilização de hastes sulcadoras a maiores profundidades pode estimular o crescimento das raízes em profundidade, uma vez que, conforme relatam Merten & Mielniczuk (1991), Costa et al. (2009) os nutrientes, em solos submetidos à SD, concentram-se preferencialmente na superfície do solo (0,0-0,05 m). Mello et al. (2002) constataram que, em um Latossolo Vermelho, o uso de hastes sulcadoras em substituição aos discos duplos aumentou em mais de 10% o rendimento de grãos de milho. Efeitos positivos do uso de hastes sulcadoras, em substituição aos discos duplos, em SD, também foram observados por Klein & Boller (1995). Já Silva (2003) concluiu que, num Nitossolo Vermelho e sob disponibilidade hídrica adequada, o rendimento do milho não respondeu ao uso de hastes, em substituição aos discos duplos. Ainda, conforme Mello et al. (2002), a mobilização do solo pela haste acarretou redução da sua densidade e resistência mecânica à penetração, e num aumento da macroporosidade. Reis et al. (2006), trabalhando em um Latossolo argiloso, concluíram que a densidade do solo na linha de semeadura foi menor para as hastes sulcadoras em comparação aos discos duplos, o que resultou em uma maior porcentagem de emergência de plantas de milho para o primeiro mecanismo. Da mesma forma, Veiga et al. (2007) observaram que a mobilização na linha de semeadura por sulcadores do tipo haste, reduziu a resistência mecânica à penetração até à profundidade de 0,12 m, eliminando as diferenças observadas para esta variável entre o preparo convencional, a escarificação e a SD.

Perante o que foi exposto, verifica-se que há alguns manejos de solo que podem estar associados à SD e que melhoram a estrutura do solo, repercutindo em melhor desenvolvimento e rendimento de culturas. Diante disso, Debiasi (2008) concluiu sobre a influência das práticas de manejo descritas anteriormente que: I) As plantas de cobertura de inverno reduziram o grau de compactação de um Argissolo, devendo-se isto principalmente ao aumento no teor de matéria orgânica particulada e à ação do sistema radicular das mesmas; II) Após quatro anos de condução do experimento, os indicadores do estado de compactação, na superfície do solo, dos tratamentos envolvendo culturas de cobertura de inverno, atingiram valores que, de acordo com o conhecimento atual, não são restritivos ao crescimento das plantas; III) A

ausência de tráfego, aliada ao aumento da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo, durante a semeadura das culturas de verão, potencializou a recuperação física do Argissolo, independentemente das plantas de cobertura de inverno utilizadas.

### **2.3 Indicadores de qualidade do solo**

A qualidade do solo tem sido amplamente discutida e, como já relatada no primeiro item deste capítulo, a comunidade científica divide-se entre diferentes linhas de pesquisa, procurando estabelecer o melhor indicador de qualidade do solo. No entanto, o presente item fará referência a indicadores de qualidade física do solo e também a matéria orgânica do solo. Esta, considerada por muitos pesquisadores o indicador ideal de qualidade, fundamentando-se no fato de que várias funções e processos físicos, químicos e biológicos do solo estão diretamente relacionados à presença da matéria orgânica.

São vários os parâmetros físicos que são utilizados para a caracterização de um determinado solo, quanto a sua qualidade. Sendo assim, a qualidade física do solo se manifesta de várias maneiras. Segundo Streck (2007), a manifestação se dá via capacidade de infiltração de água no solo, a sua retenção e disponibilização às plantas, a ocorrência das trocas de calor e de gases com a atmosfera e com as raízes das plantas e no crescimento das raízes. Todas, no entanto, são influenciadas pelo manejo do solo e dinâmicas ao longo do tempo, até atingir um estado de equilíbrio físico. Streck (2007) ainda coloca que num solo com boa qualidade física espera-se encontrar uma rede de poros contínua e com ampla variação de diâmetros, que proporcione boa drenagem, aeração, que mantenha um adequado conteúdo de água disponível para as plantas, que facilite a penetração das raízes e permita as trocas de gases e temperatura.

#### **2.3.1 Matéria orgânica do solo e suas frações**

A MOS é considerada por muitos pesquisadores o indicador ideal de

qualidade do solo. O fundamento disso reside no fato de que várias funções e processos, ligados a capacidade produtiva dos solos, sejam eles os físicos, os químicos e os biológicos do solo, estejam diretamente relacionados a presença da matéria orgânica (Karlen et al., 1992; Lal, 1997; Seybold et al., 1998; Pulleman et al., 2000; Carter, 2001; Franzluebbers, 2002; Shukla et al., 2006). Além de atuar diretamente sobre os fatores ligados à produção agrícola, tem importância sobre questões ambientais, onde diversos estudos mostram a importância no manejo da MOS para o sequestro de CO<sub>2</sub> atmosférico (Lal, 1997; Bayer et al., 2000a,b; Mielniczuk et al., 2003; Zanatta et al., 2007), um dos responsáveis pelas mudanças climáticas (USDA-NRCS, 2008).

Funções da MOS, ligados à capacidade produtiva dos solos e elucidadas por Bayer & Mielniczuk (2008), tais como ser a responsável pela capacidade de troca de cátions (CTC), em solos tropicais e subtropicais; diminuição da toxidez causada por alguns elementos às plantas; favorecer a biota do solo; favorecer a agregação; atuar na retenção e infiltração de água; aumentar a aeração, além de diminuir a densidade do solo, a tornam indicadora de qualidade do solo. A agregação, por sua vez, é a principal característica física do solo afetada pela MOS (Bayer & Mielniczuk, 2008). Redução na densidade do solo, em função do aumento da MOS, têm sido relatada com frequência na literatura (Zhang et al., 1997; Arvidsson, 1998; Braida, 2004; Jarecki et al., 2005). Para Soane (1990) isso se deve, além do efeito da MOS sobre a agregação, a sua menor densidade de partícula e ao seu baixo grau de empacotamento. A propriedade da MOS em atuar sobre a agregação, desencadeia a alteração das demais características físicas do solo, importantes na almejada capacidade do solo em desempenhar adequadamente as suas funções perante a produção agrícola sustentável.

O principal constituinte da MOS é o carbono. A dinâmica da MOS é bastante variável, em função do tipo de solo, do clima e do manejo, e o seu conteúdo no solo é avaliado através das quantidades de carbono adicionadas e perdidas (Bayer & Mielniczuk, 2008). Em função disso, e principalmente quanto ao manejo de solo adotado, trabalhos de pesquisa vêm sendo realizados no intuito de identificar qual o componente da MOS que melhor representa os critérios para constituir um indicador de qualidade do solo (Vezzani e Mielniczuk, 2009).

A MOS se distribui em diferentes compartimentos no solo (Goldchin et al., 1997), ou seja, a MOS leve livre, leve oclusa e pesada. A MOS leve livre é constituída por materiais orgânicos em estágios iniciais de decomposição e, por isso, localizados na superfície dos agregados ou nos espaços existentes entre os mesmos (Roscoe & Machado, 2002), sendo assim o compartimento mais suscetível à decomposição e a variações edafoclimáticas. A MOS leve oclusa localiza-se no interior dos agregados, sem interação direta com as partículas minerais, apresentando mais estabilidade do que a fração leve livre, pois dispõe da proteção física para resistir à decomposição microbiana. A fração pesada da MOS é composta por substâncias orgânicas altamente humificadas e ligadas quimicamente à superfície das argilas, de forma que os microrganismos têm dificuldade em remover o substrato orgânico da superfície onde se encontra adsorvido.

O fracionamento físico da MOS tem sido preferencialmente utilizado nos estudos de seus compartimentos, tal como de sua qualidade (Bayer, 2004; Dieckow et al., 2005; Conceição, 2006; Souza et al., 2008), permitindo diferenciá-la quanto ao estado de decomposição, humificação do material, estrutura e função in situ no sistema, além de ser menos destrutível, quando comparadas com as técnicas químicas de fracionamento (Cambardella & Elliot, 1992; Christensen, 1992; Six et al., 2002). Por outro lado, somente a determinação da MOS pode não ser eficiente na discriminação das alterações, de curto prazo, na qualidade do solo, influenciadas pelos sistemas de manejo (Souza, 2008). O fracionamento físico granulométrico (Cambardella & Elliot, 1992) permite a obtenção de frações lábeis (matéria orgânica particulada - MOP) e estáveis da MOS (matéria orgânica associada aos minerais - MOM), de acordo com o tamanho de partículas que a compõe (Roscoe & Machado, 2002).

A MOP corresponde à fração retida na peneira de 53 µm juntamente com a areia, sendo possível identificar, neste compartimento, fragmentos de material vegetal, hifas fúngicas e exoesqueletos da fauna (Roscoe & Machado, 2002). É a fração da MOS com baixo grau de humificação (Goldchin et al., 1997), sendo considerada mais sensível as práticas de manejo do solo (Janzen et al., 1992) assemelhando-se às frações leve livre e oclusa (Conceição, 2006). A MOM, por sua vez, engloba as frações mais humificadas e que passam pela

peneira de 53  $\mu\text{m}$  juntamente com o silte e a argila, correspondendo predominantemente à fração pesada (Roscoe & Machado, 2002).

O carbono (C), constituinte da MOP representa em média de 2 a 25% do C orgânico total do solo (COT) de regiões tropicais (Roscoe & Machado, 2002). No entanto, é extremamente influenciado pelas condições edafoclimáticas locais, principalmente de temperatura e umidade, que atuam sobre a atividade microbiana do solo. Cambardella & Elliot (1992) e Chan (1997) encontraram que aproximadamente 50 % do COT é constituinte da MOP, em estudos em solos de regiões frias e/ou semiáridas. Enfim, em manejos conservacionistas, a literatura demonstra um aumento relativo nos estoques de carbono orgânico particulado (COP) maiores que no COT, indicando que a fração lábil da MOS é mais sensível às alterações no manejo do que a MOS. Sendo assim, a fração lábil da MOS pode ser considerada o indicador mais sensível no estudo da dinâmica da MOS influenciada pelo manejo (Bayer et al., 2004; Conceição et al., 2005; Souza et al., 2006a; Souza et al., 2006b).

### **2.3.2 Densidade e porosidade do solo**

A degradação da estrutura do solo altera a arquitetura dos poros, e quando o volume, dimensão e configuração dos poros do solo são afetados, o movimento de massa e energia no ambiente do solo sofrem o mesmo efeito (Hakansson & Lipiec, 2000). Um parâmetro muito utilizado nas pesquisas em Ciência do Solo, da condição física do solo e conseqüentemente da sua qualidade, é a densidade do solo. Imhoff (2002) cita que existem diversos indicadores do estado de compactação do solo, sendo a densidade um dos mais utilizados. Isso se deve principalmente ao fato de que a medida independe do conteúdo de água no solo, ser rápida e de fácil obtenção. Com relação inversa à densidade do solo, a porosidade do solo também indica alterações de volume do solo. Sempre que o manejo do solo tem influência sobre os valores de densidade, a relação macro/microporos é também alterada, modificando as funções do solo de proporcionar para as culturas boa drenagem, retenção e disponibilização de água, trocas gasosas, facilidade com que as raízes penetram no solo e, conseqüentemente, o bom rendimento de

culturas.

A aeração do solo, promovida pela porosidade, é fundamental para as trocas gasosas do solo. O aumento da densidade do solo reduz a taxa de difusão do oxigênio nos poros do solo através da diminuição do espaço poroso e também por alterar o tamanho, a tortuosidade e continuidade dos poros, que interliga as faces do ambiente radicular, com o ambiente externo (a atmosfera). Isso acarreta em minimização das trocas gasosas entre a atmosfera e o solo, prejudicando o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, o rendimento de culturas. Para o bom desenvolvimento radicular, há uma porosidade de aeração mínima, a qual deve ser ao redor de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Kiehl, 1979; Klein & Libardi, 2002). Esta representa a razão entre o volume de ar e o volume do solo, sendo, portanto, afetado pelo conteúdo de água e pela compactação do solo (Hillel, 1998).

O estabelecimento de valores de densidade do solo críticos ao desenvolvimento das plantas não é tarefa fácil, especialmente quando se considera que, conforme Hakansson & Lipiec (2000), a resposta das culturas a este atributo varia de solo para solo, principalmente em função da textura, o que dificulta a extrapolação dos resultados experimentais. Em virtude da complexa interação entre os fatores físicos, em cada condição estrutural do solo, diversos estudos têm sido realizados pela comunidade científica no intuito de estabelecer limites de valores densidade, em que as plantas emitem melhores respostas quanto ao seu desenvolvimento. Dentro dessa proposta, Letey (1985) relacionando outros fatores físicos à densidade do solo, elucidou que existe uma faixa ótima de conteúdo de água no solo que favorece o crescimento vegetal. Em razão dessas interações, Silva et al. (1994) propuseram um índice para avaliar a qualidade estrutural do solo, denominado de intervalo hídrico ótimo (IHO), o qual leva em consideração a densidade do solo. O IHO considera a faixa de conteúdo de água ideal do solo como sendo aquela onde as limitações ao crescimento vegetal, associadas à água, aeração e resistência mecânica à penetração de raízes, são minimizadas. Embasados em estudos relacionados ao IHO, Reichert et al. (2003) sugerem valores de densidade do solo críticos ao desenvolvimento das plantas, os quais variam em função da classe textural do solo. De acordo com estes autores, os valores de densidade limitantes as plantas correspondem, em média, a 1,75; 1,45 e 1,30

Mg m<sup>-3</sup> para solos de textura arenosa, média e muito argilosa, respectivamente.

Para reduzir as diferenças de resposta das plantas à densidade em função do tipo de solo, Hakansson (1990) propôs o conceito de densidade relativa, determinada através da divisão da densidade do solo por um valor de densidade de referência, obtido pela compressão uniaxial de amostras grandes e indeformadas de solo a uma tensão de 200 kPa. Este autor concluiu que a densidade relativa ótima ao rendimento de diversas culturas corresponde a aproximadamente 0,87. No Brasil, tem-se utilizado como referência a densidade máxima determinada pelo teste de Proctor Normal (Klein, 2006) que, na maioria dos casos, resulta em valores de densidade relativa ótima semelhantes (Torres & Saraiva, 1999; Beutler et al., 2005) aos indicados por Hakansson (1990).

### **2.3.3 Retenção de água no solo**

A água no solo é fundamental ao desenvolvimento das plantas e regula os demais fatores físicos do solo que influenciam diretamente o crescimento e o rendimento das culturas (Forsythe, 1967; Letey, 1985). Isso torna a curva de retenção de água no solo importante em estudos de qualidade dos solos, buscando o uso e manejo sustentável dos sistemas agrícolas, ao longo do tempo.

Importante em estudos físico-hídricos do solo, a retenção de água expressa a relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial ou a tensão da água no solo. O conteúdo de água retido em determinado potencial decorre da estrutura e da distribuição dos tamanhos de poros (Beutler et al., 2002). A degradação da estrutura do solo, por sua vez, altera a arquitetura dos poros, e quando o volume, dimensão e configuração dos poros do solo são afetados, o movimento de massa e energia no ambiente do solo sofrem o mesmo efeito (Hakansson & Lipiec, 2000).

Solos argilosos têm a capacidade de reter mais água do que aqueles menos argilosos. Porém, a água armazenada não está em mesma proporção da água efetivamente disponível as plantas. Isso se dá em função da proporção de poros do solo, onde que os poros de menor diâmetro retêm a água a tensões superiores à capacidade de extração pelas plantas. Ou, em

outras palavras, o potencial matricial que essa água está adsorvida às partículas do solo é maior que a capacidade das plantas em extraí-la. Na literatura tem-se considerado como água disponível a quantidade de água compreendida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (Veihmeyer & Hendrickson, 1949; Hillel, 1980; Hillel, 1998). A capacidade de campo representa o limite superior da água disponível às plantas, considerando os potenciais entre -6 kPa e -33 kPa, e o ponto de murcha permanente o limite inferior da água disponível às plantas, no potencial de -1500 kPa (Veihmeyer & Hendrickson, 1949; Hillel, 1980).

Azooz et al. (1996), compararam a retenção de água, num mesmo potencial, entre o plantio direto e convencional de um solo franco siltoso e outro franco arenoso do Canadá. Em ambos estes solos, o plantio direto reteve mais água. Canalli & Roloff (1997), em um Latossolo Vermelho distrófico, sob plantio direto, verificaram menor quantidade de água disponível na camada de 0 a 20 cm, em relação a camada de 20 a 40 cm, atribuindo o fato a compactação superficial no plantio direto. Já Silva (2003), não encontrou diferenças entre os valores de água armazenada em diferentes estados de compactação, em estudos em Latossolo Vermelho distrófico. Collares (2005), trabalhando em Argissolo Vermelho distrófico arênico, encontrou que a compactação residual, ocasionada por passadas de máquina do ano anterior, causou diferenças significativas na retenção de água no solo até as tensões de -6 kPa para a camada de 10 a 15 cm e até 33 kPa para a camada de 15 a 20 cm. Li et al. (2006) encontraram, na camada de 0 a 0,05 m de um Vertissolo sob tráfego controlado, um incremento de 11,5% na água disponível às plantas, evidenciando uma maior retenção de água, e, um aumento de 9,4% no rendimento das culturas de inverno e verão, quando comparado às parcelas que receberam tráfego em toda área.

### **2.3.4 Índice S**

A partir da curva de retenção de água no solo, pode-se obter o índice S (Dexter 2004 a, b, c), o qual representa o valor da inclinação da curva de retenção de água no seu ponto de inflexão. Segundo Dexter (2004 a), um aumento nos valores de S (maior inclinação) indica uma ampla distribuição de

tamanho de poros, condizente com condições estruturais que estabelecem um adequado funcionamento físico do solo. Assim sendo, fatores relacionados ao solo (textura e estrutura) e ao manejo (matéria orgânica do solo, compactação e preparo) que influenciam a distribuição do tamanho de poros, refletem em mudanças nos valores de S, e, portanto, na qualidade física do solo. O mesmo autor, numa tentativa de estabelecer limites para indicar condições favoráveis e restritivas para o crescimento das raízes das plantas propõe respectivamente, o valor S maior ou menor à 0,035. Valores de S menores do que 0,020 representam condições físicas do solo muito pobres e com alta restrição ao crescimento das raízes das plantas.

Streck (2007), comparando um Latossolo cultivado com plantio direto e solo de floresta, encontrou que os valores de índice S foram maiores para o segundo, em todas as profundidades avaliadas. O maior valor S na floresta indica uma melhor configuração de poros no solo. Silva (2004), trabalhando com Latossolo Vermelho Amarelo sob duas condições de uso, floresta e pomar de laranja, encontrou valores de S de 0,107 para a floresta, e 0,026 para o pomar. Segundo o autor, isso demonstra que o solo na floresta possui uma qualidade estrutural superior em relação ao solo do pomar, o qual apresenta área trafegada pelas máquinas agrícolas com maior densidade do solo em função da compactação e, conseqüentemente, uma estrutura física mais degradada.

Dexter (2004 a) apresentou relações entre a densidade e a MOS, com o índice S. Os resultados mostraram que o índice S decresceu e aumentou de forma exponencial, respectivamente, com o aumento da Ds e dos teores de MOS. Streck (2007) encontrou as mesmas relações em seus estudos, com solos de textura argilosa e muito argilosa. Dessa forma, os resultados confirmam o potencial do índice S em identificar variações na qualidade física do solo conforme o manejo de solo utilizado. Para as condições de solos brasileiros, os estudos englobando o índice S como indicador da qualidade física do solo são poucos, principalmente utilizando condições diferenciadas de manejo do solo.

### **2.3.5 Permeabilidade do solo ao ar**

O estudo da permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) se faz importante na determinação da qualidade física do solo pois é um indicativo da facilidade com que o ar entra ou passa através de uma massa de solo. Segundo Hillel, (1998) a  $K_a$  está relacionada ao tamanho e continuidade da porosidade de aeração do solo e, conforme Kirby (1991), pelo grau de saturação dos macroporos. No entanto, não basta apenas ter boa distribuição de tamanhos de poros, mas sim que os mesmos tenham continuidade dentro do solo, facilitando as trocas gasosas. Peth & Horn (2006) consideram também que a  $K_a$  é um indicador que revela as mudanças na eficiência e funcionalidade do sistema poroso, conforme a deformação do solo.

A  $K_a$  governa os fluxos de gases no solo e é comparável ao fluxo da água, com certas restrições, pois o ar é compressível e dependente da densidade e viscosidade. A importância da  $K_a$  reside no fato de que as plantas, para terem um adequado desenvolvimento, necessitam de determinadas proporções nas concentrações de  $O_2$  e  $CO_2$ , o que controla os demais processos ocorrentes no solo e que envolvem, por exemplo, o C, o N e o S (Silva et al, 2009). As proporções de gases no solo são adequadas quando, além da proporção e distribuição ideal de poros, há a ligação dos mesmos com a atmosfera externa, o que afeta diretamente o desenvolvimento de plantas.

As plantas, para terem um adequado desenvolvimento, em decorrência da difusão de gases no solo, necessitam que este tenha porosidade de aeração mínima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Grable & Siemer (1968). Este valor limite, abaixo do qual torna-se restritivo ao bom desenvolvimento radicular das plantas, foi utilizado por Silva et al. (2004) e Leão et al. (2004), afim de quantificar o IHO, e, sucessivamente usado nas diversas pesquisas utilizando o mesmo índice. No entanto, deve-se considerar que a aeração do solo é um processo dinâmico, não estático e dependente, além da porosidade, de outros fatores do solo e do ambiente. Alguns autores (Resurreccion et al., 2007) sugerem que a medida da porosidade de aeração e da  $K_a$  seja realizada no solo próximo a capacidade de campo, objetivando a avaliação das propriedades físicas e do transporte de gases no solo.

A  $K_a$  é fortemente influenciada pelo conteúdo de água no solo. Ela alcança seu valor máximo em solo seco e progressivamente decresce a medida que o solo é umedecido até alcançar um valor de zero quando o solo

está próximo ou na saturação onde ocorre a obstrução dos poros do solo por água (Christensen, 1992). Entretanto, os valores de  $K_a$  são diretamente influenciadas pela estrutura do solo, determinada em parte pelo sistema de manejo e por este alterar principalmente as características do sistema poroso, principalmente a macroporosidade, principal responsável pelos fluxos de gases e água no sistema. Dessa forma, a utilização do  $K_a$  como indicador da qualidade física do solo é promissora, visto ser bastante sensível em discriminar os efeitos de diferentes sistemas de manejo do solo.

## 2.4 Considerações

O sistema de manejo do solo modifica as propriedades físicas do solo, e, conseqüentemente o rendimento de culturas. No entanto, é conhecido que tanto o desenvolvimento de culturas, quanto o seu rendimento, são influenciados pela qualidade do solo e, além disso, pelas condições ambientais, especialmente o regime hídrico pluvial. A escassez de água em algum momento crítico ao desenvolvimento de plantas, minimiza o potencial produtivo das culturas. E, os seus efeitos são mais pronunciados e negativos as plantas, quando o solo apresenta restrições físicas de degradação estrutural, principalmente no aspecto poroso. A compactação é um fator que dificulta o acesso das raízes à água armazenada no solo. Por outro lado, esta pode estar fortemente retida as partículas adensadas de solo e assim não ser disponível às plantas.

Tanto a recuperação da estrutura de solo degradado, quanto a obtenção de propriedades físicas almejadas em sistemas agrícolas sustentáveis, podem ser possíveis. No entanto, o que se interpõe à pesquisa é encontrar o tempo mínimo necessário para que os solos submetidos a condição de degradado atinjam a qualidade física, utilizando manejo adequado e priorizando a conservação do ecossistema. Como já visto na revisão apresentada anteriormente, diversos são os indicadores de qualidade do solo utilizados. No entanto, acredita-se que a utilização de um único indicador, dentro dos vários utilizados na literatura, para avaliar a qualidade do solo, pode não ser representativo de todo o sistema. Isso porque os sistemas agrícolas são complexos e dinâmicos no decorrer do tempo. Dessa forma, quanto maior

o número de indicadores de qualidade física do solo avaliados, em sistemas solo-planta considerados complexos, e ainda não completamente entendidos, como o caso da SD, é a melhor solução.

Ao final, a repercussão dos resultados obtidos acerca da qualidade física do solo pode possibilitar dois tipos de análises do sistema agrícola adotado. Um deles refere-se à possibilidade, ou não, de fazer inferência a um dos indicadores físicos utilizados, como o mais adequado na avaliação da situação proposta. Outra análise traz uma abordagem sistêmica, evidenciando a possibilidade, ou não, de que o sistema de manejo do solo adotado, para a recuperação de solo degradado fisicamente, num determinado período de tempo, levou-o a atingir um estado de equilíbrio, que embora dinâmico, com qualidade física, desempenhando adequadamente as suas funções perante a produção agrícola sustentável.

## **3 CAPÍTULO II. EVOLUÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMA AGRÍCOLA PARA RECUPERAÇÃO DE SOLO DEGRADADO**

### **3.1 Introdução**

A recuperação de solos degradados fisicamente, atingindo a qualidade para desempenhar adequadamente as suas funções, perante a sustentabilidade da produção agrícola, é alcançada através do manejo adequado de solo, levando em consideração o fator tempo. A compactação é uma forma degradativa da estrutura dos solos e tem reflexos diretos e negativos sobre as suas funções, salientadas por Reichert et al. (2003) em servir como meio para o crescimento de plantas, exercer regulagem e participação do fluxo de massa e energia no ambiente e atuar como filtro ambiental.

Hillel (1982) define a compactação do solo como sendo um processo de redução de volume (compressão). O aumento da compactação é relacionado ao aumento da densidade do solo, e isso tem influência sobre diversos processos ocorrentes no solo. O aumento da densidade do solo altera a sua porosidade e, conseqüentemente, a quantidade e continuidade de poros, o que interfere sobre o armazenamento, transporte e disponibilidade de água às plantas, bem como no fluxo de gases (Dias Junior & Pierce, 1996; Klein & Libardi, 2002; Peth & Horn, 2006). Aumentos nos valores de densidade resultam em um ambiente onde as raízes têm dificuldade de se desenvolver, quer seja pela dificuldade de penetrarem no solo, quer seja pelo acesso restrito a água ou pelas trocas gasosas. Normalmente isso ocorre conjuntamente,

caracterizando um ambiente radicular que não repercutirá em bom desenvolvimento de plantas (Lipiec et al., 1991; Unger & Kaspar 1994; Secco, 2003; Beulter & Centurion, 2004).

A compactação é resultante do pisoteio animal ou do tráfego de máquinas e atinge níveis tão mais altos e negativos às funções primordiais do solo, quanto for o desrespeito a capacidade de suporte do solo e/ou ao uso do mesmo em condições desfavoráveis de conteúdo de água presente, ocasionando grandes deformações de solo. Deformações essas que podem ser irreversíveis. Diante disso, em solos com algum grau de compactação, torna-se necessária a adoção de medidas capazes de reverter este processo e, assim, minimizar os efeitos negativos por ela ocasionados.

Tanto a recuperação da estrutura física de solos degradados, quanto a busca pela qualidade do solo, buscam integrar práticas de manejo do sistema agrícola. Nesse sentido Fliebbach et al. (2007) evidencia que nenhuma prática isolada de manejo aumentará a qualidade do solo, mas sim estratégias integradas. Dessa forma, tem sido amplo o número de estudos que relacionam manejos de solo com a semeadura direta (SD). Em termos práticos a adoção desse sistema normalmente ocorre depois que o solo já apresenta problemas, especialmente de degradação estrutural (Braidá, 2004). Nessas condições, a acomodação natural das partículas desestruturadas, associada à falta de matéria orgânica e de resíduos vegetais na superfície do solo e ao tráfego de máquinas e animais, resulta, certamente, em compactação em níveis prejudiciais às plantas (Braidá, 2004). Uma exceção que ocorre é com a conversão de campo natural diretamente para a SD, onde a estrutura de solo, normalmente, não encontra-se degradada. Nesta condição, o manejo de solo deve ser feito de forma a prevalecer a manutenção da qualidade do solo.

Diante disso, o que se interpõe à pesquisa é encontrar o melhor manejo de solo e o tempo mínimo necessário para que solos degradados atinjam a qualidade física, desempenhando as suas funções perante a produção e à conservação do meio ambiente. Uma das práticas que vem sendo preconizada para diminuir o grau de compactação e para a melhora da estrutura de solo degradada, em SD, engloba o uso de sistemas de rotação de culturas que incluam plantas de cobertura do solo (Torres & Saraiva, 1999; Hamza & Anderson, 2005). Tal possibilidade fundamenta-se na abertura de

bioporos pelo sistema radicular destas espécies (Dexter, 1991) e no aumento do teor de matéria orgânica do solo (MOS) (Oades, 1993), o que ocorre de forma mais efetiva na superfície do solo. A agregação, por sua vez, é a principal característica física do solo afetada pela MOS (Bayer & Mielniczuk, 2008). A redução na densidade do solo, em função do aumento da MOS, têm sido relatada com frequência na literatura (Zhang et al., 1997; Arvidsson, 1998; Braida, 2004; Jarecki et al., 2005). Para Soane (1990) isso se deve, além do efeito da MOS sobre a agregação, a sua menor densidade de partícula e ao seu baixo grau de empacotamento.

A eficiência das plantas de cobertura em recuperar solos degradados e/ou diminuir o efeito do tráfego agrícola na compactação do solo, pode ser melhorada se esta prática for complementada pela limitação do tráfego a determinadas regiões dentro da lavoura (tráfego controlado) e pelo uso de hastes sulcadoras da semeadora para deposição do adubo, atuando em maiores profundidades. Há evidências de que estas práticas diminuem o grau de compactação (Botta et al., 2007; Veiga et al., 2007; Debiasi, 2008). No entanto, pouco se sabe a respeito do período de tempo que o solo degradado, sob SD, leva para adquirir uma estrutura estável para desempenhar adequadamente as suas funções (Karlen, et al., 1997).

Assim, este estudo baseou-se nas hipóteses de que: I) um sistema agrícola, de solo degradado pelo uso e por compactação, manejado por sete anos com plantas de cobertura de solo de inverno, em SD, repercute em recuperação física da estrutura do solo. Isto estaria atribuído principalmente a melhora da estrutura do solo pelo incremento de matéria orgânica; II) o tráfego controlado e a atuação das hastes sulcadoras de semeadoras em maiores profundidades, constituem-se em importantes técnicas na SD, as quais, agregadas à utilização de plantas de cobertura de inverno, auxiliam na recuperação física do Argissolo estudado; e III) a densidade, a porosidade e a matéria orgânica do solo são parâmetros eficazes na indicação da qualidade do solo.

Para testar estas hipóteses, o objetivo principal foi estudar o efeito, no decorrer do tempo, das plantas de cobertura de inverno, do tráfego controlado e da profundidade de atuação das hastes sulcadoras de adubo da semeadora, sobre algumas propriedades de solo que atuam na qualidade física

de um Argissolo em processo de recuperação, sob SD, há sete anos.

## 3.2 Material e Métodos

### 3.2.1. A área experimental

#### 3.2.1.1 Localização e histórico da área experimental

O experimento localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no Município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central. O solo da área experimental é classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico (EMBRAPA, 1999), pertencendo à unidade de mapeamento São Jerônimo (Brasil, 1973). A textura superficial deste solo é franco-argilo-arenosa. A área onde se situa o experimento apresenta uma declividade média de  $0,03 \text{ m m}^{-1}$ . O clima da região é subtropical úmido (Cfa, pela classificação de Köppen), com temperaturas médias mensais variando entre  $13,9^{\circ}\text{C}$  e  $24,9^{\circ}\text{C}$  e precipitações médias mensais entre 96 mm e 168 mm, totalizando 1440 mm anuais (Bergamaschi et al., 2003). Os principais atributos químicos e físicos da área experimental, antes da aplicação dos tratamentos (julho/2002), são mostrados, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1.** Caracterização química do solo antes da instalação do experimento (Beutler, 2005).

Camada (m)	pH	P	K	MOS <sup>1</sup>	Al	Ca	Mg
		-----mg dm <sup>-3</sup> -----		-g kg <sup>-1</sup> -	-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----		
0,0 - 0,06	5,6	3,5	201	30	0,0	3,6	1,7
0,06 - 0,12	5,7	2,0	145	22	0,0	3,7	1,7
Média	5,6	2,8	173	26	0,0	3,7	1,7

<sup>1</sup> Matéria orgânica do solo

A área onde este experimento encontra-se instalado fazia parte de uma gleba de aproximadamente 4,5 hectares, a qual foi utilizada, durante

vários anos, para programas de melhoramento de cultivares pela Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul (FEPAGRO). Neste período, o solo da área foi intensivamente preparado, com o uso de aração, gradagem e enxada rotativa, o que resultou em excessiva desagregação do solo. Com o término das pesquisas, no final da década 70, houve o restabelecimento das espécies típicas dos campos naturais da região que, de acordo com Pott (1974), englobam, entre outras, as gramíneas *Paspalum spp.*, *Aristida spp.*, *Trachypogon montufari* e *Setaria geniculata* e a leguminosa *Desmodium canum*. Em 1982, a área foi dividida em três partes, de forma que a fração correspondente a este experimento começou a ser utilizada como área onde os bovinos permaneciam, temporariamente, antes do deslocamento dos mesmos ao local de pastejo, o que perdurou até 2002. Durante este período, a área foi submetida a altas lotações animais, mesmo em dias com elevado conteúdo de água no solo, o que resultou em continuação da sua degradação física, resultando em uma alta densidade do solo e baixos valores de macroporosidade e porosidade total (Tabela 2), medidos em 2002, quando iniciaram as pesquisas na área.

**Tabela 2.** Caracterização física do solo antes da instalação do experimento (adaptada de Beutler, 2005).

Característica analisada	Camada (m)		
	0,0 – 0,06	0,06 – 0,12	0,0 – 0,12
Densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1,70	1,72	1,71
Densidade da partícula ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	2,51	2,56	2,54
Macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	0,07	0,05	0,06
Microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	0,29	0,29	0,29
Porosidade total ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	0,36	0,35	0,35
Argila ( $\text{g kg}^{-1}$ )	255	283	269
Silte ( $\text{g kg}^{-1}$ )	216	220	218
Areia ( $\text{g kg}^{-1}$ )	529	497	513

Além da estrutura do solo, a composição botânica também foi alterada, de forma que a vegetação predominante da área experimental na

época do início do experimento constava de gramíneas cespitosas de baixo porte e de caraguatás, podendo, assim, ser considerada uma área de campo natural degradado (Beutler, 2005).

No outono/inverno de 2002, foi implantado o experimento referente a presente pesquisa. Antes da semeadura das culturas de inverno em 2002, foi realizada a correção do solo através da aplicação, em superfície, de 2,5 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico (PRNT 60%). Esta dose equivaleu à metade da recomendada pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (Comissão... 2004) para a correção da camada de 0,0-0,2 m. Mais detalhes sobre a instalação e os primeiros anos de condução do experimento podem ser encontrados em Beutler (2005). As avaliações que compõem este trabalho representam a continuidade do trabalho de Beutler (2005) e de Debiasi (2008), para a safra 2008/2009.

Na Tabela 3, encontram-se alguns resultados de propriedades físicas avaliadas quatro anos após a instalação do experimento, em 2006, por Debiasi (2008). Esses resultados serão utilizados na comparação com os dados obtidos na presente pesquisa, mostrando a evolução, ou não, das mesmas, no tempo.

**Tabela 3.** Densidade, porosidade total, macroporosidade (MAC) e microporosidade do solo (MIC), avaliadas em novembro de 2006, em função do tráfego de rodados de máquinas (Debiasi, 2008).

Camada	Tráfego	Densidade	Porosidade		
			Total	MAC	MIC
----		--Mg m <sup>-3</sup> --	-----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----		
	Sem	1,34 b	0,48 a	0,21 a	0,27 a
0,03 - 0,06	Com	1,43 a	0,44 b	0,17 b	0,27 a
	<b>Média</b>	<b>1,38</b>	<b>0,46</b>	<b>0,19</b>	<b>0,27</b>
	Sem	1,59 a	0,37 a	0,11 a	0,26 a
0,12 - 0,15	Com	1,60 a	0,37 a	0,10 a	0,27 a
	<b>Média</b>	<b>1,60</b>	<b>0,37</b>	<b>0,10</b>	<b>0,27</b>

Médias seguidas pela mesma letra minúscula no sentido das colunas, para uma mesma camada, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ).

### 3.2.1.2 Tratamentos para o manejo do solo

O delineamento experimental se dá em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições. As parcelas principais e as subparcelas do experimento são esquematizadas nos croquis expostos nos Apêndices 1, 2 e 3, para as safras 2007/2008, 2008/2009 e 2009/2010, respectivamente.

Os tratamentos principais, postos em parcelas de 4,5 m largura por 20 m de comprimento, constam de três coberturas de inverno: pousio, nabo forrageiro e o consórcio aveia preta + ervilhaca comum, seguidas da semeadura de milho e soja no verão, em rotação anual (Apêndices 1, 2 e 3). Dentro de cada bloco, cada tratamento de cobertura de inverno ocupa duas parcelas, implantadas sem rotação anual. Nas áreas sob pousio, as espécies vegetais predominantes, com restabelecimento natural, durante o inverno são a serralha (*Sonchus oleraceus*), o azevém (*Lolium multiflorum*), o mentruz (*Coronopus didymus*) e a grama-seda (*Cynodon dactylon*).

Os tratamentos secundários, distribuídos nas subparcelas, englobam duas profundidades nominais de atuação da haste sulcadora, para deposição do adubo, durante a semeadura das culturas de verão: 0,12 m (média) e 0,21 m (profunda). E, nas subsubparcelas, o tratamento é com relação ao tráfego controlado, de forma que, durante as operações mecanizadas, cada subparcela corresponde a uma passada do conjunto trator/semeadora-adubadora e cada parcela corresponde a uma passada da colhedora (Figura 1). Assim, isolam-se áreas trafegadas daquelas não trafegadas.

Há, portanto, linhas de plantio de culturas que coincidem com o tráfego de rodados, e outras, que não coincidem, conforme o esquema representado na Figura 1. O esquema mostra uma parcela subdividida, conforme a atuação da haste sulcadora. E a simbologia RT, RC e NT, indicam, respectivamente, as regiões ou linhas de plantio, no solo, onde coincidem com o rodado do trator, rodado da colhedora e sem tráfego. As avaliações físicas do solo e de rendimento das culturas foram feitas levando em consideração estas condições de solo trafegado e não trafegado. Cabe ressaltar que a coleta de solo para as avaliações físicas foi realizada fora da linha de semeadura, porém, conforme o caso, na região influenciada pelo tráfego ou fora dele. Isso foi devido a fim de evitar coletar o solo revolvido pela haste sulcadora da



dessecação das mesmas. As amostras foram compostas por todas as plantas contidas no interior de um retângulo medindo 0,6 x 0,4 m (0,24 m<sup>2</sup>), as quais foram cortadas rente ao solo. Foi coletada uma amostra por parcela, no centro desta, evitando-se o possível efeito da bordadura. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 65° C até peso constante, sendo os valores assim obtidos extrapolados para Mg ha<sup>-1</sup>.

A semeadura das culturas de verão (milho e soja), para a safra 2008/2009 foi realizado em 14 novembro. Para a implantação das culturas foi utilizada a mesma semeadora-adubadora especificada anteriormente, no entanto, configurada com 5 linhas espaçadas de 0,45 m. Cada linha foi composta por um disco de corte de palha, liso, de 0,356 m (14”) de diâmetro, colocado à frente do sulcador de adubo tipo haste, com ponteiros de 0,025 m de largura e ângulo de ataque de 20°; sulcador para sementes do tipo disco duplo, com 0,330 m (13”) de diâmetro; e rodas compactadoras dispostas em “V”, com 0,305 m (12”) de diâmetro.

A densidade de semeadura do milho e da soja foi calculada para obter população, respectivamente, de 65 e 400 mil plantas por hectare, com espaçamento de 0,45 m nas entrelinhas. A profundidade média de colocação de sementes no solo de ambas as culturas foi de 0,05 m. A adubação de base (milho e soja) e de cobertura (milho) foi executada de acordo com os resultados da análise de solo, para as respectivas safras (Apêndice 4), e recomendações da Comissão...(2004), aplicando-se os mesmos fertilizantes e doses, independentemente do tratamento. No caso da adubação nitrogenada de cobertura no milho, esta foi realizada manualmente, a lanço, quando as plantas se encontram no estágio V6 (seis folhas desenvolvidas), através da aplicação de N na forma de uréia numa dose visando o rendimento de 7 Mg ha<sup>-1</sup>.

O controle químico de plantas daninhas, tanto na cultura da soja, quanto na do milho, foi realizado aproximadamente 25 dias após a semeadura, utilizando herbicidas recomendados pela pesquisa. O controle de pragas foi executado sempre quando da detecção dos primeiros sinais da presença e/ou danos. A execução dessas operações mecanizadas, em função do tráfego controlado, foi realizada na área entre as parcelas.

As operações mecanizadas foram realizadas com um trator marca John Deere modelo 5600, 4x2 TDA; potência máxima do motor de 53 kW (75

cv); massa total de 3835 kg (1530 kg sobre o eixo dianteiro e 2305 kg sobre o traseiro); pneus traseiros 18.4-30 R1 e dianteiros 12.4-24 R1, com pressão de inflação de 95 e 110 kPa, respectivamente; pressão de contato dos pneus dianteiros e traseiros com solo, determinada pelo método de O'Sullivan et al. (1999), de 115 e 120 kPa, respectivamente; e bitola de 1,65 m nos eixos dianteiro e traseiro.

A colheita das culturas de verão, mecanizada, e após a colheita manual das linhas de plantio avaliadas, foi realizada por uma colhedora autopropelida de grãos, marca SLC-JOHN DEERE, modelo 1165, dotada de plataforma de corte, com 14 pés (4,62 m) de largura; com picador de palhas; massa em ordem de marcha de 7.200 kg, sendo 2.250 kg no eixo traseiro e 4.950 kg no eixo dianteiro; pneus dianteiros 18.4-30 R1 e traseiros 10.5/80-18, com pressão de inflação de 138 e 200 kPa, respectivamente; pressão de contato dos pneus dianteiros e traseiros com solo, determinada pelo método de O'Sullivan et al. (1999), de 173 e 260 kPa, respectivamente; e bitola de 2,34 m no eixo dianteiro, e de 2,18 m no eixo traseiro.

### **3.2.2 Teor de matéria orgânica do solo e respectivas frações granulométricas**

A coleta do solo para a determinação do teor de matéria orgânica do solo (MOS) e respectivas frações granulométricas foi realizada em junho de 2009, após a colheita das culturas de verão. Foram coletadas três amostras aleatoriamente em cada parcela, desconsiderando os fatores de profundidade de atuação da haste sulcadora e de condição de tráfego, dos blocos 3, 4 e 5 (Apêndice 2), compreendendo as camadas de 0,02 - 0,05 m, 0,10 - 0,13 m e 0,20 - 0,23m, totalizando 54 amostras.

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm, obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TFSA), conforme procedimento descrito em EMBRAPA (1997). Uma parte da TFSA foi reservada para a análise do teor de MOS; a outra foi utilizada para o fracionamento granulométrico, executado conforme a metodologia de Cambardella & Elliot (1992). Essa metodologia prevê a dispersão de 20 gramas de solo, através do uso de 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio 1

mol L<sup>-1</sup>, juntamente com agitação mecânica (agitador horizontal), durante 16 horas. Posteriormente, as amostras são lavadas através de uma peneira de 0,053 mm, de forma a ficarem retidas na mesma, apenas a fração areia e a MOS particulada (MOP). A fração areia + MOP foi seca em estufa a 60° C por 72 h e pesada. A análise do teor de MOS (na amostra não fracionada) e de MOP (na fração areia + MOP) foi realizada segundo o método de Walkley-Black modificado, descrito em Tedesco et al. (1995). O teor de MOP e de MOS associada aos minerais (MOM) foi calculado através das Equações 1 e 2, respectivamente:

$$\text{MOP} = \text{MOS}_a \times P_a / 20 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{MOM} = \text{MOS} - \text{MOP} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

MOP = teor de matéria orgânica particulada do solo (g kg<sup>-1</sup>)

MOS<sub>a</sub> = teor de matéria orgânica na fração areia + MOP (g kg<sup>-1</sup>)

P<sub>a</sub> / 20 = peso da fração areia + MOP (g) obtida a partir das 20 gramas de solo

MOM = teor de matéria orgânica associada aos minerais (g kg<sup>-1</sup>)

### 3.2.3 Densidade e porosidade do solo

A coleta de amostras indeformadas de solo (Figura 2) para a determinação da densidade, da porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo, foi realizada em dezembro de 2008. Foram selecionados, nos blocos 3, 4 e 5, dentro de todas as parcelas, pontos amostrais que estivessem sob o efeito da passagem do rodado do trator (RT), rodado da colhedora (RC) e onde o solo não é trafegado (NT). Selecionados os pontos, somente em parcelas onde havia a cultura do milho, foram abertas trincheiras e coletadas três amostras indeformadas de solo por camada, na região entrelinha de semeadura, em anéis volumétricos com dimensões de 0,055 m de diâmetro e 0,03 m de altura, nas camadas de 0,02 - 0,05 m, 0,10 - 0,13 m e 0,20 - 0,23 m. As 324 amostras, assim coletadas, foram cuidadosamente envolvidas em papel alumínio e acondicionadas em latas do

mesmo material.

As amostras indeformadas foram levadas até o Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e os anéis com solo foram saturados em água destilada por 48 horas, pesados e equilibrados na tensão de 6 kPa. Após, as amostras foram colocadas em estufa a 105°C, onde foram mantidas até atingirem peso constante (72 horas). Então, de posse dos pesos saturado, seco e peso após equilíbrio na tensão de 6 kPa, foi possível a determinação da densidade, da macroporosidade, da microporosidade e porosidade total do solo, de acordo com o método descrito por EMBRAPA (1997).



**Figura 2.** Coleta de amostras indeformadas de solo para as análises físicas.

A avaliação das propriedades físicas do solo e da MOS permitiu acompanhar a evolução dessas no tempo desde a instalação do experimento, em 2002, utilizando dados obtidos por Beutler (2005) e Debiasi (2008).

### **3.2.4 Análise estatística dos dados**

A análise estatística dos dados foi realizada segundo o delineamento experimental em blocos ao acaso. A análise da variância (ANOVA) e os testes de comparação entre médias foram realizados pelo teste Tukey, com o auxílio do programa computacional SAS (SAS Institute, 2002).

Os modelos utilizados para a análise da variância (ANOVA) diferiram em função dos parâmetros avaliados. Para todos os modelos utilizados, a ANOVA foi realizada em separado para as camadas avaliadas, conforme os itens que seguem:

a) Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo:

- fator único, comparação de médias para o efeito da atuação da haste sulcadora de semeadora;

- bifatorial com parcelas subdivididas no espaço e três repetições.

Onde: parcelas principais: tipo de cobertura de inverno; subparcelas: condição de tráfego.

b) Matéria orgânica do solo e as frações particulada e associada aos minerais:

- bifatorial com parcelas subdivididas no espaço e três repetições.

Onde: parcelas principais: coberturas de inverno. subparcelas: culturas de verão antecessora a avaliação.

c) Massa seca das coberturas de inverno:

- fator único, correspondente às coberturas de inverno, com quatro repetições.

Quando a análise da variância indicou a ocorrência de interações significativas (teste F,  $p < 0,05$ ), as médias dos níveis de um fator foram comparadas dentro de outro, através do teste de Tukey com 5% de significância. Quando não houve interação e os efeitos individuais dos fatores foram significativos, as médias dos níveis de cada um deles foram comparadas separadamente, empregando-se o mesmo teste.

### **3.3 Resultados e Discussão**

#### **3.3.1 Massa seca da parte aérea das coberturas de inverno**

A Tabela 4 mostra a produção de massa seca da parte aérea das culturas de coberturas de inverno e da área em pousio (com restabelecimento natural, principalmente por gramíneas), para todos os anos de condução do

experimento avaliado. Neste período, as plantas de cobertura de inverno, em comparação ao sistema em pousio, resultaram num maior aporte de resíduos culturais. Nos anos de 2002 e 2003, não houveram diferenças significativas entre a massa seca produzida pela parte aérea da aveia preta e do consórcio aveia preta + ervilhaca. Já, nos anos de 2005 e 2006, o consórcio aveia preta + ervilhaca (presente no ano de 2005) e o nabo forrageiro (no ano de 2006, em substituição ao consórcio aveia preta + ervilhaca), produziram cerca de 3 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos a mais, em relação à aveia preta (Debiasi, 2008). A partir do ano de 2007 foi consorciada a ervilhaca com a aveia preta.

**Tabela 4.** Produção de massa seca da parte aérea das culturas de cobertura de solo no inverno.

Cobertura de inverno	Ano <sup>1</sup>					
	2002	2003	2005	2006	2008	2009
	-----Mg ha <sup>-1</sup> -----					
Aveia preta + ervilhaca ou nabo forrageiro <sup>2</sup>	6,6 a	8,5 a	11,0 a	10,3 a	8,37 a	9,45 a
Aveia preta ou aveia preta + ervilhaca <sup>3</sup>	6,6 a	8,5 a	8,6 b	7,1 b	5,02 ab	8,12 a
Pousio	4,6 b	4,7 b	4,5 c	2,4 c	3,32 b	4,5 b
CV (%)	27,0	14,6	15,1	20,8	18,1	17,9

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05). <sup>1</sup> Os dados referentes aos anos de 2002 e 2003 foram obtidos por Beutler (2005) e de 2005 e 2006, por Debiasi (2008). <sup>2</sup> Em 2006, o consórcio aveia preta + ervilhaca foi substituído pelo nabo forrageiro. <sup>3</sup> Em 2007, foi inserida a ervilhaca num sistema de cobertura para consorciar com a aveia preta.

Os resultados encontrados na Tabela 4 evidenciam o grande potencial produtivo de biomassa da parte aérea das plantas de cobertura de solo de inverno utilizadas. As produções de biomassa dessas culturas foram maiores do que as encontradas por Suhre et al. (2004), em experimento também realizado na EEA/UFRGS, onde, para o consórcio aveia preta + ervilhaca e para o nabo forrageiro, a produção foi de, respectivamente, de 3,1 e 5,9 Mg ha<sup>-1</sup>. Nos anos de 2008 e 2009 não houve diferença significativa na produção de massa seca, entre o nabo forrageiro e o consórcio aveia preta + ervilhaca. No entanto, a produção de matéria seca da parte aérea por essas

culturas foram maiores do que os resultados obtidos por Silva et al. (2007), na EEA/UFRGS, sendo respectivamente de 5,9 e 3,2 Mg ha<sup>-1</sup>, para o nabo forrageiro e aveia preta + ervilhaca. Os autores ainda encontraram, entre as diversas culturas de cobertura do solo testados, em cultivos solteiros ou consorciados, que o nabo forrageiro foi a espécie dominante com relação à produção de matéria seca. A produção de massa seca da parte aérea das plantas do sistema em pousio no inverno pode ser considerada alta, sendo aproximadamente 2 vezes superior aos resultados encontrados por Da Ros & Aita (1996).

### **3.3.2 Teor de matéria orgânica do solo e respectivas frações granulométricas**

A análise da variância demonstrou que houve interação entre os fatores culturas de coberturas de solo no inverno e culturas de verão antecedentes à amostragem, somente para a MOM e MOP nas camadas de 0,02 - 0,05 m e 0,10 - 0,13 m, respectivamente. Onde não houve interação entre os fatores avaliados, foi realizada apenas a comparação entre as médias, assim sendo, para a MOS e demais camadas avaliadas para a MOP e MOM. Para a análise da evolução dos teores de MOS, MOP e MOM, entre os anos avaliados, após a instalação do experimento, foi realizada a comparação de médias. Esses resultados são discutidos no decorrer deste item.

As culturas de cobertura de solo no inverno resultaram num maior teor de MOS na superfície do solo (0,02 - 0,05 m) comparativamente ao pousio (Tabela 5), embora sem diferença significativa entre os sistemas com aveia preta + ervilhaca e pousio. O maior teor de MOS, encontrado nos sistemas com plantas de cobertura, principalmente para o nabo forrageiro, está sendo atribuído a maior adição de resíduos provenientes da parte aérea dessas (Tabela 4), e também, ao maior aporte de material orgânico, através do sistema radicular. Há uma proporcionalidade entre a massa da parte aérea e raízes das plantas de cobertura (Beutler, 2005; Souza, 2008). A ausência de diferenças entre os teores de MOS para os sistemas com aveia + ervilhaca e pousio, está relacionado às quantidades de biomassa aérea dessas culturas (Tabela 4), e possivelmente a biomassa do sistema radicular, terem sido semelhantes no

ano de 2008. Embora o sistema radicular não tenha sido avaliado entre os anos de 2005 a 2009, Beutler (2005) na safra 2003/2004, para a mesma área experimental, verificou que a massa seca de raízes na superfície do solo (0,0 a 0,10 m) foi 31% menor para o pousio em relação às plantas de cobertura de solo. Com relação a isso, cabe destacar que o autor encontrou para o ano de 2003, uma produção de massa seca das plantas de cobertura do solo, em relação ao pousio, aproximadamente 50% superior (Tabela 4).

**Tabela 5.** Teor de matéria orgânica do solo (MOS) em função da cultura de cobertura de inverno no solo, da cultura de verão antecedente a amostragem e da camada de avaliação (junho/2009).

Camada	Cultura de verão	Cobertura de inverno			Média
		AE <sup>1</sup>	NF <sup>2</sup>	P <sup>3</sup>	
		MOS			
-----m-----		-----g kg <sup>-1</sup> -----			
0,02-0,05	Milho	40,99	41,07	32,25	<b>38,11 B</b>
	Soja	44,00	53,57	45,02	<b>47,53 A</b>
	<b>Média</b>	<b>42,50 ab</b>	<b>47,32 a</b>	<b>38,63 b</b>	
0,10-0,13	Milho	22,94	20,09	23,10	<b>22,04 A</b>
	Soja	22,23	22,13	25,18	<b>23,18 A</b>
	<b>Média</b>	<b>22,58 ab</b>	<b>21,11 b</b>	<b>24,14 a</b>	
0,20-0,23	Milho	17,95	18,32	16,28	<b>17,52 A</b>
	Soja	16,24	16,40	18,31	<b>16,98 A</b>
	<b>Média</b>	<b>17,09 a</b>	<b>17,36 a</b>	<b>17,29 a</b>	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> Consórcio aveia preta + ervilhaca; <sup>2</sup> Nabo forrageiro; <sup>3</sup> Pousio.

Outro fator que atua para o incremento de MOS, além do alto restabelecimento natural por espécies principalmente de gramíneas, no sistema em pousio (Tabela 5), é o não revolvimento da camada superficial do solo, com a prática da semeadura das plantas de cobertura, como ocorre para os demais sistemas. O sistema em pousio sofre apenas uma alteração da estrutura superficial de solo por ano, que é devida à instalação dos tratamentos

de verão, o milho e a soja, enquanto os demais sistemas têm dois revolvimentos que ocorrem na semeadura das culturas de verão e nas de inverno. Cabe ressaltar que o revolvimento do solo, durante as práticas de semeadura, por se tratar de manejo do solo com SD, se dá apenas na linha de semeadura. No entanto, para a semeadura das espécies de cobertura de inverno, grande parte do solo da camada superficial é revolvida, visto que o espaçamento utilizado entrelinhas é de 0,17 m. Assim, devido a esse revolvimento, altera-se a dinâmica do sistema superficial do solo, onde ocorrerá uma maior decomposição pelo ataque microbiano, tanto dos resíduos culturais de superfície, quanto das raízes das culturas remanescentes em decomposição. Dessa forma, acredita-se que a velocidade de decomposição microbiana dos resíduos da biomassa aérea e radicular no sistema em pousio seja menor, incrementando os teores de MOS no tempo.

Debiasi (2008), num mesmo período de avaliação ao ano de 2009 (junho), em 2006, obteve que as plantas de cobertura de inverno foram responsáveis por uma maior quantidade de MOS na camada superficial, com valor médio de  $36,95 \text{ g kg}^{-1}$  (Tabela 6). No entanto, o valor encontrado pelo autor foi menor do que o valor médio de MOS no ano de 2009, para as culturas de cobertura, que foi de  $44,91 \text{ g kg}^{-1}$ , aproximando-se dos valores encontrados para o campo nativo ( $46,90 \text{ g kg}^{-1}$ ), avaliada em área adjacente ao experimento, em 2006. Isso indica que o teor de MOS aumentou 18% em três anos, na camada superficial, para os sistemas com culturas de cobertura. O sistema em pousio também apresentou aumentos nos teores de MOS na camada superficial, passando de  $31,80 \text{ g kg}^{-1}$ , em 2006, à  $38,63 \text{ g kg}^{-1}$ , em 2009, ou seja, incremento de aproximadamente 18%, seguindo a mesma tendência dos sistemas com plantas de cobertura de inverno (Tabela 6).

A maior adição de MOS pelas plantas de cobertura de solo, na camada superficial, está sendo influenciada, em maiores proporções, pelo sistema com nabo forrageiro (Tabela 6). O nabo forrageiro foi inserido no sistema de manejo do solo no ano de 2006, em substituição a aveia preta + ervilhaca, após as análises de MOS realizadas por Debiasi (2008). O nabo forrageiro apresenta maior velocidade inicial de acúmulo de matéria fresca e seca em relação à aveia preta e à ervilhaca comum (Junior et al., 2004). Este fato, aliado ao fato de ter apresentado, em ambos os anos, maior quantidade

de biomassa aérea (Tabela 4), devem ter favorecido o maior incremento nos teores de MOS.

**Tabela 6.** Teor de matéria orgânica do solo (MOS) em função da cobertura de inverno e da camada avaliada, em junho dos anos de 2006 e de 2009.

Camada <sup>1</sup>	Cobertura de inverno <sup>2</sup>	Ano de avaliação	
		2006	2009
-----m-----		-----g kg <sup>-1</sup> -----	
	AE ou NF	35,70 a	47,32 a
	A ou AE	38,20 a	42,50 ab
0,03-0,06	P	31,80 a	38,63 b
ou	<b>Média 1</b>	<b>36,95</b>	<b>44,91</b>
0,02-0,05	<b>Média 2</b>	<b>35,23</b>	<b>42,81</b>
	CN	46,90	
	AE ou NF	18,80 a	21,11 b
	A ou AE	18,90 a	22,58 ab
0,12-0,15	P	18,20 a	24,14 a
ou	<b>Média 1</b>	<b>18,85</b>	<b>21,85</b>
0,10-0,13	<b>Média 2</b>	<b>18,63</b>	<b>22,61</b>
	CN	25,20	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas, dentro de cada camada e ano de avaliação, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> Em 2006 as avaliações foram realizadas nas camadas de 0,03 - 0,06 m e 0,12 - 0,15 m, e, em 2009 nas camadas de 0,02 - 0,05 m e 0,12 - 0,15 m;

<sup>2</sup> AE = Consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = Nabo forrageiro; A = Aveia; P = Pousio; CN = Campo nativo; Média 1 = plantas de coberturas de inverno; Média 2 = todas as coberturas de inverno. No ano de 2006 a AE foi substituída por NF e no ano de 2007 a A foi substituída por AE.

O teor de MOS foi afetado de maneira significativa pela cultura de verão antecessora à avaliação (Tabela 5), somente na camada de 0,02 - 0,05 m. Debiasi (2008), no entanto, não encontrou diferença para a MOS em função da cultura de verão. A maior quantidade de MOS se deu quando a cultura antecessora à amostragem foi a soja. Esse comportamento é explicado pela elevada taxa de decomposição dos resíduos da cultura da soja, devido a sua

baixa relação C/N, favorecendo o ataque microbiano e incrementos nos valores de MOS. Por outro lado, o milho tem uma alta relação C/N, decompondo os resíduos culturais em menor velocidade, visto que ainda encontravam-se resíduos não decompostos de milho sobre o solo, remanescentes do ano anterior, já que é realizada a rotação anual das culturas de verão. Então, quando analisado o fator cultura de verão, deve ser levado em consideração a rotação anual.

Na camada de 0,10 - 0,13 m, o teor de MOS foi significativamente inferior à de 0,02 - 0,05 m, em aproximadamente 50%, tendo sido afetado pelas coberturas de inverno (Tabela 5). Em estudos sob manejo do solo com a SD, Conceição (2006) coloca que a magnitude do incremento no teor de MOS, ocasionado pelo emprego de plantas de cobertura com elevada produção de fitomassa, é reduzida com o aumento da profundidade da camada avaliada. Isso, no entanto, é decorrente da biomassa aérea entrar em decomposição na superfície no solo, das raízes concentrarem-se preferencialmente na superfície do solo e do não revolvimento do solo, estando este restrito às linhas de semeadura em SD. Analisando a Tabela 6, verifica-se que houve incremento de MOS na camada de 0,10 - 0,13 m, em se comparando os anos de 2006 e 2009. O incremento de MOS foi de aproximadamente 18%, ou seja, aumentou na mesma proporção do que a MOS da camada superficial. E, sendo assim, torna-se indicativo de que a estrutura de solo está sendo melhorada.

As coberturas de inverno afetaram os teores de MOS na camada de 0,10 - 0,13 m no ano de 2009 (Tabela 5). O pousio ( $24,14 \text{ g kg}^{-1}$ ) e o consórcio aveia preta + ervilhaca ( $22,58 \text{ g kg}^{-1}$ ), apresentaram os maiores valores nos teores da MOS, diferindo do sistema com nabo forrageiro ( $21,11 \text{ g kg}^{-1}$ ), somente o pousio. No entanto, esses valores se aproximaram do encontrado para o campo nativo, em 2006, que foi de  $25,20 \text{ g kg}^{-1}$  (Tabela 6). O que pode estar contribuindo para o acúmulo de MOS, em profundidade, é o sistema radicular das espécies, tanto de verão quanto de inverno, e, como salientado por Souza (2008), o transporte de resíduos vegetais da superfície do solo para as camadas mais profundas, pela macro e mesofauna do solo. Este autor ainda afirma que o desenvolvimento desses organismos é pronunciado em sistemas de manejo que promovam melhorias da qualidade do solo.

O sistema em pousio agregou ao solo os maiores teores de MOS

(24,14 g kg<sup>-1</sup>) na camada de 0,10 - 0,13 m em comparação com os demais sistemas com plantas de cobertura (Tabela 5). Isso, no entanto, está diretamente relacionado ao fato da dinâmica do ambiente do sistema em pousio estar se diferenciado dos demais, tendo obtido um equilíbrio no tempo. Como já comentado anteriormente, o sistema em pousio recebe menos mobilização do solo, através da semeadura, restringindo-se apenas às culturas de verão, em comparação ao nabo forrageiro e aveia preta + ervilhaca. Por outro lado, o restabelecimento natural de espécies, no pousio, é de gramíneas, principalmente, sendo que essas têm sistema radicular mais denso, ocupando maior volume de solo, importante para a agregação. Somado a isso, o manejo do solo no sistema em pousio permaneceu o mesmo, desde 2002, ao passo que, nos demais sistemas com plantas de cobertura de solo, foram realizados em 2006 a substituição do consórcio aveia preta + ervilhaca por nabo forrageiro e, em 2007, a consorciação da ervilhaca à aveia preta. Dessa forma, o fato de o sistema em pousio não ter sofrido alteração por substituição de cobertura de inverno, ser menos mobilizado e ter apresentado aporte anual de biomassa aérea e radicular de espécies restabelecidas, conferiram ao solo um equilíbrio estrutural e com fauna capaz de transportar mais resíduos da camada superficial para camadas mais profundas do solo.

Na camada de 0,20 - 0,23 m, os teores de MOS encontrados, para todos os sistemas (Tabela 5), na média de 17,20 g kg<sup>-1</sup>, no ano de 2009, assemelharam-se aos encontrados em 2006, por Debiasi (2008), para a camada de 0,12 - 0,15 m que foi de 18,63 g kg<sup>-1</sup>(Tabela 6). Isso prova o incremento de MOS em sub-superfície no decorrer do tempo, em sistemas manejados adequadamente e visando a qualidade do solo. Os resultados comparativos entre os anos 2006 e 2009 mostram que houve aumentos consideráveis nos teores de MOS, o que alterou a dinâmica do sistema, dentro de um processo evolutivo estrutural, no tempo.

Diekow et al. (2005) citam que há um limite de acúmulo de matéria orgânica para os solos em geral. Avaliações futuras poderão afirmar se o solo avaliado chegou ao seu limite de acúmulo de matéria orgânica, por estar apresentando certa estabilidade nos valores encontrados. Bayer et al. (2000), através de simulações matemáticas baseadas em dados obtidos em um experimento de longa duração, concluíram que, sob adições de C semelhantes

às encontradas nos sistemas de rotação incluindo plantas de cobertura de inverno, como no presente trabalho, a concentração de equilíbrio da MOS, na camada de 0,0 - 0,175 m, poderá chegar a aproximadamente  $42,0 \text{ g kg}^{-1}$ .

A Tabela 7 apresenta os valores encontrados para as frações físicas que compõem a MOS, que são a MOP e a MOM, em 3 camadas de solo. A MOM teve a maior participação, em termos percentuais, para os valores de MOS, em relação a MOP. Esses dados estão de acordo com Salton et al. (2005) os quais verificaram que entre 77% e 93% do carbono orgânico total estava na fração associada aos minerais do solo e entre 7% e 25% do carbono orgânico total estava na fração particulada não associada. O alto teor de MOM se deve à intimidade das interações, de proteção física e química, estabelecidas e que minimizam a decomposição da MOS, determinando o seu tempo de residência. A proteção do carbono orgânico está relacionada com a argila do solo (Resende et al., 1997). A argila protege a decomposição do carbono orgânico do solo através de dois mecanismos: a interação química do carbono orgânico do solo com a superfície das partículas de argila e oclusão física do material orgânico na matriz dos agregados do solo (Hassink & Whitmore, 1997).

Com relação aos efeitos das coberturas de inverno e das culturas de verão, antecessoras à amostragem realizada em junho de 2009, sobre as frações físicas que compõem a MOS, a Tabela 7 mostra que houve interação significativa para a MOM na camada de 0,02 - 0,05 m e para a MOP na camada de 0,10 - 0,13 m. Avaliando-se os efeitos das coberturas sobre o teor de MOP, os dados apresentados na Tabela 7 indicam que o teor de MOP, na camada de 0,02 - 0,05 m, foi semelhante entre os sistemas de manejo incluindo a cobertura de inverno. Entretanto houve tendência de apresentar-se maior nos sistemas de manejo com as plantas de cobertura de inverno, ou seja, para o nabo forrageiro ( $10,88 \text{ g kg}^{-1}$ ) e aveia + ervilhaca ( $9,69 \text{ g kg}^{-1}$ ), em relação ao pousio ( $9,45 \text{ g kg}^{-1}$ ). Isso está de acordo com os resultados encontrados para os teores de MOS na camada superficial do solo (0,02 – 0,05 m), onde foram maiores na presença de plantas de cobertura de inverno (Tabela 5).

**Tabela 7.** Matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOM) em função da cobertura de solo no inverno, da cultura de verão antecedente a amostragem e da camada de avaliação (junho/2009).

Camada	Cultura de verão	Cobertura de inverno			Média
		AE <sup>1</sup>	NF <sup>2</sup>	P <sup>3</sup>	
<b>MOP</b>					
-----m-----		-----g kg <sup>-1</sup> -----			
	M	9,59	9,41	9,23	<b>9,41 A</b>
0,02-0,05	S	9,80	12,34	9,68	<b>10,61 A</b>
	<b>Média</b>	<b>9,69 a</b>	<b>10,88 a</b>	<b>9,45 a</b>	
	M	1,77 ab	1,19 b	2,26 a	<b>1,74 A</b>
0,10-0,13	S	1,30 b	1,97 b	2,99 a	<b>2,09 A</b>
	<b>Média</b>	<b>1,53 b</b>	<b>1,58 ab</b>	<b>2,63 a</b>	
	M	1,03	1,05	0,57	<b>0,88 A</b>
0,20-0,23	S	0,81	0,56	0,95	<b>0,77 A</b>
	<b>Média</b>	<b>0,93 a</b>	<b>0,81 a</b>	<b>0,76 a</b>	
<b>MOM</b>					
-----m-----		-----g kg <sup>-1</sup> -----			
	M	31,41 A	31,66 B	23,02 B	<b>28,70 A</b>
0,03-0,06	S	34,20 A	41,22 A	35,34 A	<b>36,92 A</b>
	<b>Média</b>	<b>32,81 ab</b>	<b>36,44 a</b>	<b>29,18 b</b>	
	M	21,17	18,90	20,83	<b>20,30 A</b>
0,10-0,13	S	20,93	20,17	22,18	<b>21,09 A</b>
	<b>Média</b>	<b>21,05 ab</b>	<b>19,53 b</b>	<b>21,51 a</b>	
	M	16,91	17,28	15,70	<b>16,63 A</b>
0,20-0,23	S	15,42	15,83	17,36	<b>16,20 A</b>
	<b>Média</b>	<b>16,16 a</b>	<b>16,55 a</b>	<b>16,53 a</b>	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

<sup>1</sup> Consórcio aveia preta + ervilhaca; <sup>2</sup> Nabo forrageiro; <sup>3</sup> Pousio.

Como já evidenciado anteriormente, para a camada de 0,10 – 0,13 m, houveram interações significativas entre as coberturas de inverno e culturas de verão, para a MOP (Tabela 7). As coberturas de inverno afetaram os valores

de MOP para uma mesma cobertura de verão. Quando a cultura de verão antecessora à amostragem foi o milho, a cobertura de inverno que apresentou maior teor de MOP foi o pousio ( $2,26 \text{ g kg}^{-1}$ ), igualando-se a aveia preta + ervilhaca ( $1,77 \text{ g kg}^{-1}$ ) que diferiu do sistema com nabo forrageiro ( $1,19 \text{ g kg}^{-1}$ ). Já, quando a cultura de verão foi a soja, novamente, o maior teor de MOP foi do sistema em pousio ( $2,99 \text{ g kg}^{-1}$ ) que diferiu da aveia preta + ervilhaca ( $1,30 \text{ g kg}^{-1}$ ) e do nabo forrageiro ( $1,97 \text{ g kg}^{-1}$ ).

Os teores de MOP (Tabela 7) seguiram a mesma tendência de aumento dos teores de MOS (Tabela 5), no entanto, em maiores proporções relativas. Mesmo na média dos tratamentos, o maior valor de MOP apresentado para o pousio, aparentemente é devido o estado estável da estrutura do solo (Vezzani, 2001), que será melhor discutido no item densidade e porosidade do solo.

A interação entre as culturas de cobertura e as culturas de verão antecessoras a amostragem foram significativas na camada superficial para a MOM (Tabela 7). O fator cultura de verão influenciou nos valores de MOM para o nabo forrageiro e pousio, sendo que, nestes sistemas, os maiores teores foram obtidos quando da presença da soja, antecedendo a amostragem. No entanto, o efeito da cultura de verão nos teores de MOM não pode ser considerado isoladamente, ao passo que há a rotação anual das culturas de verão, de forma que, no ano antecedente, havia milho no sistema.

A Tabela 8 evidencia o aumento pronunciado nos teores de MOP entre os anos 2006 e 2009, para todos os sistemas de cobertura do solo, na camada superficial, e na camada de 0,10 – 0,13 m, em torno de 40%. Considerando que, os aumentos no teores de MOS, nessas camadas, entre 2006 e 2009, foi em média 18% (Tabela 6), isso indica um aumento relativo nos estoques de carbono orgânico particulado (COP) maiores que no COT, demonstrando que a fração lábil da MOS foi mais sensível às mudanças do manejo do que a MOS, confirmando as conclusões já obtidas por Debiasi (2008) e Conceição et al. (2005). Bayer et al. (2004) citam que há maior sensibilidade do estoque de C na MOP devido às alterações no manejo em comparação ao estoque de COT.

Os teores de MOM foram afetados pelos sistemas de cobertura de inverno, nas duas primeiras camadas de solo avaliadas (Tabela 7). Debiasi

(2008), em avaliações no ano de 2006, atribuiu o aumento na concentração de MOS exclusivamente ao incremento no teor da sua fração particulada, pois a MOM não havia sido significativamente afetada pelas coberturas de inverno (Tabela 8). As adições de resíduos proporcionadas pelas coberturas de inverno, no tempo, implicaram sobre o aumento nos teores de MOM. Isso foi também detectado por Conceição (2006), em um experimento de longa duração.

**Tabela 8.** Matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOM) em função da cobertura de solo no inverno, em junho dos anos de 2006 e de 2009.

Camada <sup>1</sup>	Cobertura de inverno <sup>2</sup>	Matéria orgânica			
		MOP		MOM	
		2006	2009	2006	2009
-----m-----		-----g kg <sup>-1</sup> -----			
	AE ou NF	6,30 b	10,88 a	29,40 a	36,44 a
	A ou AE	7,90 a	9,69 a	30,30 a	32,81 a
0,03-0,06	P	3,70 b	9,45 a	28,10 a	29,18 b
ou	<b>Média 1</b>	<b>7,10</b>	<b>10,29</b>	<b>29,85</b>	<b>34,63</b>
0,02-0,05	<b>Média 2</b>	<b>6,00</b>	<b>10,00</b>	<b>29,30</b>	<b>32,81</b>
	CN	12,6		34,3	
	AE ou NF	1,4 a	1,58 ab	17,40 a	19,53 b
	A ou AE	0,9 a	1,53 b	18,00 a	21,05 ab
0,10-0,13	P	1,0 a	2,63 a	17,20 a	21,51 a
ou	<b>Média 1</b>	<b>1,15</b>	<b>1,55</b>	<b>17,70</b>	<b>20,59</b>
0,12-0,15	<b>Média 2</b>	<b>1,10</b>	<b>1,91</b>	<b>17,53</b>	<b>20,70</b>
	CN	3,3		21,9	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas, dentro de cada camada e ano de avaliação, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> Em 2006 as avaliações foram realizadas nas camadas de 0,03 - 0,06 m e 0,12 - 0,15 m, e, em 2009 nas camadas de 0,02 - 0,05 m e 0,12 - 0,15 m;

<sup>2</sup> AE = Consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = Nabo forrageiro; A = Aveia; P = Pousio; CN = Campo nativo; Média 1 = culturas de coberturas de inverno; Média 2 = todas as coberturas de inverno. No ano de 2006 a AE foi substituída por NF e no ano de 2007 a A foi substituída por AE.

### 3.3.3 Densidade e porosidade do solo

A análise da variância indicou interação significativa entre os fatores estudados (coberturas de inverno e condição de tráfego) para a densidade do solo (Ds), nas camadas de 0,02 - 0,05 m e de 0,10 - 0,13 m (Tabela 9). Na camada superficial a interação foi significativa para a cobertura de inverno, somente para o nabo forrageiro, e para as condições de tráfego. As regiões de solo não tráfegadas, dentro dos sistemas com nabo forrageiro apresentaram as menores Ds ( $1,09 \text{ Mg m}^{-3}$ ), embora se iguale estatisticamente às regiões tráfegadas por rodado de trator ( $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ ), o qual não diferiu do solo tráfegado por colhedora ( $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ ), sendo esta a maior Ds encontrada.

**Tabela 9.** Densidade do solo (Ds) em função da cobertura de solo no inverno, do tráfego e da camada de avaliação (dezembro, 2008).

Camada	Tráfego <sup>1</sup>	Cobertura de inverno <sup>2</sup>			Média
		AE	NF	P	
		<b>Ds</b>			
-----m-----		-----Mg m <sup>-3</sup> -----			
0,02-0,05	RC	1,32 A	1,40 A	1,36 A	<b>1,36 A</b>
	NT	1,24 A	1,09 B	1,25 A	<b>1,19 B</b>
	RT	1,36 A	1,30AB	1,33 A	<b>1,33 A</b>
	<b>Média</b>	<b>1,31 a</b>	<b>1,26 a</b>	<b>1,31 a</b>	
0,10-0,13	RC	1,71 a	1,60 ab	1,49 b	<b>1,60 A</b>
	NT	1,55 a	1,44 a	1,51 a	<b>1,51 B</b>
	RT	1,63 a	1,62 a	1,51 a	<b>1,59 AB</b>
	<b>Média</b>	<b>1,63 a</b>	<b>1,55 ab</b>	<b>1,51 b</b>	
0,20-0,23	RC	1,70	1,69	1,60	<b>1,66 A</b>
	NT	1,62	1,67	1,67	<b>1,65 A</b>
	RT	1,61	1,68	1,67	<b>1,65 A</b>
	<b>Média</b>	<b>1,64 a</b>	<b>1,68 a</b>	<b>1,64 a</b>	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> RC = rodados de colhedora; NT = não tráfegado; RT = rodados de trator.

<sup>2</sup> AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = nabo forrageiro; P = pousio.

Analisando os valores médios de Ds, para a camada de 0,02 - 0,05 m (Tabela 9), verifica-se que as regiões de solo que não receberam tráfego, apresentaram a menor Ds (1,19 Mg m<sup>-3</sup>). Por outro lado, para as regiões de solo trafegadas, seja por trator ou colhedora, a média dos valores de Ds foi de 1,33 e 1,36 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Estes valores, no entanto, estão abaixo dos valores de Ds críticos estabelecidos por Reichert et al. (2003), que para a classe textural do solo desta pesquisa é em torno de 1,45 Mg m<sup>-3</sup>. Debiasi (2008), em avaliações no ano de 2006, na mesma época de avaliação para a pesquisa atual, para camadas superficiais de solo, nas regiões não trafegadas e trafegadas, encontrou respectivamente, valores de Ds em torno de 1,34 e 1,43 Mg m<sup>-3</sup>. Isso quer dizer que, em dois anos, houveram reduções significativas de Ds para a camada superficial, estando principalmente relacionado ao manejo de solo com plantas de cobertura, que agiram incrementando os valores de MOS, como já discutido no item anterior.

Na camada de 0,10 - 0,13 m, a interação foi significativa somente para o tráfego de colhedora e as coberturas de inverno (Tabela 9), de forma que a região de solo, trafegada por colhedora, apresentou a maior Ds quando a cobertura de inverno foi o consórcio aveia preta + ervilhaca (1,71 Mg m<sup>-3</sup>), não diferindo do sistema com nabo forrageiro (1,60 Mg m<sup>-3</sup>), o qual foi semelhante ao sistema em pousio (1,49 Mg m<sup>-3</sup>). Entretanto, na média, os maiores valores de Ds, para a camada de 0,10 - 0,13 m, foram encontrados nas regiões de solo trafegadas por colhedora e trator, respectivamente de 1,60 e 1,59 Mg m<sup>-3</sup>, diferindo do solo não trafegado (1,51 Mg m<sup>-3</sup>). Em comparação com dados obtidos por Debiasi (2008), no ano de 2006, de Ds em solo não trafegado, o autor encontrou 1,59 Mg m<sup>-3</sup>, o qual não diferiu da Ds em solo trafegado que foi de 1,60 Mg m<sup>-3</sup>. Dessa forma evidencia-se que em dois anos, reduziram os valores de Ds, na camada de 0,10 - 0,13 m, somente para as regiões de solo não trafegadas. Cabe ressaltar que Debiasi (2008), em avaliações no ano de 2006, utilizou a camada de 0,12 - 0,15 m; porém acredita-se que não haja variações significativas, nos valores de Ds, dessa camada para a utilizada nas avaliações em 2008 da presente pesquisa (0,10 - 0,13 m), podendo assim os dados serem comparados. Também é importante destacar que a camada de avaliação de 0,10 - 0,13 m foi escolhida em função da profundidade de atuação da haste sulcadora, para verificar o seu efeito sobre as propriedades físicas do

solo. Por outro lado, Reichert et al. (2003) evidenciam que a compactação do solo, em semeadura direta, normalmente se concentra de 0,08 até 0,15 m. Dessa forma, a camada de 0,10 - 0,13 m é também representativa do efeito dos rodados de máquinas sobre o solo.

A cobertura de inverno afetou de maneira significativa os valores de  $D_s$  para a camada de 0,10 - 0,13 m (Tabela 9). A menor  $D_s$  foi obtida para o sistema em pousio ( $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ ), a qual não diferiu do sistema com nabo forrageiro ( $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Esperava-se um comportamento ao contrário, tal que as culturas de cobertura de inverno atingissem menores  $D_s$ . No entanto, os dados estão de acordo com os valores de MOS e MOP, sendo esta, sensível em detectar diferenças proporcionadas pelo manejo do solo (Conceição et al., 2005). Tanto a MOS, quanto a MOP foram maiores no sistema em pousio, para a camada de 0,10 - 0,13 m, e assim, correlacionando-se inversamente com os resultados de  $D_s$ . Incrementos nos valores de MOS e sobre sua fração particulada, resultaram em decréscimos da  $D_s$ .

Um fator, que aparentemente está relacionado à redução da  $D_s$  e no aumento nos teores de MOS e de suas frações no sistema em pousio, melhor visualizado na camada sub-superficial (0,10 - 0,13 m), é o estado estável da estrutura do solo (Vezzani, 2001). Esse estado estável é alcançado em resposta as práticas de manejo do solo, no tempo, onde há um balanço constante entre a magnitude dos processos que resultam na degradação e aqueles que proporcionam a construção da estrutura (Vezzani, 2001). Dessa forma, alterações em fatores externos, como nas práticas de manejo, tendem a levar a um novo estado de estabilidade, em função da modificação da estrutura do solo. Na presente pesquisa houveram duas modificações no manejo, envolvendo as culturas de cobertura do solo. No ano de 2006, houve a substituição do consórcio aveia preta + ervilhaca pelo nabo forrageiro (Debiasi, 2008) e no ano de 2007, a consorciação da ervilhaca à aveia preta. Então, acredita-se que em função disso, mais especificamente em função do tempo decorrido desde a inclusão desses novos sistemas com culturas de cobertura, talvez o solo não tenha ainda atingido um novo estado de equilíbrio. Reflexo disso está na resposta às maiores  $D_s$  e menores teores de MOS e de suas frações, dos sistemas com culturas de cobertura, em relação ao pousio, na camada de 0,10 - 0,13 m. Por outro lado, o sistema em pousio, desde a

instalação do experimento, em 2002, até o presente momento, não sofreu nenhuma alteração de manejo.

Tabela 10 mostra que a profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora, durante a semeadura das culturas de verão, não interferiu sobre a Ds e a porosidade do solo. Esse fato foi atribuído ao local onde foram realizadas as amostragens de solo para as análises físicas, que como já evidenciado anteriormente, ocorreu fora da linha de semeadura, embora em regiões afetadas pelo tráfego de trator ou colhedora, ou fora destas (solo não trafegado). Por esse motivo, acredita-se que a mobilização de solo da haste sulcadora interfira nas propriedades físicas da linha de semeadura, e não no restante do solo.

**Tabela 10.** Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo em função da profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora-adubadora (dezembro, 2008).

Camada (m)	Profundidade do sulcador (m)		CV (%)
	12	21	
	<b>Densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>)</b>		
0,02 – 0,05	1,32 A	1,28 A	14,92
0,10 – 0,13	1,55 A	1,56 A	10,81
0,20 – 0,23	1,64 A	1,66 A	4,87
	<b>Macroporosidade (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</b>		
0,02 – 0,05	0,28 A	0,27 A	28,90
0,10 – 0,13	0,18 A	0,18 A	38,76
0,20 – 0,23	0,12 A	0,12 A	31,85
	<b>Microporosidade(m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</b>		
0,02 – 0,05	0,27 A	0,26 A	11,95
0,10 – 0,13	0,28 A	0,28 A	9,71
0,20 – 0,23	0,28 A	0,28 A	5,41
	<b>Porosidade total (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)</b>		
0,02 – 0,05	0,54 A	0,56 A	12,42
0,10 – 0,13	0,45 A	0,43 A	15,67
0,20 – 0,23	0,41 A	0,39 A	8,70

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).  
CV = Coeficiente de variação.

Não houve interação significativa entre os fatores tráfego e cobertura de inverno para a camada de 0,20 - 0,23 m e nem diferenças entre as médias dos tratamentos (tráfego ou cobertura de inverno) (Tabela 9). Isso indica que a maior  $D_s$  dessa camada, em relação às duas camadas mais superficiais avaliadas, pode estar relacionada ao adensamento natural das partículas do solo, não sendo reflexo das práticas de manejo, tal como ocorreu para as demais camadas do solo.

A análise de variância não indicou interação significativa para a condição de tráfego e cobertura de inverno para a porosidade total (Pt), em nenhuma das camadas avaliadas (Tabela 11). Dessa forma, somente será feita a comparação de médias. A condição de tráfego alterou a Pt, de forma que maiores valores de Pt foram encontrados, em se considerando as duas primeiras camadas avaliadas, para o solo não trafegado, embora tenham se igualado estatisticamente a outras condições de tráfego, apresentando, assim, comportamento inverso ao da  $D_s$ .

A camada de 0,02 - 0,05 m apresentou a maior Pt (Tabela 11) com valor médio de  $0,57 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  no solo não trafegado, sendo este valor maior do que o encontrado por Debiasi (2008), no ano de 2006, que foi de  $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , representando um incremento de aproximadamente 16% na porosidade do solo em dois anos. Já, no ano de 2006, a Pt do solo com tráfego foi de  $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , e, portanto menor do que os valores médios encontrados na presente pesquisa ( $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Em 2002, a Pt encontrada por Beutler (2005) foi de  $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Com isso fica nítida a evolução nos valores de Pt com o tempo, e, conseqüentemente, a melhora da estrutura do solo.

Na camada de 0,10 - 0,13m, a Pt foi influenciada pela cobertura de solo, de forma que os maiores valores foram encontrados para o sistema em pousio e para o nabo forrageiro (Tabela 11). Isso está de acordo também com os valores de  $D_s$ , ou seja, quando foi menor a  $D_s$ , a Pt foi maior. Em se considerando o tráfego, a maior Pt foi obtida para o solo não trafegado, embora igual estatisticamente ao tratamento com o tráfego de colhedora, que foi de  $0,44 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Em 2006, Debiasi (2008) encontrou valor de Pt, tanto para solo trafegado ou não, de  $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Isso indica o incremento de poros no solo, mesmo em maiores profundidades, o que pode ser melhor visualizado na camada de 0,20 - 0,23 m, a qual teve Pt maior (em média  $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) do que

aqueles encontrados no ano de 2006 em profundidade menor.

**Tabela 11.** Porosidade total do solo em função da cobertura de inverno, do tráfego e da camada de avaliação (dezembro, 2008).

Camada	Tráfego <sup>1</sup>	Cobertura de inverno <sup>2</sup>			Média
		AE	NF	P	
		Porosidade total			
-----m-----		-----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----			
0,02-0,05	RC	0,53	0,52	0,54	<b>0,53 B</b>
	NT	0,59	0,58	0,55	<b>0,57 A</b>
	RT	0,53	0,54	0,55	<b>0,54 AB</b>
	<b>Média</b>	<b>0,55 a</b>	<b>0,55 a</b>	<b>0,55 a</b>	
0,10-0,13	RC	0,40	0,44	0,48	<b>0,44 AB</b>
	NT	0,46	0,50	0,46	<b>0,47 A</b>
	RT	0,40	0,42	0,46	<b>0,43 B</b>
	<b>Média</b>	<b>0,42 b</b>	<b>0,46 a</b>	<b>0,46 a</b>	
0,20-0,23	RC	0,40	0,38	0,43	<b>0,41 A</b>
	NT	0,42	0,40	0,39	<b>0,40 A</b>
	RT	0,40	0,39	0,41	<b>0,40 A</b>
	<b>Média</b>	<b>0,40 a</b>	<b>0,39 a</b>	<b>0,41 a</b>	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> RC = rodados de colhedora; NT = não trafegado; RT = rodados de trator.

<sup>2</sup> AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = nabo forrageiro; P = pouso.

Com relação à macroporosidade (MAC) do solo (Tabela 12), a análise de variância indicou interação significativa para a condição de tráfego e cobertura de inverno, na camada de 0,10 - 0,13 m. No entanto a interação somente foi significativa para condição de tráfego no sistema com nabo forrageiro como cobertura. Com relação a isso, a MAC foi maior ( $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) na condição de solo não trafegado, embora não diferiu significativamente para o tráfego de colhedora ( $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), os quais diferiram do tráfego de trator ( $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Isso está de acordo com os dados de Pt e Ds, onde na condição de solo não trafegado, a primeira foi maior e a segunda menor.

**Tabela 12.** Macroporosidade do solo em função da cobertura de inverno, do tráfego e da camada de avaliação (dezembro, 2008).

Camada	Tráfego <sup>1</sup>	Cobertura de inverno <sup>2</sup>			Média
		AE	NF	P	
		Macroporosidade			
-----m-----		----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----			
0,02-0,05	RC	0,24	0,25	0,25	<b>0,24 B</b>
	NT	0,32	0,34	0,31	<b>0,32 A</b>
	RT	0,25	0,27	0,27	<b>0,26 B</b>
	<b>Média</b>	<b>0,27 a</b>	<b>0,28 a</b>	<b>0,28 a</b>	
0,10-0,13	RC	0,12 A	0,17AB	0,21 A	<b>0,18 B</b>
	NT	0,19 A	0,25 A	0,20 A	<b>0,21 A</b>
	RT	0,13 A	0,15 B	0,19 A	<b>0,16 B</b>
	<b>Média</b>	<b>0,15 b</b>	<b>0,19 a</b>	<b>0,20 a</b>	
0,20-0,23	RC	0,13	0,09	0,15	<b>0,12 A</b>
	NT	0,13	0,12	0,11	<b>0,12 A</b>
	RT	0,12	0,12	0,12	<b>0,12 A</b>
	<b>Média</b>	<b>0,12 a</b>	<b>0,11 a</b>	<b>0,13 a</b>	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> RC = rodados de colhedora; NT = não trafegado; RT = rodados de trator.

<sup>2</sup> AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = nabo forrageiro; P = pousio.

Comparando-se as médias (Tabela 12), para as duas primeiras camadas avaliadas, a MAC foi maior na condição de solo não trafegado. Na camada de 0,02 - 0,05 m a MAC em solo não trafegado foi de  $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Em 2006, Debiasi encontrou valor de MAC, para essa mesma condição, de  $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e Beutler (2005), antes da instalação do experimento (2002), valor de MAC de  $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Já, nas condições de solo trafegado, o valor médio de MAC encontrado na presente pesquisa foi de  $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , contrastando também com a MAC em 2006 que foi de  $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Na camada de 0,10 - 0,13 m, a maior MAC ( $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) foi obtida na condição de solo não trafegado. No solo trafegado, seja ele por trator ou colhedora o valor médio de MAC foi de  $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Entretanto, nessas duas condições, os valores foram maiores do que os obtidos em 2006, para solo sem e com tráfego, que foram de, respectivamente,

0,11 e 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Para a camada de 0,20 - 0,23 m, os resultados foram semelhantes aos obtidos em 2006, para profundidades menores.

A cobertura de inverno influenciou na MAC, somente para a camada de 0,10 - 0,13 m, onde a menor MAC foi obtida para a cobertura de inverno com aveia preta + ervilhaca (Tabela 12). Isto, no entanto, está de acordo com os valores obtidos para Ds e Pt, onde um aumento do primeiro diminuiu o segundo, com repercussões sobre a diminuição da MAC. Para as demais camadas avaliadas, a cobertura de inverno não afetou valores de MAC.

A microporosidade (MIC) não foi afetada pelas coberturas de inverno, em ambas as camadas avaliadas, conforme apresentado na Tabela 13.

**Tabela 13.** Microporosidade do solo em função da cobertura de inverno, do tráfego e da camada de avaliação (dezembro, 2008).

Camada	Tráfego <sup>1</sup>	Cobertura de inverno <sup>2</sup>			Média
		AE	NF	P	
		<b>Microporosidade</b>			
-----m-----		----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----			
0,02-0,05	RC	0,29	0,28	0,29	<b>0,29 A</b>
	NT	0,27	0,24	0,25	<b>0,25 B</b>
	RT	0,28	0,27	0,28	<b>0,28 A</b>
	<b>Média</b>	<b>0,28 a</b>	<b>0,26 a</b>	<b>0,27 a</b>	
0,10-0,13	RC	0,28	0,38	0,27	<b>0,31 A</b>
	NT	0,27	0,25	0,26	<b>0,26 A</b>
	RT	0,26	0,27	0,28	<b>0,27 A</b>
	<b>Média</b>	<b>0,27 a</b>	<b>0,30 a</b>	<b>0,27 a</b>	
0,20-0,23	RC	0,27	0,28	0,28	<b>0,28 A</b>
	NT	0,29	0,28	0,28	<b>0,28 A</b>
	RT	0,27	0,28	0,30	<b>0,28 A</b>
	<b>Média</b>	<b>0,28 a</b>	<b>0,28 a</b>	<b>0,29 a</b>	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05).

<sup>1</sup> RC = rodados de colhedora; NT = não trafegado; RT = rodados de trator.

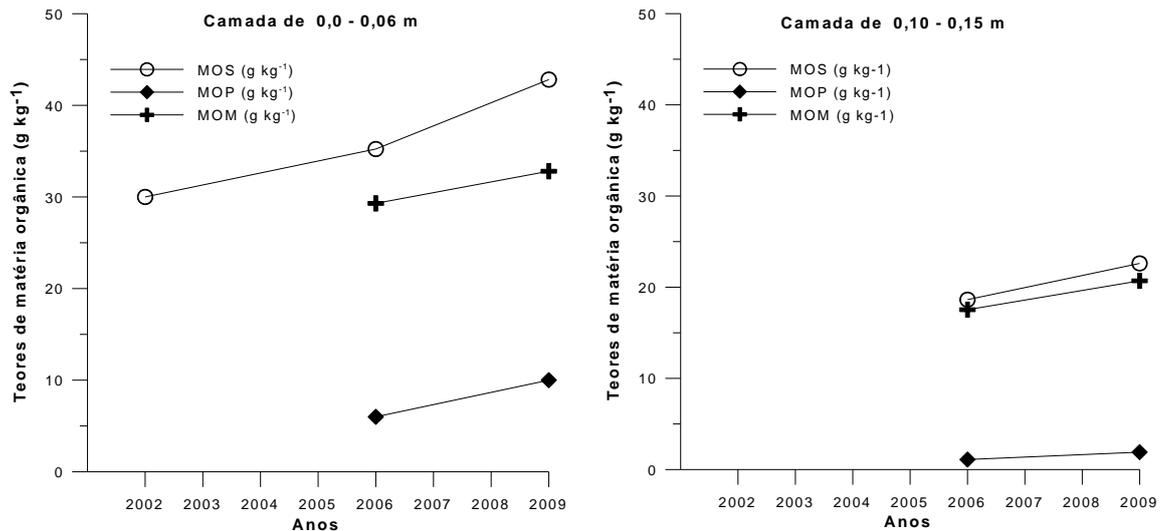
<sup>2</sup> AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = nabo forrageiro; P = pousio.

Os valores de MIC da Tabela 13, semelhantes entre as camadas e os manejos de solo utilizados, comprovam que o incremento no volume de MAC (Tabela 12), colaborou sobre a redução da Ds e no aumento da Pt, estando isso relacionado ao manejo do solo, principalmente pela cobertura do solo. A mesma tendência foi relatada por Debiasi (2008), na mesma área experimental. No entanto, para a presente pesquisa, os valores de Pt e MAC foram maiores aos encontrados em anos anteriores, indicando evolução no processo de recuperação da estrutura do solo e assim a melhor qualidade física.

Houve incremento da MIC, para a camada superficial, em solo trafegado (Tabela 13). Isso está de acordo com a redução da MAC em igual situação. A MIC, independentemente do tratamento, apresentou valores similares aos observados antes da implantação do experimento, em 2002, e aos obtidos em 2006 (Tabelas 2 e 3). Tal fato evidencia que o aumento na Pt e a conseqüente redução na Ds em relação ao início do experimento e depois em 2006, ocorreram mediante o incremento no volume de macroporos.

Dessa forma, as avaliações dos parâmetros físicos e de matéria orgânica realizadas nesta pesquisa e a comparação com os resultados obtidos anteriormente a ela por Beutler (2005) e Debiasi (2008), na mesma área experimental, mostraram que o sistema de manejo adotado, visando à recuperação da estrutura do solo degradada pela compactação, foi eficaz. Os valores encontrados para os parâmetros avaliados determinaram a evolução da estrutura do solo. Isso pode ser visualizado resumidamente pelas Figuras 3 e 4. Essas, são o resultado da análise conjunta dos dados apresentados e discutidos até o momento.

A Figura 3 mostra os teores médios de MOS e de suas frações, nos anos avaliados e em duas camadas de solo. Como já discutido, houve evolução positiva no incremento dos teores de MOS e de suas frações (MOP e MOM) com o tempo. E, esse processo ocorreu para as duas camadas de solo apresentadas, embora mais pronunciado para a camada superficial (0 - 0,06 m).

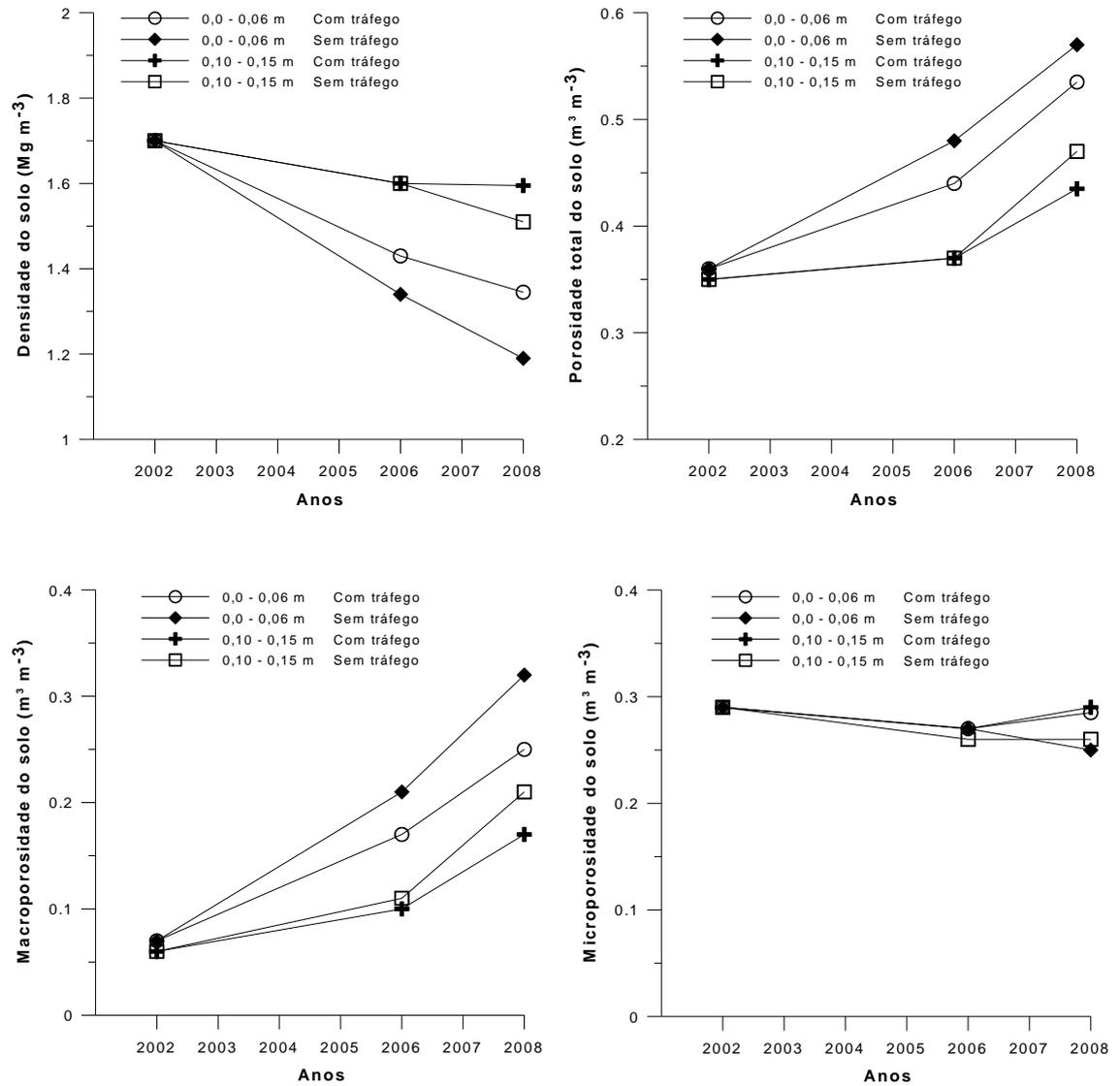


**Figura 3.** Evolução, com o tempo, dos teores de matéria orgânica do solo e de suas frações, em duas camadas de solo (0,0 – 0,06 m e 0,10 – 0,15 m).

A Figura 4 mostra o comportamento da Ds, Pt, MAC e MIC, em duas camadas de solo e em duas situações de tráfego (com e sem), com o tempo. A Ds, com o tempo, apresentou valores decrescentes nas duas situações de tráfego e camadas. O solo não trafegado apresentou as maiores reduções de Ds, em comparação ao solo trafegado.

A Pt e a MAC apresentaram comportamento semelhante, com valores crescentes no decorrer do tempo (Figura 4). Entretanto, este comportamento da Pt e da MAC foi inverso ao da Ds. Considerando a mesma camada avaliada, conforme indica a Figura 4, o solo não trafegado incrementou os valores de Pt e MAC, em comparação ao solo que recebeu tráfego de rodados de maquinários agrícolas. A MIC não apresentou a mesma tendência de comportamento da Pt e da MAC (Figura 4), mantendo-se mais estável no decorrer do tempo. Entretanto visualiza-se um pequeno incremento da MIC no solo trafegado, nas duas camadas avaliadas, para o ano de 2008 em relação aos anos anteriores, o que é reflexo da menor MAC.

Perante as observações do comportamento dos parâmetros físicos e de matéria orgânica do solo e de suas frações particulada e associada as minerais, considerou-se que houve evolução da estrutura do solo com o tempo. Isso, no entanto, foi reflexo do manejo de solo utilizado.



**Figura 4.** Evolução, com o tempo, da densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade do solo, em duas situações de tráfego de rodados de maquinários (com e sem) e em duas camadas de solo (0,0 – 0,06 m e 0,10 – 0,15 m).

### 3.4 Conclusões

1. O sistema de manejo do solo com a semeadura direta e a utilização de plantas de cobertura de solo no inverno, recuperou a estrutura física do solo degradado, em sete anos. Isso foi verificado a partir do estudo evolutivo de parâmetros indicadores de qualidade do solo que foram a matéria orgânica do solo e suas frações particulada e associada aos minerais, a

densidade e a porosidade do solo. Houve aumento nos teores de matéria orgânica do solo e de suas frações, com o tempo, o que influenciou diretamente sobre a diminuição dos valores de densidade e no aumento da macroporosidade e da porosidade total do solo;

2. O tráfego controlado, associado ao manejo do solo com a semeadura direta e a utilização de plantas de cobertura de solo no inverno, acelerou a recuperação física da estrutura do solo degradado. Isso foi verificado a partir do estudo dos parâmetros físicos do solo. A densidade do solo foi menor no solo não trafegado por rodados de máquinas agrícolas. Consequentemente, nesta situação, a porosidade total e a macroporosidade do solo foram maiores;

3. As diferentes profundidades de atuação das hastes sulcadoras da semeadora (0,12 m e 0,21 m) não influenciaram sobre os parâmetros físicos do solo avaliados (densidade e porosidade do solo). Entretanto, a utilização de maiores profundidades de atuação das hastes sulcadoras da semeadora, como essas utilizadas na pesquisa, conjuntamente ao manejo do solo com a semeadura direta, utilização de plantas de cobertura do solo e o tráfego controlado, acelerou a recuperação física do solo, principalmente através do rompimento das camadas compactadas na linha de semeadura;

4. Os parâmetros físicos densidade e a porosidade do solo foram sensíveis às mudanças do manejo do solo, bem como a fração lábil (particulada) da matéria orgânica do solo. Sendo assim, são bons indicadores da qualidade do solo.

## **4. CAPÍTULO III. COMPORTAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DE UM ARGISSOLO SUBMETIDO A PRÁTICAS DE MANEJO MELHORADORAS DA SUA ESTRUTURA**

### **4.1 Introdução**

No decorrer do tempo, o manejo adequado de solos fisicamente degradados pode determinar uma estrutura com dinâmica alterada e com qualidade para propiciar sustentabilidade aos sistemas agrícolas. A compactação compromete os processos físicos ocorrentes no solo, os quais determinam o bom funcionamento da relação solo-planta-atmosfera. A redução de volume do solo (Hillel, 1982), ocasionada pela compactação, está diretamente relacionada à alteração da sua porosidade e, conseqüentemente, na quantidade e continuidade de poros, o que interfere sobre o armazenamento, transporte e disponibilidade de água às plantas, e no fluxo de gases no solo (Peth & Horn, 2006). Dessa forma, solos que apresentam compactação, seja ela oriunda do pisoteio animal e/ou do tráfego de máquinas em semeadura direta, com grau de severidade para proporcionar danos ao sistema agrícola, requerem manejo adequado de forma a promover a reestruturação física do solo para assim cumprir as suas funções perante a sustentabilidade do agroecossistema.

A qualidade do solo tem merecido destaque nos assuntos que tangem à pesquisa em Ciência do Solo e, por sua vez, é obtida quando o solo desempenha adequadamente suas funções (Karlen et al., 1997). Ao tratar-se da qualidade física do solo, é notório um número grande de fatores que a influencia. Esses fatores físicos decorrem da estrutura do solo, devendo serem

estudados e compreendidos dentro do sistema solo-planta, uma vez que atuam conjuntamente sobre os processos ocorrentes. Streck (2007) cita que a qualidade física do solo se manifesta na infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, na resposta ao manejo e na resistência à degradação, na ocorrência das trocas de calor e de gases com a atmosfera e com as raízes das plantas e no crescimento das raízes.

O estudo do comportamento de parâmetros físico-hídricos é importante na indicação da qualidade ou degradação do solo, reflexo das ações agrícolas. As raízes, e conseqüentemente as plantas, para terem um adequado desenvolvimento necessitam, entre outros, de proporções adequadas de ar e água no solo. Os fluxos de água no sistema solo, bem como sua capacidade armazenadora, são dependentes do tipo de solo e do manejo que é dado a este. O manejo atua sobre a estrutura do solo, podendo alterar a sua porosidade, refletindo sobre a retenção de água. Os estudos sobre a capacidade de retenção de água no solo se dão através da curva de retenção. Esta, indiretamente, é um indicador de qualidade dos solos, pois dá a distribuição do diâmetro de poros no solo. A degradação da estrutura do solo altera a arquitetura dos poros, e quando o volume, dimensão e configuração dos poros do solo são afetados, o movimento de massa e energia no ambiente do solo sofrem o mesmo efeito (Hakansson & Lipiec, 2000).

A partir da curva de retenção de água no solo pode-se obter o índice S, também considerado um indicador de qualidade física do solo (Dexter 2004 a, b, c). O mesmo representa o valor da inclinação da curva de retenção de água no solo, no seu ponto de inflexão. Segundo Dexter (2004 a), um aumento nos valores de S (maior inclinação) indica uma ampla distribuição do diâmetro de poros, condizente com condições estruturais que estabelecem um adequado funcionamento físico do solo. Assim sendo, fatores relacionados ao solo (textura e estrutura) e ao manejo (matéria orgânica do solo, compactação e preparo) que influenciam a distribuição do tamanho de poros, refletem mudanças nos valores de S, e, portanto, na qualidade física do solo. O mesmo autor numa tentativa de estabelecer limites para indicar condições favoráveis e restritivas para o crescimento das raízes das plantas propõe, respectivamente, valores de S maiores do que 0,035 ( $S > 0,035$ ) e menores do que 0,035 ( $S < 0,035$ ). Valores de S menores do que 0,020 ( $S < 0,020$ ) representam condições

físicas do solo muito pobres e com alta restrição ao crescimento das raízes das plantas.

A porosidade de aeração do solo é quem regula o processo de difusão de gases no solo, essencial ao desenvolvimento das raízes das plantas. Conforme Imhoff (2002), a capacidade do solo em fornecer adequada aeração para o crescimento e expansão do sistema radicular é um indicativo de sua qualidade, em decorrência dos parâmetros físicos atuantes na matriz do solo. No entanto, não basta apenas o solo apresentar boa porosidade de aeração, mas sim que os poros sejam contínuos, interligando-se com a atmosfera externa, para ocorrer as trocas gasosas. Isso torna fundamental, para a avaliação da estrutura do solo, a quantificação de propriedades relacionadas com a capacidade do solo em transmitir  $O_2$  até as raízes (Silva et al., 2009).

A permeabilidade do solo ao ar é um dos parâmetros físicos que governa o fluxo de gases no solo e, por isso, considerada um indicador físico de qualidade do solo. Diversos autores têm estabelecido o valor restritivo de 10 % de porosidade de aeração, para o crescimento das raízes, sendo que, com valores superiores a este, a difusão de  $O_2$  no solo não é limitante. Entretanto, esse valor restritivo é estático, e os processos ocorrentes no ambiente do solo são dinâmicos. Sendo assim, a medição da permeabilidade do solo ao ar implica em respostas que refletem melhor o comportamento do fluxo de gases no solo e, como salientado por Fish & Koppi (1994), é bastante sensível em discriminar os efeitos de diferentes práticas de manejo na estrutura do solo.

Assim, este estudo baseou-se nas hipóteses de que: I) os parâmetros físico-hídricos (retenção de água, índice S e a permeabilidade do solo ao ar) podem ser utilizados como indicadores da qualidade física de um solo, manejado com semeadura direta, utilização de plantas de cobertura de solo no inverno e o tráfego controlado; II) a utilização de plantas de cobertura de solo no inverno e a condição de tráfego (com e sem) alteram o sistema poroso do solo, influenciando a retenção de água, valores do índice S e a permeabilidade de ar no solo; e III) há correlação positiva do índice S com o teor de matéria orgânica do solo, porosidade e água disponível às plantas, e negativa com a densidade do solo.

Diante das hipóteses apresentadas, os objetivos deste estudo foram: I) verificar a influência dos sistemas de manejo do solo em semeadura direta, que incluem diferentes coberturas do solo no inverno e tráfego controlado (com e sem), sobre o comportamento dos parâmetros físico-hídricos do solo (retenção de água no solo, índice S e permeabilidade do solo ao ar); II) verificar o comportamento do índice S com a variação da densidade, porosidade do solo, teor de matéria orgânica e conteúdo de água disponível às plantas, em diferentes condições de manejo do solo; e III) avaliar a utilização dos parâmetros físico-hídricos na indicação da qualidade física do solo.

## **4.2 Material e Métodos**

O experimento localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central. O solo da área experimental é classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico (EMBRAPA, 1999). A textura superficial deste solo é franco-argilo-arenosa. Demais informações, acerca do histórico da área experimental, do solo, clima, tratamentos para o manejo do solo e condução do experimento, estão descritas em material e métodos, do capítulo II.

As amostragens (Figura 2/Capítulo II) para a determinação da curva de retenção de água no solo (CRA), obtenção do índice S e medição da permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) foram realizadas em dezembro de 2008. Foram selecionados, nos blocos 3, 4 e 5 (Apêndices 1, 2 e 3), dentro de todas as parcelas com milho, pontos amostrais que estivessem sob o efeito da passagem do rodado do trator (RT), rodado da colhedora (RC) e onde o solo não foi trafegado (NT). Selecionados os pontos, foram abertas trincheiras e coletadas três amostras indeformadas de solo por camada, fora da linha de semeadura, em anéis volumétricos com dimensões de 0,055 m de diâmetro e 0,03 m de altura, nas camadas de 0,02 - 0,05 m, 0,10 - 0,13m e 0,20 - 0,23 m, totalizando 324 amostragens. As amostras, assim coletadas, foram cuidadosamente envolvidas em papel alumínio e acondicionadas em latas do mesmo material.

As amostras com estrutura preservada foram levadas até o Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Após devidamente preparadas, as amostras foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água em bandejas, até atingir cerca de 2/3 da altura das amostras. A CRA foi determinada aplicando-se os potenciais matriciais de -1kPa, -6 kPa e -10 kPa, em mesa de areia e de -33 kPa e -100 kPa em câmara de Richards, para calcular a distribuição do tamanho de poros pela equação fundamental da capilaridade. Para a obtenção do conteúdo de água no solo, em valores de potencial matricial em torno de -1500 kPa (ponto de murcha permanente - PMP), foi utilizada a equação da curva de retenção, gerada pelo potenciômetro de ponto de orvalho (dew point potentiometer), a partir das amostras de solo deformadas.

As CRA, visando obter os seus comportamentos perante os sistemas de manejo, em diferentes profundidades de solo, foram ajustadas (utilizando-se o conteúdo de água em base volumétrica), empregando-se o modelo de Van Genuchten (1980), mediante o software Soil Water Retention Curve (SWRC - Dourado Neto et al., 1990), conforme a Equação 3:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left(1 + (\alpha \psi_m)^n\right)^m} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

$\theta$  = conteúdo de água volumétrica ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

$\theta_r$  = conteúdo de água volumétrica na tensão de 1500 kPa ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

$\theta_s$  = conteúdo de água volumétrica do solo saturado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

$\Psi_m$  = potencial mátrico da água no solo (kPa)

$\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  = parâmetros empíricos de ajuste da equação

A água disponível às plantas (ADP,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) foi calculada utilizando-se a Equação 4, e a partir das CRA, com o conteúdo de água volumétrica no solo na capacidade de campo ( $\theta_{CC} = -6 \text{ kPa}$ ) e o conteúdo de água volumétrica no solo no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP} = -1500 \text{ kPa}$ ).

$$\text{ADP} = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad \text{Eq. 4}$$

A distribuição de diâmetros dos poros (DDP) foi obtida a partir das CRA, conforme Fernandes et al. (1983). Foram determinados poros com  $\phi \geq 297$  mm, obtidos pela diferença entre porosidade total e o conteúdo de água volumétrica do solo no potencial -1 kPa; poros com  $297 \text{ mm} < \phi \leq 50$  mm, determinados pela diferença entre os conteúdos de água volumétrica de -1 kPa e -6 kPa; poros com  $50 \text{ mm} < \phi \leq 30$  mm, obtidos a partir da diferença entre os conteúdos de água volumétrica de -6 kPa e -10 kPa; poros entre  $30 \text{ mm} < \phi \leq 10$  mm, obtidos a partir da diferença entre os conteúdos de água volumétrica de -10 kPa e -33 kPa; poros entre  $10 \text{ mm} < \phi \leq 3$  mm, obtidos a partir da diferença entre os conteúdos de água volumétrica de -33 kPa e -100 kPa; poros com  $\phi \leq 3$  mm, obtidos a partir da diferença entre os conteúdos de água volumétrica de -100 kPa e do solo seco.

O índice S foi determinado segundo descrito em Dexter (2004a). O índice S é obtido através da CRA e definido como o valor da inclinação da CRA no seu ponto de inflexão. Dessa forma, a determinação do valor de S pode ser feita diretamente a partir da CRA, com a plotagem do conteúdo de água no solo à base de massa (conteúdo de água gravimétrica), de acordo com o potencial matricial. Entretanto, é mais conveniente ajustar a curva a uma função matemática e então calcular a inclinação no seu ponto de inflexão, a partir dos parâmetros da função. Esse foi o procedimento adotado na presente pesquisa. O modelo e o software utilizados para a obtenção das CRA foram os mesmos descritos para a Equação 3, somente com a diferença de se utilizar o conteúdo de água em base gravimétrica, ao invés de volumétrica, a qual leva em consideração a densidade do solo.

Dessa forma, adotou-se para cálculo do parâmetro S, a Equação 5, apresentada por Dexter (2004 a), que é utilizada quando o ajuste da curva é feita pelo modelo de Van Genuchten (1980).

$$|S| = -n(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) [1+1/m]^{-(1+m)} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

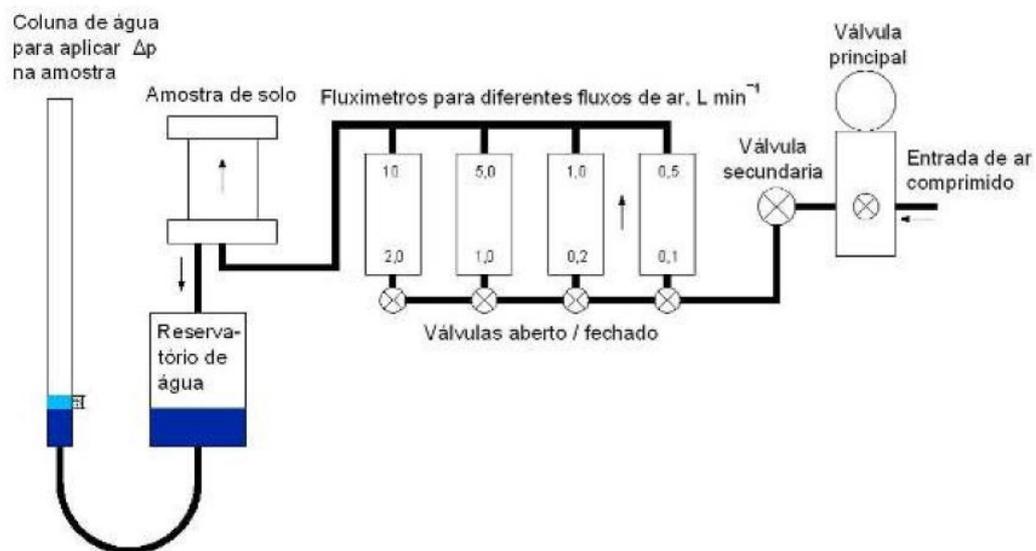
S = valor da inclinação da CRA no seu ponto de inflexão

$\theta_{\text{res}}$  = conteúdo de água residual ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

$\theta_{\text{sat}}$  = conteúdo de água no solo saturado ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

m e n = parâmetros da equação de Van Genuchten (1980)

A permeabilidade do solo ao ar ( $k_a$ ) foi determinada juntamente com a curva característica de água no solo. Após o equilíbrio das amostras de solo em cada tensão (-6, -10, -33 e 100 kPa), mediu-se o fluxo de ar nas amostras, utilizando-se um permeômetro de carga constante de ar (Horn et al., 2004), ilustrado na Figura 5.



**Figura 5.** Permeômetro utilizado para determinação da permeabilidade do ar no solo ( $K_a$ ) em amostras de estrutura preservada. Fonte: VOSSBRINK (2004). Adaptado por Brandt (2009).

O equipamento é composto por uma série de fluxímetros com diferentes vazões, por onde o ar flui antes de passar pelo solo (Vossbrink, 2004). O ar é aplicado à pressão constante e baixa (0,1 kPa), para evitar o fluxo turbulento. O gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra é medido por um manômetro de água. A condutividade do ar no solo ( $K_i$ ) e a permeabilidade de ar ( $K_a$ ) são calculadas usando-se as Equações 6 e 7, respectivamente:

$$K_i = \rho_l \cdot g \frac{\Delta V \cdot l}{\Delta t \cdot \Delta p \cdot A} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

$K_l$  = condutividade do solo ao ar ( $\text{cm s}^{-1}$ )

$\rho_l$  = densidade do ar no momento da medida ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$g$  = aceleração da gravidade ( $981 \text{ cm s}^{-2}$ )

$\Delta V$  = quantidade de ar que passa na amostra na  $\Delta t$  ( $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$ )

$l$  = altura da amostra (cm)

$\Delta p$  = pressão do ar que passa pela amostra ( $1000 \text{ dinas cm}^{-2}$ )

$\Delta t$  = intervalo de tempo (s)

$A$  = área do cilindro ( $\text{cm}^2$ )

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

$K_a$  = permeabilidade do solo ao ar ( $\mu\text{m}^2$ )

$K_l$  = condutividade do solo ao ar ( $\text{cm s}^{-1}$ )

$n$  = viscosidade do ar ( $\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ )

$\rho_l$  = densidade do ar ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$g$  = aceleração da gravidade ( $981 \text{ cm s}^{-2}$ )

O espaço aéreo ( $\epsilon_a$ ) ou porosidade de aeração foi calculado como sendo a diferença entre a porosidade total e o conteúdo volumétrico de água em cada potencial mátrico específico.

A análise estatística dos dados foi realizada segundo o delineamento experimental em blocos ao acaso. A análise da variância (ANOVA) e os testes de comparação entre médias foram realizados pelo teste Tukey, com o auxílio do programa computacional SAS (SAS Institute, 2002). Quando a análise da variância indicou a ocorrência de interações significativas (teste F,  $p < 0,05$ ), as médias dos níveis de um fator foram comparadas dentro de outro, através do teste Tukey com 5% de significância. Quando não houve interação e os efeitos individuais dos fatores foram significativos, as médias dos níveis de cada um deles foram comparadas separadamente, empregando-se o mesmo teste. Nas CRA utilizou-se o teste DMS a 5% de nível de significância para comparar médias do conteúdo de água entre tratamentos para um mesmo potencial

matricial. Para o índice S, ajustaram-se equações para a densidade do solo (Ds), matéria orgânica do solo (MOS), porosidade total (Pt), macroporosidade (MAC) e água disponível às plantas (ADP). Na apresentação dessas equações, a significância ( $p \leq 0,01$ ) é indicada por um asterisco colocado junto ao coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Para a  $K_a$ , a normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk (SAS Institute, 2002), e, posteriormente, passaram por transformação logarítmica para seguir a distribuição normal.

Para a complementação da discussão dos resultados do presente estudo são utilizados dados de densidade e de matéria orgânica do solo, estando resumidamente apresentados na Tabela 14, obtidos e referenciados no capítulo II.

**Tabela 14.** Densidade do solo (Ds) e matéria orgânica do solo (MOS) em função da cobertura de inverno, do tráfego e da camada de avaliação.

Camada	Tráfego <sup>1</sup>			Cobertura de inverno <sup>2</sup>		
	RC	RT	NT	AE	NF	P
----m----	-----Ds (Mg m <sup>-3</sup> )-----					
0,02 – 0,05	1,36 a	1,33 a	1,19 b	1,31 a	1,26 a	1,31 a
0,10 – 0,13	1,60 a	1,59 ab	1,51 b	1,63 a	1,50 ab	1,51 b
0,20 – 0,23	1,66 a	1,65 a	1,65 a	1,64 a	1,68 a	1,64 a
	-----MOS (g kg <sup>-1</sup> )-----					
0,02 – 0,05	n.d	n.d	n.d	42,5 ab	47,32 a	38,63 b
0,10 -0,13	n.d	n.d	n.d	22,58 ab	21,11 b	24,14a
0,20 – 0,23	n.d	n.d	n.d	17,09 a	17,36 a	17,29 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas, dentro de cada camada em cada cobertura de inverno ou tráfego, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = nabo forrageiro; P = pousio

<sup>2</sup> RC = rodados de colhedora; RT = rodados de trator; NT = não trafegado

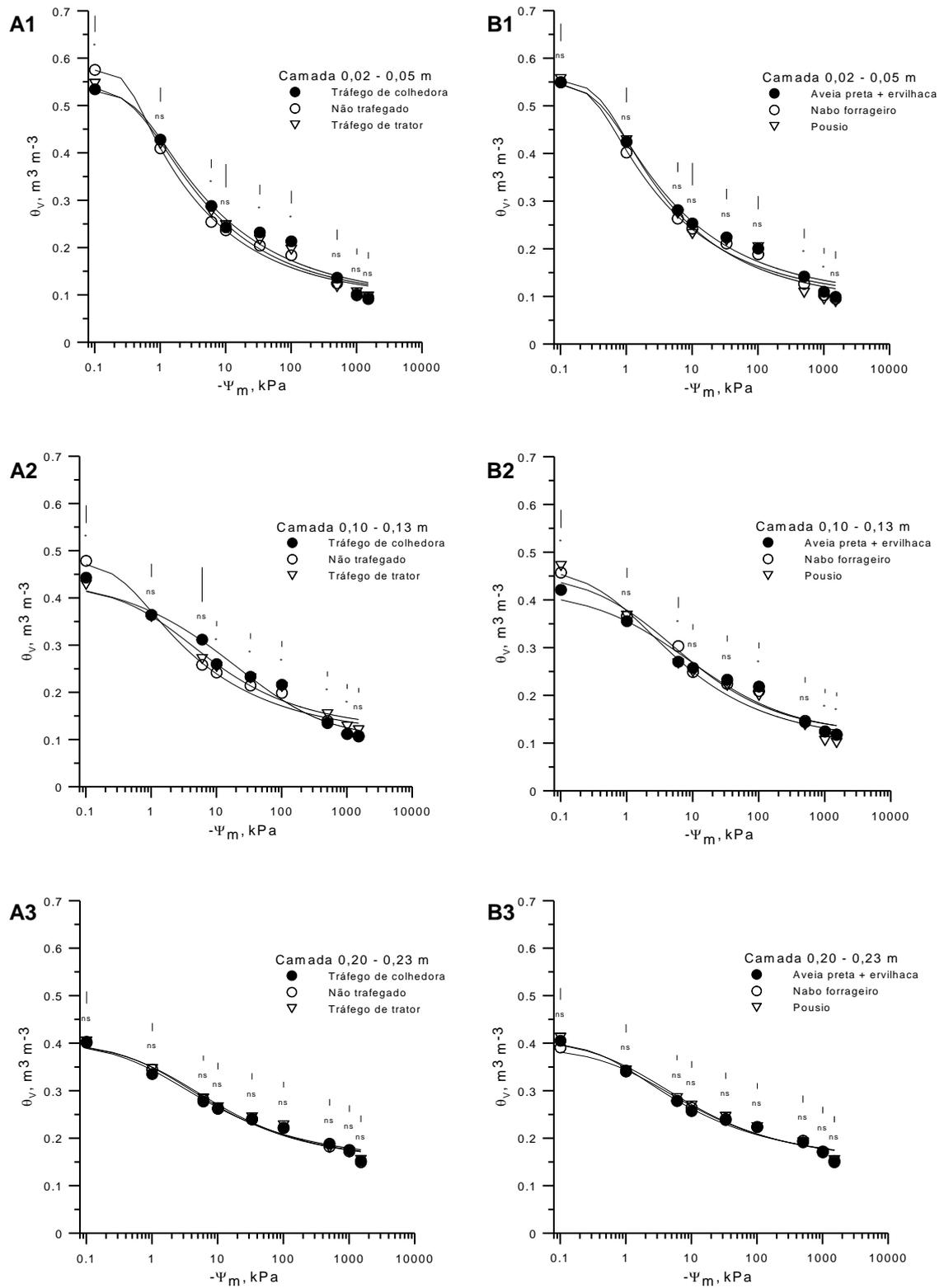
### 4.3 Resultados e Discussão

#### 4.3.1 Curva de retenção de água no solo

A Figura 6 relaciona o comportamento das CRA em dois sistemas de manejo, que envolveram a situação de tráfego (Figura 6 - A1, A2 e A3) e a cobertura de solo no inverno (Figura 6 – B1, B2 e B3), em três camadas de solo (0,02 - 0,05 m; 0,10 - 0,13 m e 0,20 - 0,23 m). A interação entre esses dois sistemas de manejo não foi significativa, em nenhuma das camadas avaliadas, e assim os respectivos gráficos não serão apresentados.

Os sistemas de manejo do solo alteraram a forma das CRA (Figura 6). O maior conteúdo de água volumétrica ( $\theta_v$ ) foi encontrado na camada superficial do solo (0,02 - 0,05 m) nos maiores potenciais matriciais de água ( $\psi_m$ ), com valores entre 0,5 e 0,6  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  para o solo próximo a saturação e de 0,4 a 0,45  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  para o  $\psi_m$  de -1 kPa, ocorrendo diminuição da  $\theta_v$ , em idênticos  $\psi_m$ , com o aumento da profundidade do solo. A  $\theta_v$  média entre os potenciais de -6kPa até -100 kPa foi semelhante, com variações entre 0,17 à 0,32  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , para todos os sistemas de manejo, incluindo a cobertura e o tráfego, nas camadas de 0,02 - 0,05 m e de 0,10 - 0,13 m. Nessas camadas, as diferenças no conteúdo de água, para um mesmo potencial, foi devido ao sistema de manejo utilizado, o que será discutido posteriormente. Ainda considerando os potenciais de -6kPa até -100 kPa, para a camada de 0,20 – 0,23 m, o comportamento das curvas foi diferenciado das demais camadas, sem efeito de manejo na retenção de água. Outrossim, ocorreu maior retenção de água, nessa camada, para os potenciais de -33 e -100 kPa, quando comparado com as camadas de 0,02 - 0,05 m e de 0,10 - 0,13 m. Para os potenciais entre -500 e -1500 kPa, ainda que semelhante a retenção de água para as duas camadas de solo mais superficiais avaliadas, evidencia-se um incremento da  $\theta_v$  com a profundidade da camada de avaliação.

Com relação às descrições do comportamento das CRA, descritas anteriormente, Beutler et al. (2002) explica que o conteúdo de água retido em determinado potencial decorre da estrutura e da distribuição dos tamanhos de poros. Em elevados potenciais, a CRA é influenciada por poros estruturais associados ao efeito da matéria orgânica na formação e na estabilidade da estrutura do solo (Rawls et al., 1991). Já, em baixos potenciais, a composição granulométrica e a mineralogia do solo tornam-se mais importantes devido à superfície disponível para a adsorção de água (Gupta & Larson, 1979).



**Figura 6.** Curvas de retenção de água, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten, para diferentes condições de tráfego (A1, A2 e A3) e cobertura de inverno (B1, B2 e B3), em três camadas de solo. \*, <sup>ns</sup> - Significativa e não significativa respectivamente, pelo teste DMS a 5% de probabilidade de erro.

O manejo do solo, com plantas de cobertura no inverno, atuou diminuindo os valores de  $D_s$ , principalmente pelo incremento nos teores de MOS, o que repercute em alterações no sistema poroso, estando isto mais pronunciado na camada superficial do solo. A MOS, por sua vez, tem importante papel na retenção de água (Doran & Parkin, 1994), sendo que seu aporte no solo tem efeito significativo sobre o comportamento físico-hídrico (Brady, 1984). A camada superficial apresentou a menor  $D_s$ , maior teor de MOS (Tabela 14), maior  $P_t$  e maior volume de poros com diâmetros superiores a  $50\ \mu\text{m}$  (Tabela 15), em comparação com camadas mais profundas de solo, em qualquer dos sistemas de manejo utilizados, com cobertura de solo ou situação de tráfego. O diâmetro de  $50\ \mu\text{m}$  (tensão de  $-6\ \text{kPa}$ ) é considerado o limite entre macroporos e microporos. O incremento da  $P_t$ , na superfície, se deu pela maior MAC, sendo esta a responsável pelo maior conteúdo de água encontrado no solo em altos  $\psi_m$ . Em situação de campo, esses poros maiores são drenados rapidamente e seu volume passa a ser ocupado por ar, fazendo-se importante na aeração do solo, e conforme Dexter (1988), na infiltração de água no solo. Entretanto, valores de MAC muito elevados podem prejudicar a retenção de água pelo solo, conforme detectado por Klein & Libardi (2000) em condições de mata nativa.

Para as camadas de  $0,10 - 0,13\ \text{m}$  e de  $0,20 - 0,23\ \text{m}$ , a MIC ocupou a maior proporção da  $P_t$  do solo (Tabela 15), ao contrário da camada superficial, sendo isso atribuído, principalmente, à capacidade de retenção de água pelo solo, nessas camadas. A menor MAC das camadas subsuperficiais se deu em função do aumento da  $D_s$  (Tabela 14). No entanto, isso pode ser vantajoso no sistema, evitando as perdas de água por percolação, sendo mais importante em períodos de escassez hídrica, já que o sistema não foi irrigado.

Com a diminuição dos  $\psi_m$ , em direção ao PMP, o conteúdo de água retida no solo passa a ser mais dependente de propriedades relacionadas com a superfície específica do solo, tais como a textura, o conteúdo de matéria orgânica e a mineralogia da fração argila (Williams et al. 1983), tendo a porosidade menos importância. Isso explica, em parte, o comportamento das CRA (Figura 6), principalmente dos menores  $\psi_m$  ( $-500$ ,  $-1000$  e  $-1500\ \text{kPa}$ ) com deslocamento das curvas cada vez mais para cima, a medida que aumentou a profundidade da camada avaliada, incrementando os valores de  $\theta_v$ .

**Tabela 15.** Distribuição do diâmetro de poros ( $\mu\text{m}$ ), porosidade total (Pt), macroporosidade (MAC) e microporosidade (MIC), em diferentes condições de tráfego, cobertura de inverno e camadas de solo.

Classe de poros	Tráfego <sup>1</sup>				Cobertura de inverno <sup>2</sup>				
	RC	RT	NT	CV%	AE	NF	P	CV%	
	-----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----				-----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----				
	0,02 - 0,05 m								
----- $\mu\text{m}$ -----	$\geq 297$	0,11 b	0,12 b	0,17 a	33,9	0,13 a	0,14 a	0,13 a	38,9
	297-50	0,14 a	0,15 a	0,15 a	27,1	0,14 a	0,14 a	0,15 a	27,2
	50-30	0,02 a	0,03 a	0,02 a	67,0	0,02 a	0,03 a	0,02 a	67,7
	30-10	0,03 a	0,03 a	0,03 a	31,8	0,03 a	0,03 a	0,03 a	30,6
	10-3	0,03 a	0,02 a	0,02 a	86,4	0,03 a	0,02 a	0,02 a	87,1
	<3	0,21b	0,20 ab	0,18 b	16,8	0,20 a	0,19 a	0,20 a	17,4
	MAC	0,24 b	0,26 b	0,32 a	23,0	0,27 a	0,28 a	0,28 a	25,8
	MIC	0,29 a	0,28 a	0,25 b	10,3	0,28 a	0,26 a	0,27a	11,3
	Pt	0,53 b	0,54 ab	0,57 a	9,6	0,55 a	0,55 a	0,55 a	10,1
		0,10 -0,13 m							
----- $\mu\text{m}$ -----	$\geq 297$	0,08 b	0,07 b	0,11 a	45,9	0,07 b	0,09a	0,10 a	46,6
	297-50	0,09 b	0,09 b	0,11 a	34,6	0,08 b	0,10ab	0,11 a	34,8
	50-30	0,02 a	0,02 a	0,02 a	40,2	0,02 a	0,02a	0,02 a	38,9
	30-10	0,03 a	0,02 a	0,03 a	27,6	0,02 a	0,03 a	0,03 a	27,4
	10-3	0,02 a	0,02 a	0,02 a	63,1	0,02 a	0,02 a	0,02 a	61,8
	<3	0,22 a	0,21 a	0,20 b	9,6	0,22 a	0,21ab	0,20 b	9,5
	MAC	0,18 b	0,16 b	0,21 a	36,4	0,15 b	0,19 a	0,20 a	37,3
	MIC	0,26 a	0,27 a	0,26 a	39,7	0,27 a	0,30 a	0,27 a	40,1
	Pt	0,44 ab	0,43 b	0,47 a	12,9	0,42 b	0,49 a	0,46 a	12,9
		0,20 - 0,23 m							
----- $\mu\text{m}$ -----	$\geq 297$	0,07 a	0,06 a	0,06 a	43,3	0,06ab	0,05 b	0,07 a	38,9
	297-50	0,06 a	0,06 a	0,06 a	36,4	0,06 a	0,05 a	0,07 a	42,3
	50-30	0,01 a	0,01 a	0,01 a	37,6	0,06 a	0,06 a	0,06 a	36,7
	30-10	0,02 a	0,03 a	0,02 a	29,6	0,01 a	0,01 a	0,02 a	36,7
	10-3	0,02 a	0,02 a	0,02 a	39,9	0,02 a	0,02 a	0,02 a	29,8
	<3	0,22 a	0,23 a	0,22 a	8,9	0,02ab	0,02 b	0,02 a	8,1
	MAC	0,12 a	0,12 a	0,12 a	32,1	0,12 a	0,11 a	0,13 a	31,6
	MIC	0,28 a	0,28 a	0,28 a	5,9	0,28 a	0,28 a	0,29 a	5,9
	Pt	0,41 a	0,40 a	0,40 a	9,6	0,40 a	0,39 a	0,41 a	9,34

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas, dentro de cada variável e camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> RC = rodados de colhedora; RT = rodados de trator; NT = não trafegado

<sup>2</sup> AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = nabo forrageiro; P = pousio

CV% = coeficiente de variação

Quando analisado o efeito do tráfego sobre o comportamento das CRA (Figura 6 – A1, A2 e A3), verifica-se que, nas camadas de 0,02 – 0,05 m e de 0,10 – 0,13 m, o solo não trafegado apresentou maior conteúdo de  $\theta_v$ , em comparação ao tráfego de trator e de colhedora, somente na condição de solo saturado por água, estando isto relacionado a menor  $D_s$  (Tabela 14) e maior MAC (Tabela 15), encontradas na condição de solo sem tráfego.

Nas camadas de 0,02 - 0,05 m e de 0,10 - 0,13 m, a compactação adicional ocasionada pelo tráfego de rodados, principalmente de colhedora, em comparação ao solo não trafegado, aumentou a  $D_s$  (Tabela 14) e reduziu a MAC (Tabela 15), fazendo prevalecer a MIC, estando isto relacionado à maior retenção de água encontrada (Figura 6 - A1 e A2). Leão (2002) cita que o efeito da compactação, incrementando valores de  $D_s$ , em solos arenosos, aumenta o conteúdo de água no solo na capacidade de campo. Nesse sentido, diversos trabalhos citados por Raper (2005), mostram que a retenção de água em solos arenosos aumentou sob níveis moderados de compactação. Concordando com os resultados obtidos por esses autores, a Tabela 16 mostra que o aumento do conteúdo de água no solo na capacidade de campo (CC) para o solo trafegado por rodados de colhedora, aumentou a ADP em 16% e 25%, respectivamente, nas camadas de 0,02 - 0,05 m e de 0,10 - 0,13 m, em comparação ao solo não trafegado. O aumento do conteúdo de água no solo na CC para o solo trafegado por trator, também aumentou a ADP em 12% na camada de 0,02 - 0,05 m, em comparação ao solo não trafegado.

A camada de 0,20 - 0,23 m apresentou comportamento das CRA diferenciado das demais, de forma que a situação de tráfego e a cobertura de inverno não alteraram a retenção de água no solo (Figura 6 – A3 e B3). Essa camada não apresentou diferenças quanto à densidade (Tabela 14) e à porosidade (Tabela 15) para os manejos de solo, atribuindo-se a isto o comportamento das CRA, principalmente nos maiores potenciais, enquanto que, nos menores potenciais, o efeito de granulometria e mineralogia passam a prevalecer (Gupta & Larson, 1979). A ausência de diferenças quanto a densidade e porosidade do solo na camada de 0,20 - 0,23 m, em função do manejo do solo, explicam o conteúdo de ADP (Tabela 16). Para a camada de 0,20 - 0,23 m não houveram diferenças nos conteúdos de água no solo para a CC, PMP e conseqüentemente na ADP para os manejos de solo com

diferentes condições de tráfego e cobertura de solo no inverno (Tabela 16).

**Tabela 16.** Conteúdo de água no solo na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível às plantas (ADP) para os sistemas de manejo incluindo diferentes coberturas de solo no inverno e situações de tráfego, em diferentes camadas de solo.

Conteúdo de água	Tráfego <sup>1</sup>			Cobertura de inverno <sup>2</sup>		
	RC	RT	NT	AE	NF	P
-----m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----						
0,02 -0,05 m						
<b>CC</b>	0,29 a	0,28 a	0,25 b	0,28 a	0,26 a	0,27 a
<b>PMP</b>	0,10 a	0,10 a	0,09 a	0,10 a	0,09 a	0,09 a
<b>ADP</b>	0,19 a	0,18 a	0,16 b	0,18 a	0,17 a	0,18 a
0,10 – 0,13 m						
<b>CC</b>	0,31 a	0,27 a	0,26 a	0,27 b	0,30 a	0,27 b
<b>PMP</b>	0,11 a	0,12 a	0,11 a	0,12 a	0,12 a	0,10 b
<b>ADP</b>	0,20 a	0,15 b	0,15 b	0,15 b	0,18 a	0,17 ab
0,20 – 0,23 m						
<b>CC</b>	0,28 a	0,28 a	0,28 a	0,28 a	0,28 a	0,28 a
<b>PMP</b>	0,15 a	0,15 a	0,15 a	0,15 a	0,15 a	0,15 a
<b>ADP</b>	0,13 a	0,13 a	0,13 a	0,13 a	0,13 a	0,13 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas, dentro de um mesmo sistema de manejo e camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> RC = rodados de colhedora; RT = rodados de trator; NT = não trafegado

<sup>2</sup> AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = nabo forrageiro; P = pousio

Com relação ao efeito da cobertura de inverno no solo (Figura 6 - B1, B2 e B3), sobre as CRA, verifica-se menor significância, quando comparado ao efeito dos tráfegos, nas camadas de 0,02 - 0,05 m e de 0,10 - 0,13 m. O efeito da cobertura, para a camada de 0,10 - 0,13 m (Figura 6 - B2), significativo no maior potencial medido, onde os sistemas de manejo do solo pousio e nabo forrageiro apresentaram o maior conteúdo de água, foi devido a estrutura do solo, já que aqueles tratamentos apresentaram a menor Ds

(Tabela 14) e maior MAC (Tabela 15), quando comparado com o sistema consorciando a aveia preta + ervilhaca. Comportamento semelhante deu-se para o potencial de -1 kPa, embora sem apresentar diferença significativa, estendendo-se até -6 kPa, onde o sistema de manejo com nabo forrageiro apresentou o maior conteúdo de água. No entanto, esses comportamentos descritos não foram encontrados para a camada superficial, já que nesta não ocorreram diferenças significativas entre a Ds (Tabela 14) e porosidade do solo (Tabela 15).

A  $\theta_v$  no PMP não variou entre os sistemas de manejo, dentro de uma mesma camada, excetuando-se apenas na camada de 0,10 - 0,13 m para a cobertura de inverno, onde o pousio apresentou a menor retenção de água no PMP (Tabela 16). Sendo assim, a ADP foi dependente do conteúdo de água na CC. Nos potenciais próximos e no PMP, diversos trabalhos têm demonstrado que a  $\theta_v$  equivalente ao PMP praticamente não varia com o aumento do grau de compactação (Imhoff, 2002; Leão, 2002; Silva, 2003), pois, nesta tensão, a água é retida na forma de filmes ao redor das partículas sendo, portanto, relativamente independente da porosidade (Reichardt, 1988).

Com as observações obtidas acerca do comportamento das CRA, em função dos manejos de solo utilizados, conclui-se que a Ds, a porosidade, e a MOS foram determinantes no entendimento da retenção de água em diferentes potenciais. A união dos sistemas de manejo do solo, que incluíram a cobertura de inverno e o tráfego controlado, agregou ao solo estrutura física adequada para a infiltração, retenção e disponibilidade de água do solo às plantas. O sistema de manejo com cobertura do solo no inverno, promovendo além da proteção física superficial, o aporte de matéria orgânica, melhorou a agregação e a relação entre diferentes tamanhos de poros no solo, fundamental para o fluxo e retenção de água no sistema. A compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas, aumentou a retenção de água no solo, sob menores potenciais, o que é importante em períodos de escassez hídrica. Acredita-se que essa compactação, podendo ser considerada leve, em função da estrutura de solo adquirida com as práticas de manejo repetidas durante sete anos, não seja restritiva ao desempenho no desenvolvimento e rendimento de culturas de verão.

### 4.3.2 Índice S

A Ciência do Solo está numa busca constante por melhores indicadores de qualidade do solo. Estudos mais recentes incluíram na literatura a utilização do índice S como um indicador físico da qualidade do solo. Diante disso e de posse das CRA, das quais se obtém o índice S, faz-se presente o seu estudo, testando a sua sensibilidade perante algumas características dinâmicas do solo em função do manejo.

Como já comentado anteriormente (item 3.3.1) houveram variações nas CRA, conforme o manejo do solo utilizado, sendo dependentes também da camada de solo avaliada. O índice S representa a inclinação da CRA no ponto de inflexão e foi considerado sensível ao comportamento desta. Isso pode ser contemplado na Tabela 17. A medida que aumentou a compactação do solo, por tráfego de colhedora e de trator, nas camadas de 0,02- 0,05 m e de 0,10 - 0,13 m, o índice S apresentou os menores valores. O aumento da compactação no solo trafegado foi resultante da maior Ds (Tabela 14). Quanto aos valores de S, Dexter (2004 a), cita o valor de 0,035, onde que, valores acima e abaixo deste indicam, respectivamente, condições favoráveis e restritivas para o crescimento de raízes. Ainda, conforme esse autor, valores de S inferiores 0,020 representam solos com condições físicas muito pobres.

**Tabela 17.** Índice S para o Argissolo em função do manejo com diferentes condições de tráfego e cobertura de solo no inverno, calculado a partir das curvas de retenção de água.

Camada	Índice S					
	Tráfego <sup>1</sup>			Cobertura de inverno <sup>2</sup>		
	RC	RT	NT	AE	NF	P
0,02 – 0,05	0,067 b	0,081 b	0,113 a	0,088 a	0,089 a	0,081 a
0,10 – 0,13	0,033 b	0,037 b	0,059 a	0,033 b	0,043 ab	0,049 a
0,20 – 0,23	0,027 a	0,025 a	0,027 a	0,027 a	0,025 a	0,027 a
<b>Média</b>	<b>0,042</b>	<b>0,047</b>	<b>0,066</b>	<b>0,049</b>	<b>0,052</b>	<b>0,052</b>

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas, dentro de cada variável e camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> RC = rodados de colhedora; RT = rodados de trator; NT = não trafegado

<sup>2</sup> AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = nabo forrageiro; P = pousio

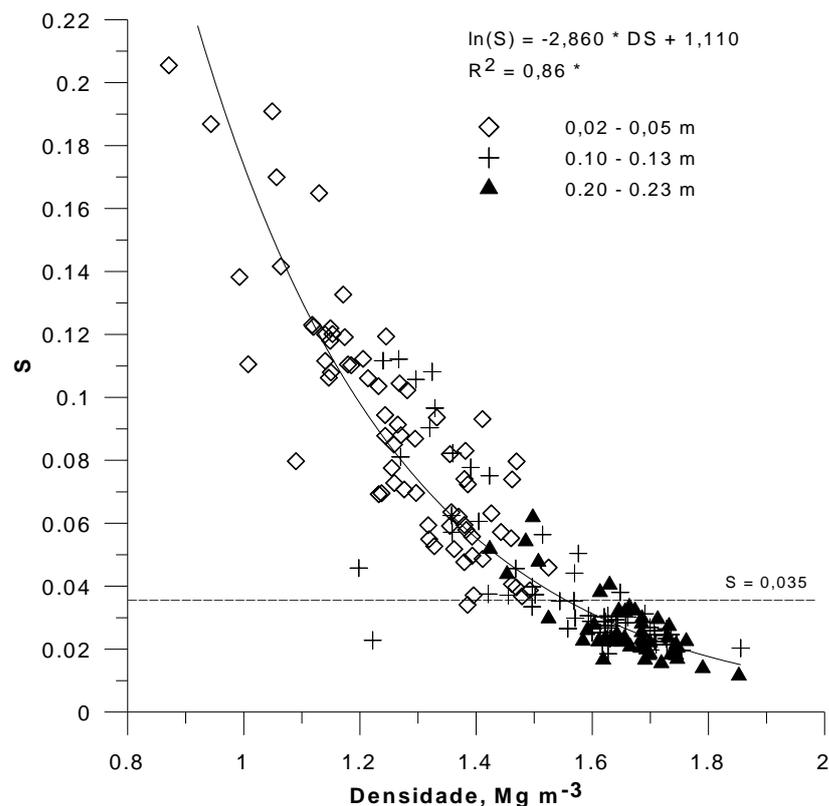
A camada superficial apresentou os maiores valores de S (Tabela 17), considerados altos (acima de 0,035), sendo assim, favoráveis ao desenvolvimento radicular (Dexter, 2004a). Isso está de acordo com os valores de Ds, MOS e de porosidade. Analisando as Tabelas 15 e 16, verifica-se que a camada superficial de solo apresentou os menores valores de Ds, maiores teores de MOS, MAC e Pt. Nas camadas de 0,10 - 0,13 m e de 0,20 - 0,23 m, houve diminuição dos valores de S, de forma que, quanto maior a profundidade da camada de avaliação, menores foram os valores de S. Outrossim, isto também está de acordo com o aumento da Ds, diminuição dos teores de MOS e de MAC, com a profundidade, conforme apresentado nas Tabelas 15 e 16.

Quando analisado o efeito dos sistemas de manejo sobre o comportamento do índice S, verifica-se mais uma vez a sua correlação com a Ds e a porosidade. Na camada superficial, o solo não trafegado apresentou a menor Ds (Tabela 14) e a maior Pt, com predomínio de macroporos (Tabela 15). Efeito disso resultou no maior valor de S (0,113), sendo, entretanto, semelhante ao encontrado por Silva (2004) em solo de floresta ( $S = 0,107$ ), indicando uma melhor configuração de poros, com papel fundamental no fluxo de gases e água no sistema, atuando positivamente sobre o desenvolvimento de plantas. A maior Ds e menor MAC, impostas pelo tráfego de colhedora e de trator, resultaram em menores valores de S, que foram respectivamente de 0,067 e 0,081. A mesma tendência de dependência de S, em relação aos valores de Ds e de porosidade, foram seguidas para as demais camadas de solo, em todos os sistemas de manejo utilizados. Os menores valores de S foram encontrados na camada de 0,20 - 0,23 m, devendo-se isso a maior Ds e à menor Pt em função da diminuição da MAC. Entretanto, mesmo nesta mais profunda camada de solo avaliada, os valores de S foram maiores do que 0,020, sendo que valores iguais ou abaixo deste, indicariam, respectivamente, solos com baixa e pobre qualidade física (Dexter, 2004a).

Em análise as CRA, apresentadas na Figura 6, percebe-se que, com o aumento da Ds (Tabela 14), em função do manejo ou com a profundidade da camada de avaliação, há uma redução dos conteúdos de água no solo nos potenciais mais altos próximos a saturação ( $\theta_{sat}$ ) e um aumento dos conteúdos de água retido a potenciais menores próximos de -1500 kPa. Isso conduziu à uma mudança na forma das curvas, com uma redução da inclinação da CRA

no seu ponto de inflexão, resultando em menores valores do índice S. Esse comportamento, segundo Silva (2004), é devido a degradação da estrutura física do solo. Horn et al. (1995) explica que, nesse processo, os poros grandes são destruídos primeiro (poros interagregados), para depois ocorrer a destruição dos próprios agregados e, por consequência, dos poros menores (poros intragregados).

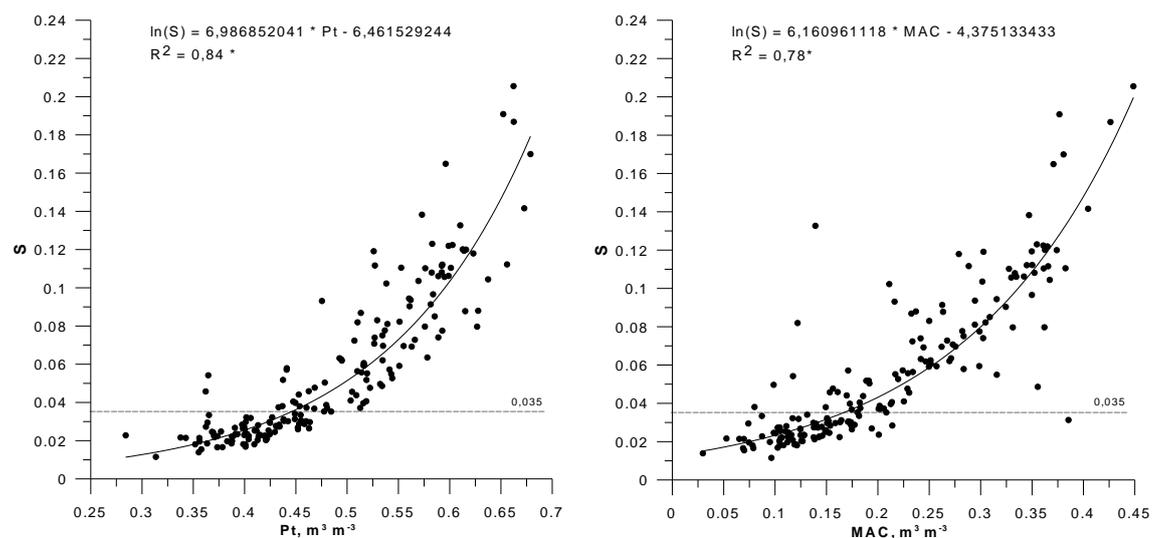
A Figura 7 representa o comportamento do índice S, em função da Ds. Com o aumento da Ds ocorreu redução do valor do índice S. Resultados semelhantes foram obtidos por Dexter (2004 a), em solos da Espanha com aproximadamente 27% de argila. No entanto, esse autor encontrou um decréscimo linear do valor de S em função do aumento da Ds, enquanto que, na presente pesquisa o decréscimo foi exponencial, tal como os resultados obtidos por Streck (2007), trabalhando com classes de solos argilosas e muito argilosas, do Sul do Brasil.



**Figura 7.** Comportamento do índice S em função da densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>), nas camadas de 0,02 – 0,05m, 0,10 – 0,13 m e de 0,10 – 0,23 m. \* representa que o modelo ajustado é significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F.

A Ds onde o valor de  $S = 0,035$  foi de  $1,56 \text{ Mg m}^{-3}$ . Essa Ds pode ser considerada como crítica, pois valores de  $S < 0,035$ , segundo Dexter (2004 a), indicam solos de estrutura pobre. Valores de  $S < 0,035$  foram encontrados, na sua grande maioria na camada de  $0,20 - 0,23 \text{ m}$ , enquanto que, na camada superficial ( $0,02 - 0,05 \text{ m}$ ) os valores de  $S$  foram todos  $\geq 0,035$ . Na camada de  $0,10 - 0,13 \text{ m}$ , encontraram-se alguns valores de  $S < 0,035$ , sendo efeito do tráfego de rodados de colhedora e de trator (Tabela 17). Quanto aos valores de  $S$ , Andrade (2008), utilizando diversas classes texturais de solos do Cerrado, incluindo a franco-argilo-arenosa, definiu o limite de  $S \geq 0,045$  para solos com boa qualidade física. Se considerado este valor de  $S$  para a presente pesquisa, com classe textural franco-argilo-arenosa, o valor de Ds onde  $S = 0,045$  foi de  $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$ . Este valor está próximo dos valores de Ds definidos como críticos por Reichert et al. (2003), para a classe textural da presente pesquisa, que está numa faixa de densidades de  $1,40$  a  $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ . Os autores utilizaram para isso o intervalo hídrico ótimo (IHO) e definiram a Ds crítica quando  $\text{IHO} = 0$ .

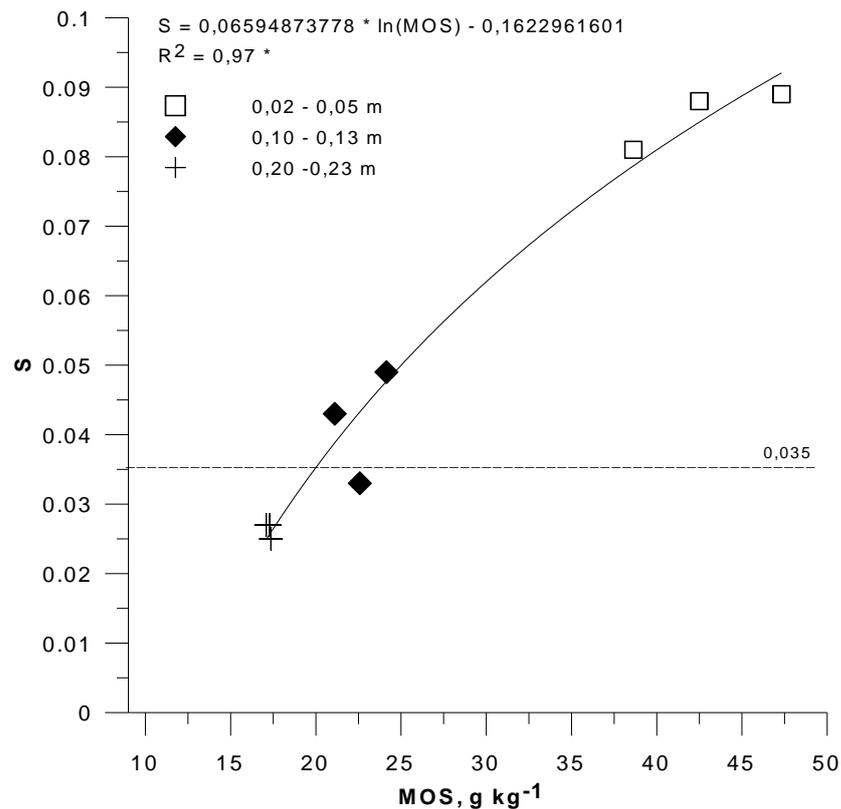
Como já referido, a medida que aumenta a Ds, diminui o volume de poros, em que a MAC é afetada em maior grau. A Figura 8 mostra a relação entre o índice  $S$  com a Pt e a MAC.



**Figura 8.** Comportamento do índice  $S$  em função porosidade total ( $Pt, \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e da macroporosidade do solo ( $MAC, \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ). \* representa que o modelo ajustado é significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F.

Há um aumento exponencial do índice S com o incremento da Pt e da MAC (Figura 8). Dessa forma, o índice S está diretamente relacionado com o seu espaço poroso (Figura 16) e inversamente relacionado com a Ds (Figura 15). Isso concorda com os resultados obtidos por Stone et al. (2005), Juhász et al. (2007) e Andrade et al. (2009). Considerando o valor de  $S = 0,035$ , proposto por Dexter (2004 a), como limite entre solos com qualidade estrutural, abaixo do qual a estrutura do solo fica comprometida, a Figura 8 mostra que a Pt e a MAC onde S atinge esse valor (0,035), foram de 0,44 e 0,16  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , respectivamente. Isso quer dizer que, para esse solo ter qualidade física para desempenhar adequadamente as suas funções, deve possuir Pt mínima de 0,44  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , sendo que deste volume, 0,16  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  deve ser ocupado por macroporos. Esse volume de macroporos está acima do valor restritivo de porosidade de aeração para o crescimento de raízes (0,10  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), proposto por Grable & Siemer (1968) e utilizado por Silva et al. (1994) e Leão et al. (2004) para quantificar o IHO. Se observarmos a Tabela 15, verificamos que em nenhum momento o volume de poros maiores do que 50  $\mu\text{m}$ , responsáveis pela porosidade de aeração ou macroporosidade do solo, apresentou valores menores do que 0,10  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , mesmo na maior profundidade avaliada. Por outro lado, verifica-se que, em se considerando o valor mínimo de macroporos de 0,16  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , estimado através do índice  $S = 0,035$ , a única camada que não apresentou restrição foi a superficial, enquanto que na camada de 0,10 - 0,13 m, o solo trafegado por rodado de trator (0,16  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e a utilização do consórcio aveia preta + ervilhaca (0,15  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) já estariam, respectivamente, no limite e abaixo da porosidade mínima de aeração.

Vários autores (Stone et al., 2005; Juhász et al., 2007; Andrade et al., 2009), estudando o comportamento do índice S em função de parâmetros físico-dinâmicos no solo verificaram também a importância do conteúdo de MOS. Os valores de S foram dependentes dos teores de MOS (Figura 9). Os maiores teores de MOS foram encontrados na camada superficial do solo, onde houveram os maiores valores de S, sendo que os dois decresceram com a profundidade da camada de avaliação. No entanto, Dexter (2004 a) evidencia que a MOS não pode ser considerada o único fator que explica o comportamento de S, devendo-se considerar os manejos de solo, como a utilização de plantas de cobertura de solo e o tráfego.

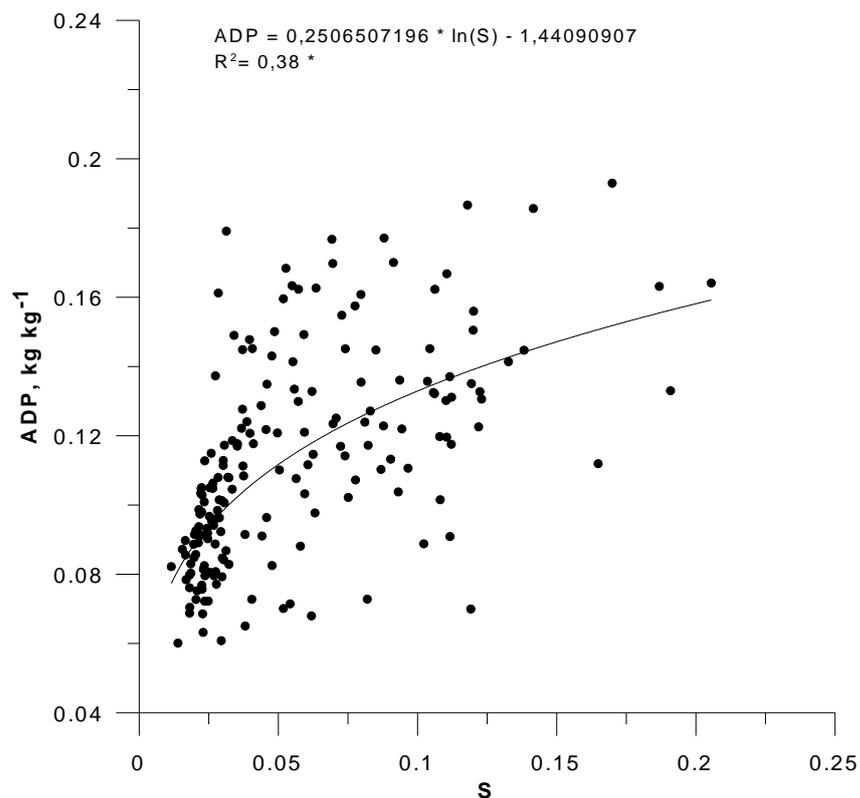


**Figura 9.** Comportamento do índice S em função da matéria orgânica do solo (MOS, g kg<sup>-1</sup>). \* representa que o modelo ajustado é significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F.

Os pontos que deram origem à Figura 9 foram uma média geral dos valores de S, considerando diferentes manejos de solo, incluindo o tráfego e a cobertura de solo no inverno, relacionados a média geral dos teores de MOS, em função do manejo com cobertura do solo no inverno. Então, possíveis efeitos de manejo do solo, principalmente devido ao tráfego, podem estar implícitos na relação de S com a MOS. Isso parece estar ocorrendo com o ponto da Figura 9, referente a camada de 0,10 - 0,13 m, com o menor valor de S. Considerando o valor de  $S = 0,035$ , acima do qual a estrutura do solo apresenta qualidade estrutural favorável ao desenvolvimento de plantas, o teor de MOS foi de 20 g kg<sup>-1</sup>. Cabe ressaltar que devem ser consideradas as camadas de avaliação. Teores de MOS abaixo de 20 g kg<sup>-1</sup> foram encontrados apenas na camada de 0,20 - 0,23 m, enquanto que, para a camada superficial os teores foram superiores a este em mais de 50%. Em se considerando valores críticos de MOS, para que se tenha solos com boa qualidade física, Loveland & Webb (2003), em sua revisão de literatura, não encontraram um

valor crítico de MOS, abaixo do qual a estrutura do solo entra em colapso. Entretanto, a literatura em nível geral envolvendo o assunto, associa a redução da qualidade física do solo com a redução do teor de MOS.

O conteúdo de ADP é reflexo da estrutura do solo. Essa, por sua vez controla a distribuição do tamanho de poros e a retenção de água no solo. O índice S, também é influenciado pela estrutura do solo. Em função disso, a Figura 10 apresenta o comportamento da ADP em função do índice S.



**Figura 10.** Comportamento da água disponível as plantas (ADP, kg kg<sup>-1</sup>) em função do índice S. \* o modelo ajustado é significativo a  $p \leq 0,01$  pelo teste F.

O modelo logarítmico crescente apresentou o melhor ajuste entre a influência do índice S sobre a ADP. O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,38$ ) pode ser considerado baixo, ao ser comparado com as demais relações apresentadas anteriormente (Figuras 7, 8 e 9), de forma que, apenas 38 % das variações ocorridas na ADP, podem ser explicadas pela variação do índice S. Isso ocorreu em função do manejo do solo, especialmente pelo tráfego. De um lado, se observarmos a Tabela 16, verifica-se que os conteúdos de ADP, na

camada de 0,02 - 0,05 m, foram maiores no solo trafegado por rodados de colhedora ( $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e por trator ( $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), em comparação ao solo não trafegado ( $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), enquanto que na camada de 0,10 - 0,13 m, o solo trafegado por colhedora ( $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) apresentou maior ADP em comparação ao solo trafegado por trator ( $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e não trafegado ( $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Para a camada de 0,20 - 0,23 m, não houve diferenças entre os tratamentos com manejo de solo, para a ADP, apresentando, no entanto, menores valores em comparação às duas primeiras camadas de solo. Por outro lado, se observamos a Tabela 17, verificamos que o índice S foi menor nas regiões de solo trafegado, nas duas primeiras camadas de solo, relacionando-se isso ao aumento da  $D_s$ . Já, para a camada de 0,20 - 0,23 m não houve diferenças entre os tratamentos com manejo de solo, para os valores de S, embora apresentaram-se menores, tal como a ADP, nessa camada. Em estudos com solos de textura argilosa e muito argilosa, do Sul do Brasil, Streck (2007) encontrou aumentos significativos da ADP com o aumento do índice S, entretanto, não obteve o mesmo êxito ao trabalhar com solos de textura média.

Acerca dos resultados obtidos, podemos afirmar que o índice S foi sensível em detectar as variações na qualidade física do solo, impostas pelo manejo.

#### 4.3.3 Permeabilidade do solo ao ar

Não houveram interações significativas entre os sistemas de manejo de solo utilizados (cobertura de inverno e situação de tráfego) e a permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) (Apêndices 5, 6 e 7). Esta apresentou uma grande variabilidade, da forma que o CV variou de 68,1 a 137,1 % (Tabela 18), o que é reflexo da grande diversidade no tamanho, proporção, forma e continuidade dos poros no solo.

A  $K_a$  foi maior na camada superficial (0,02 - 0,05 m) para todos os sistemas de manejo do solo, reduzindo em profundidade (Tabela 18). Isso ocorreu em função da estrutura do solo, já que a camada superficial apresentou menores  $D_s$  (Tabela 14), maiores  $P_t$  e  $MAC$  (Tabela 15), em comparação as camadas de solo mais profundas, para todos os sistemas de manejo do solo. No solo, o fluxo de gases ocorre predominantemente em poros

grandes (Hillel, 1998) e contínuos (Iversen et al., 2003). Considerando os manejos de solo, o tráfego de máquinas foi o que mais atuou sobre a diminuição do fluxo de ar no solo, de forma que, mesmo sob altos  $\psi_m$ , o que resulta em menor espaço poroso livre de água, a  $K_a$  no solo não trafegado apresentou-se maior. Isso demonstra a melhor funcionalidade do sistema poroso na região de solo que não recebe tráfego, estando de acordo com os menores valores de  $D_s$  (Tabela 14) e com a geometria dos poros por onde ocorre preferencialmente o fluxo de ar (macroporos grandes e contínuos). Na Tabela 15 verifica-se que para a camada superficial, o volume de poros de maior diâmetro ( $\geq 297 \mu\text{m}$ ) é maior para o solo não trafegado, o que contribuiu para o aumento efetivo da porosidade de aeração em todas as tensões de água no solo avaliadas, em comparação ao solo trafegado. A menor  $K_a$  em solo trafegado por rodados de máquinas, pode indicar a menor qualidade estrutural. Para o sistema de manejo do solo incluindo as coberturas de inverno, na camada superficial, a maior  $K_a$  foi encontrada para o solo com nabo forrageiro, o qual assemelhou-se ao pousio, nos  $\psi_m$  de -10 kPa e -33 kPa, não refletindo a igualdade no volume de poros de diferentes tamanhos (Tabela 16). Portanto, a maior  $K_a$  nesses sistemas com nabo forrageiro e pousio parece estar relacionada com a continuidade do sistema poroso, podendo existir maior quantidade de poros descontínuos e/ou obstruídos para o sistema com aveia preta + ervilhaca.

Na camada de 0,10 - 0,13 m, o fluxo de ar foi menor, em comparação à camada superficial (Tabela 18). Isto está relacionado a menor quantidade de poros maiores (Tabela 15). O tráfego de rodados alterou a  $K_a$  somente na tensão de -10 kPa, sendo que foi maior no solo não trafegado. Isto também está relacionado com a distribuição do diâmetro de poros no solo (Tabela 15), apresentando maior volume de poros de maior diâmetro, tal como as maiores MAC, Pt e menor  $D_s$  (Tabela 14), no solo não trafegado. Entre os manejos de solo com cobertura de inverno, não houveram diferenças para os diferentes usos, nos  $\psi_m$ , na camada de 0,10 - 0,13 m. A  $K_a$  apresentou-se semelhante para os mesmos  $\psi_m$ , entre alguns manejos de solo, ao comparar as camadas de 0,10 - 0,13 m e de 0,20 - 0,23 m, especialmente no solo trafegado por máquinas, o que provavelmente está relacionado a minimização da proporção e continuidade de poros no solo, resultando em menor qualidade

estrutural.

**Tabela 18.** Permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) em função do tráfego e da cobertura de solo no inverno em diferentes tensões de água e camadas de solo.

- $\psi_m$ kPa	Tráfego <sup>1</sup>		Cobertura de inverno <sup>2</sup>				CV %
	RC	RT	NT	AE	NF	P	
----- $K_a$ ( $\mu\text{m}^2$ )-----							
0,02 – 0,05 m							
<b>6</b>	96,66 b	109,77 b	218,24 a	114,62 a	155,97 a	154,08 a	68,6
<b>10</b>	87,85 b	130,90 ab	216,00 a	116,64 b	180,63 a	137,49 ab	73,4
<b>33</b>	122,17b	143,48 ab	231,64 a	134,61 b	214,02 a	148,65 ab	70,4
<b>100</b>	106,15b	165,56 ab	244,22 a	160,39 a	211,78 a	143,76 a	69,8
0,10 -0,13 m							
<b>6</b>	62,43 a	76,37 a	88,12 a	65,84 a	64,09 a	96,98 a	99,1
<b>10</b>	51,87 b	80,15 ab	92,17 a	57,51 a	69,69 a	97,00 a	97,4
<b>33</b>	76,23 a	77,16 a	101,08 a	73,46 a	76,78 a	104,22 a	88,3
<b>100</b>	72,18 a	78,53 a	112,44 a	82,65 a	61,96 a	118,53 a	103,4
0,20 – 0,23 m							
<b>6</b>	63,18 a	78,34 a	64,24 a	84,80 a	61,75 a	59,21 a	124,9
<b>10</b>	48,23 a	68,94 a	58,00 a	72,99 a	47,30 a	54,88 a	137,1
<b>33</b>	70,75 a	72,74 a	70,76 a	93,53 a	57,36 a	63,36 a	125,8
<b>100</b>	75,36 a	72,24 a	64,57 a	79,95 a	69,93 a	62,29 a	118,6

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas, dentro de cada tratamento (tráfego ou cobertura de inverno) e camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> RC = rodados de colhedora; RT = rodados de trator; NT = não trafegado

<sup>2</sup> AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; NF = nabo forrageiro; P = pousio

CV % = coeficiente de variação

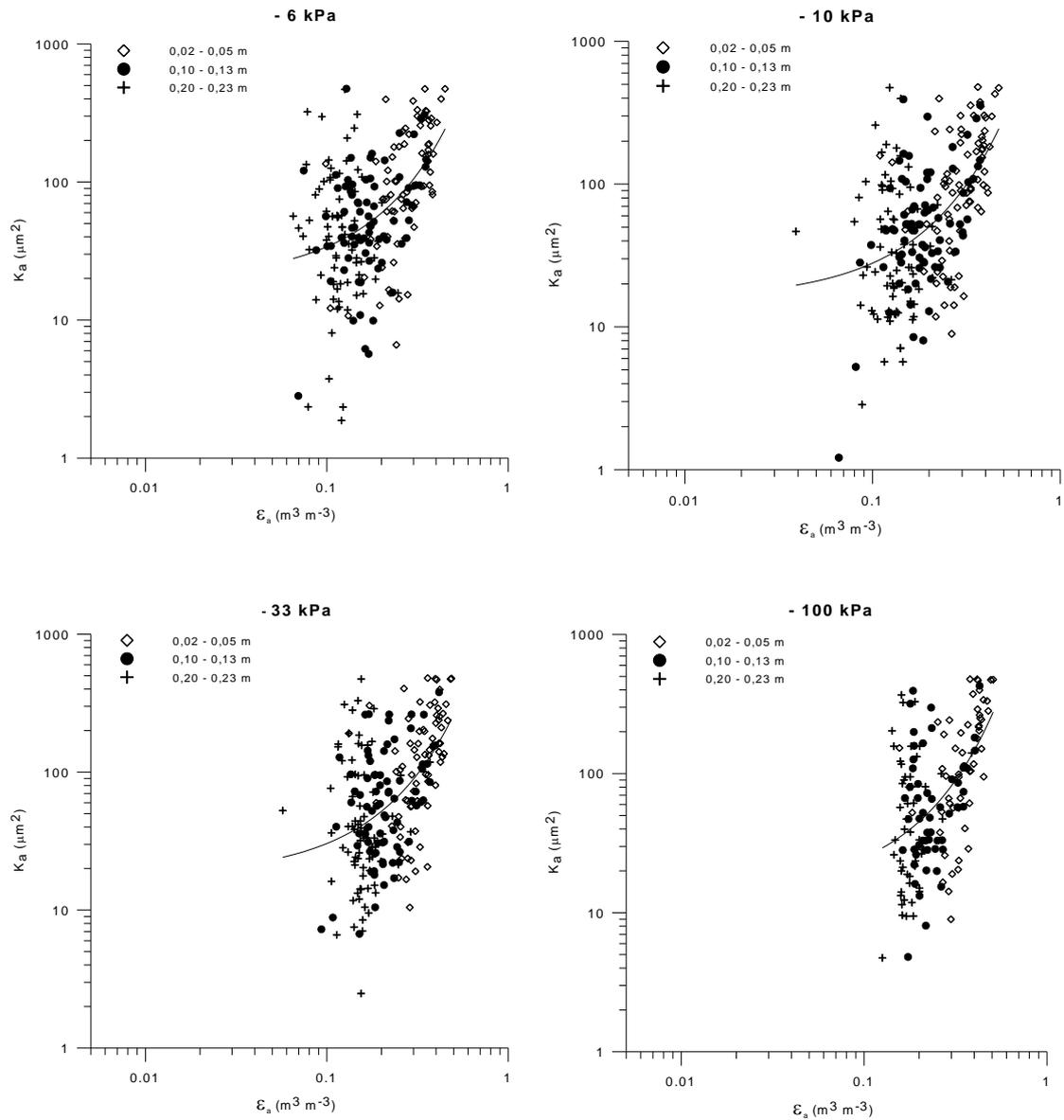
Incrementos no conteúdo de água no solo (maiores  $\psi_m$ ) resultaram, na maioria das vezes, em diminuição da  $K_a$  (Tabela 18). Silva et al. (2009), encontraram para um Nitossolo de textura argilosa, que a  $K_a$  é inversamente relacionada com o conteúdo de água, de modo que, quanto menor a proporção de poros com ar, menor é a  $K_a$ . Máximos valores de  $K_a$  são alcançados em solo

seco, diminuindo progressivamente com o umedecimento do solo, até próximo de zero na saturação (Ball & Schjonning, 2002). Sob iguais tensões de água no solo, as maiores  $D_s$  (Tabela 14), sejam oriundas dos sistemas de manejo utilizados ou da camada de avaliação, resultaram em menores valores de  $K_a$  (Tabela 18). Isto está de acordo com resultados obtidos por Ressurrecion et al. (2007) e Silva et al. (2009), que indicam a magnitude de  $K_a$  é fortemente influenciada pela estrutura do solo.

A relação entre o espaço aéreo ( $\epsilon_a$ ) ou porosidade de aeração e a  $K_a$  nas diferentes tensões de água é apresenta-se na Figura 11. Na medida em que há um secamento do solo (menores  $\psi_m$ ), há um aumento do  $\epsilon_a$ , tal como mostra o deslocamento dos pontos para a direita do gráfico (Figura 11). Para todas as tensões medidas, na média, maiores valores de  $\epsilon_a$  foram encontrados na camada superficial do solo (0,02 - 0,05 m) e as menores para a camada de solo mais profunda (0,20 - 0,23 m). Há relação positiva entre o  $\epsilon_a$  e a  $K_a$ , como também documentando por Fontanela (2008), de forma que, quanto maior o primeiro, maior o segundo. No entanto, a magnitude disso vai depender da estrutura do solo, que muda em função do manejo e com a profundidade da camada de avaliação do solo, como já comentando anteriormente.

Para as raízes das plantas e, conseqüentemente as plantas, terem um adequado desenvolvimento, necessitam de um  $\epsilon_a$  mínimo de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Grable & Siemer, 1968; Silva et al., 1994; Leão et al. 2004). Este vai depender da estrutura do solo e do conteúdo de água presente. Observando a Figura 11, percebe-se que existiu pouca restrição de aeração, considerando o mínimo necessário de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Na maior tensão de água no solo (- 6 kPa) a camada superficial não apresentou restrição de aeração, enquanto que as demais camadas (0,10 - 0,13 m e 0,20 - 0,23 m) apresentaram alguns poucos pontos abaixo e no limite de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . A medida que diminuiu o conteúdo de água no solo, com a diminuição do  $\psi_m$ , o  $\epsilon_a$  foi maior, para todas as camadas de solo, sendo que a porosidade mínima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  inexistiu na tensão de -100 kPa para todas as camadas de solo avaliadas. O maior  $\epsilon_a$  está relacionado com a maior  $K_a$ , no entanto, a proporção disso, como já evidenciado, mostrou ser dependente da estrutura do solo, em decorrência do manejo e da camada de avaliação. Exemplo disso ocorreu na camada de 0,02 - 0,05 m, onde o solo trafegado por rodados de trator e de colhedora resultaram

em menores valores de  $K_a$ , quando comparados ao solo não trafegado.



**Figura 11.** Relação entre o espaço aéreo ( $\epsilon_a$ ) e a permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) em diferentes tensões (-6 kPa, -10 kPa, -33 kPa, -100 kPa).

Neste estudo utilizaram-se quatro tensões de água no solo para a avaliação da  $K_a$ , sendo elas, -6, -10, -33 e -100 kPa. Autores como Iversen et al. (2003), Blanco-Canqui et al. (2007) e Ressurrecion (2007) sugerem que a medição da  $K_a$ , para a sua boa estimativa, seja feita em amostras de solo estabilizadas próximas à capacidade de campo, fazendo com que o fluxo de ar ocorra preferencialmente nos poros grandes, permitindo assim uma melhor predição da permeabilidade desses poros. Neste estudo, demonstrou-se que a

$K_a$  refletiu as alterações na estrutura do solo impostas pelas práticas de manejo. As alterações na estrutura do solo que atingiram os poros maiores, com diâmetro no intervalo dos macroporos ( $\geq 50 \mu\text{m}$ ), medidos na tensão de  $-6 \text{ kPa}$ , sendo esta a capacidade de campo, foram bem caracterizadas pela  $K_a$ . Resultados semelhantes foram obtidos por Streck (2007). Por fim, a  $K_a$  mostrou-se sensível, principalmente as alterações na  $D_s$ , resultantes do manejo do solo e assim, útil na avaliação na qualidade física do solo.

#### 4.4 Conclusões

1. Os parâmetros físico-hídricos, a retenção de água no solo, o índice S e permeabilidade do solo ao ar, mostraram-se sensíveis às alterações na estrutura do solo, impostas pelo manejo, sendo, portanto, indicativos da qualidade física do Argissolo;

2. A retenção de água no solo foi influenciada pela densidade, porosidade e teor de matéria orgânica do solo. Em maiores potenciais matriciais, a retenção de água foi maior sob menores densidades e maiores macroporosidades, encontradas em solo não trafegado. Com a diminuição dos potenciais, em direção ao ponto de murcha permanente, a maior retenção de água ocorreu no solo mais denso, resultante do tráfego de rodados de máquinas, o que resultou em maior conteúdo de água disponível, para as camadas de solo mais superficiais. O maior teor de matéria orgânica do solo, presente nas camadas superficiais, resultou em maior retenção de água;

3. O índice S foi influenciado pela densidade, porosidade e matéria orgânica do solo. O valor do índice S decresceu exponencialmente com o aumento da densidade do solo e aumentou exponencialmente com o aumento da porosidade total, macroporosidade e teor de matéria orgânica no solo. Onde o solo apresentou-se mais denso e com menor macroporosidade, resultado do tráfego de rodados de máquinas e/ou da camada mais profunda do solo, o índice S foi menor, indicando menor qualidade física;

4. A permeabilidade do solo ao ar mostrou-se bastante dependente da macroporosidade do solo, em consequência expressou as alterações na estrutura do solo quando a proporção de macroporos foi afetada. A diminuição

da macroporosidade, em decorrência do aumento da densidade do solo em solo trafegado por rodados de máquinas, reduziu a permeabilidade do solo ao ar, indicando menor qualidade física.

## **5 CAPÍTULO IV. RENDIMENTO DO MILHO E DA SOJA E RELAÇÕES COM A QUALIDADE FÍSICA DE UM ARGISSOLO SUBMETIDO A PRÁTICAS DE MANEJO MELHORADORAS DE SUA ESTRUTURA**

### **5.1 Introdução**

O sistema de manejo do solo modifica a sua estrutura física e, conseqüentemente, o desenvolvimento e rendimento de culturas. O advento do sistema de manejo do solo utilizando a semeadura direta (SD) minimizou os problemas oriundos do alto grau de mobilização, influenciando, entre outros, a perda de solo e água através da erosão hídrica. Entretanto, a baixa mobilização do solo, em SD, associada ao tráfego de maquinários agrícolas, gera problemas de compactação. Esta pode também ser oriunda da atividade pecuária, através do pisoteio animal. A compactação oriunda do tráfego de máquinas e do pisoteio animal atinge níveis mais prejudiciais ao desenvolvimento de plantas quando realizados com conteúdos de água no solo favoráveis ao adensamento. Entretanto, a compactação pode ser prejudicial ou não ao desenvolvimento de plantas, dependendo do grau que atinge e da capacidade do sistema radicular de diferentes espécies de plantas em romper as camadas adensadas.

A compactação excessiva do solo tem sido reconhecida como uma importante causa de redução do rendimento das culturas de grãos (Flowers & Lal, 1998; Beutler & Centurion, 2004; Beutler et al., 2005; Chan et al., 2006; Botta et al., 2007). Isso, no entanto, está associado às modificações físicas ocasionadas pela compactação junto ao ambiente radicular (Leão, 2002). Essas modificações são decorrentes do aumento da densidade, o que afeta a

resistência mecânica do solo ao crescimento radicular (Imhoff, 2002; Silva, 2003; Cavalieri et al., 2006), a proporção de diferentes tamanhos de poros no solo, bem como a sua geometria e continuidade, possibilitando interligarem-se com a atmosfera externa, importante para a dinâmica dos processos que envolvem a água e a difusão de gases no solo. Dessa forma, em solo compactado, os efeitos negativos do excesso ou déficit hídrico são mais pronunciados sobre o desenvolvimento de plantas (Unger & Kaspar, 1994; Torres & Saraiva, 1999; Lipiec & Hakansson, 2000; Beutler et al., 2005).

Perante a busca da maximização sustentável da produção agrícola, torna-se necessária a adoção de medidas que melhorem a estrutura física de solos degradados pela compactação e minimize os seus efeitos resultantes do tráfego de máquinas nas lavouras em SD. Uma medida bastante enfatizada na literatura é o emprego de sistemas de rotação de culturas que incluam plantas de cobertura com elevado potencial de produção de biomassa vegetal e dotadas de um sistema radicular abundante e com capacidade de romper camadas compactadas do solo (Torres & Saraiva, 1999; Hamza & Anderson, 2005). No entanto, o que se interpõe à pesquisa é a efetividade desse sistema e o tempo mínimo necessário para que ocorra a recuperação da estrutura física do solo com elevado grau de compactação inicial para atingir níveis de rendimento de grãos das culturas sustentáveis econômica e ambientalmente.

Na atmosfera do solo existe um grande dinamismo dos processos físicos ocorrentes, com repercussões sobre a estrutura do solo, até que esta encontre o estado estável (Vezzani, 2001). Dessa forma, a recuperação física de solos compactados, com a utilização de plantas de cobertura pode levar um tempo longo (Corsino & Ferraudo, 1999). A efetividade do sistema apresenta algumas contradições, principalmente devido aos bioporos produzidos pelo sistema radicular de algumas espécies de cobertura, os quais não diminuem a densidade média do solo, entretanto constituem-se em caminhos preferenciais através dos quais as raízes das culturas de verão, de produção de grãos, podem crescer através das camadas compactadas (Silva & Rosolem, 2002). Outrossim, pelo fato dos bioporos serem longos e contínuos, possuem importância sobre os fluxos de água e gases no solo (Oades, 1993).

Frequentemente documentado na literatura (Zhang et al., 1997; Arvidsson, 1998; Braida, 2004; Jarecki et al., 2005) está o efeito da matéria

orgânica do solo oriunda dos resíduos vegetais das plantas de cobertura de solo no inverno e das culturas de grãos implantadas no verão, reduzindo a densidade do solo, com o tempo. Para Soane (1990) isso ocorre, além do efeito da matéria orgânica do solo sobre a agregação, a sua menor densidade de partícula e ao seu baixo grau de empacotamento. A massa aérea dos resíduos vegetais colabora também sobre a manutenção da temperatura do solo e maior conteúdo de água na sua superfície, importante para o desenvolvimento radicular.

A eficiência das plantas de cobertura em recuperar solos degradados e/ou diminuir o efeito do tráfego agrícola na compactação do solo pode ser melhorada se esta prática for complementada pela limitação do tráfego de máquinas a determinadas regiões dentro da lavoura (tráfego controlado) e pelo uso de hastes sulcadoras da semeadora-adubadora para deposição do adubo, atuando a maiores profundidades. Há evidências de que estas práticas diminuem o grau de compactação (Botta et al., 2007; Veiga et al., 2007; Debiasi, 2008) e tenha efeitos positivos sobre o rendimento de culturas. No entanto, pouco se sabe a respeito do período de tempo que o solo, nesse sistema, leva para adquirir uma estrutura estável e com qualidade física para desempenhar adequadamente as suas funções (Karlen, et al., 1997).

A eliminação do tráfego nas áreas de cultivo contribui para o aumento do rendimento de grãos (Laguë et al., 2003). Li et al. (2006) encontraram, sob tráfego controlado, um aumento de 9,4% no rendimento das culturas de inverno e verão, quando comparado às áreas que receberam tráfego em toda área. A utilização de hastes sulcadoras para a deposição do adubo, atuando a maiores profundidades, baseia-se no rompimento de camadas compactadas (Unger & Kaspar, 1994), proporcionando condições físico-hídrica-mecânicas mais favoráveis ao desenvolvimento radicular de plantas em maiores profundidades. Aumentos do rendimento das culturas em função da atuação mais profunda das hastes sulcadoras de adubo foi verificado por Xavier (2005), especialmente quando da ocorrência de deficiências hídricas moderadas.

Levando-se em consideração o que foi anteriormente exposto, este estudo teve como hipóteses principais: I) o manejo do solo em semeadura direta, num sistema de rotação que inclui as plantas de cobertura de inverno, o

tráfego controlado e atuação mais profunda das hastes sulcadoras da semeadora, recuperaram a estrutura degradada pela compactação, levando o solo a atingir um estado estável de equilíbrio e de qualidade física, com o tempo, repercutindo positivamente sobre o rendimento do milho e da soja; II) as plantas de cobertura de solo no inverno, em comparação ao sistema em pousio no inverno, resultam em maior rendimento das culturas do milho e da soja; III) as áreas de solo trafegadas por rodados agrícolas apresentam menor rendimento de grãos das culturas do milho e da soja, em relação ao solo não trafegado; e IV) o aumento da profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora melhora o ambiente físico de crescimento radicular e, conseqüentemente, incrementa o rendimento do milho e da soja.

Para testar essas hipóteses, o objetivo desse estudo foi determinar o efeito de diferentes coberturas de inverno, do tráfego e da profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora, dentro do sistema de manejo do solo com a semeadura direta, sobre o rendimento das culturas do milho e da soja.

## **5.2 Material e Métodos**

O experimento localiza-se na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central. O solo da área experimental é classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico (EMBRAPA, 1999). A textura superficial deste solo é franco-argilo-arenosa. Demais informações, acerca do histórico da área experimental, do solo, clima, tratamentos para o manejo do solo e condução do experimento, estão descritas em material e métodos, do capítulo II. Para a complementação da discussão dos resultados do presente estudo são utilizados resultados físico e hídricos do solo referenciados nos capítulos II e III.

A estimativa do rendimento de grãos das culturas do milho e da soja, na safra 2008/2009, foi executada através da coleta de amostras em todas as subparcelas do experimento dos blocos 2 a 5 (Apêndice 2). As subparcelas são determinadas pela atuação da haste sulcadora para deposição de adubo (0,12 m e 0,21 m), e que estivessem sob o efeito de rodados de colhedora, rodados

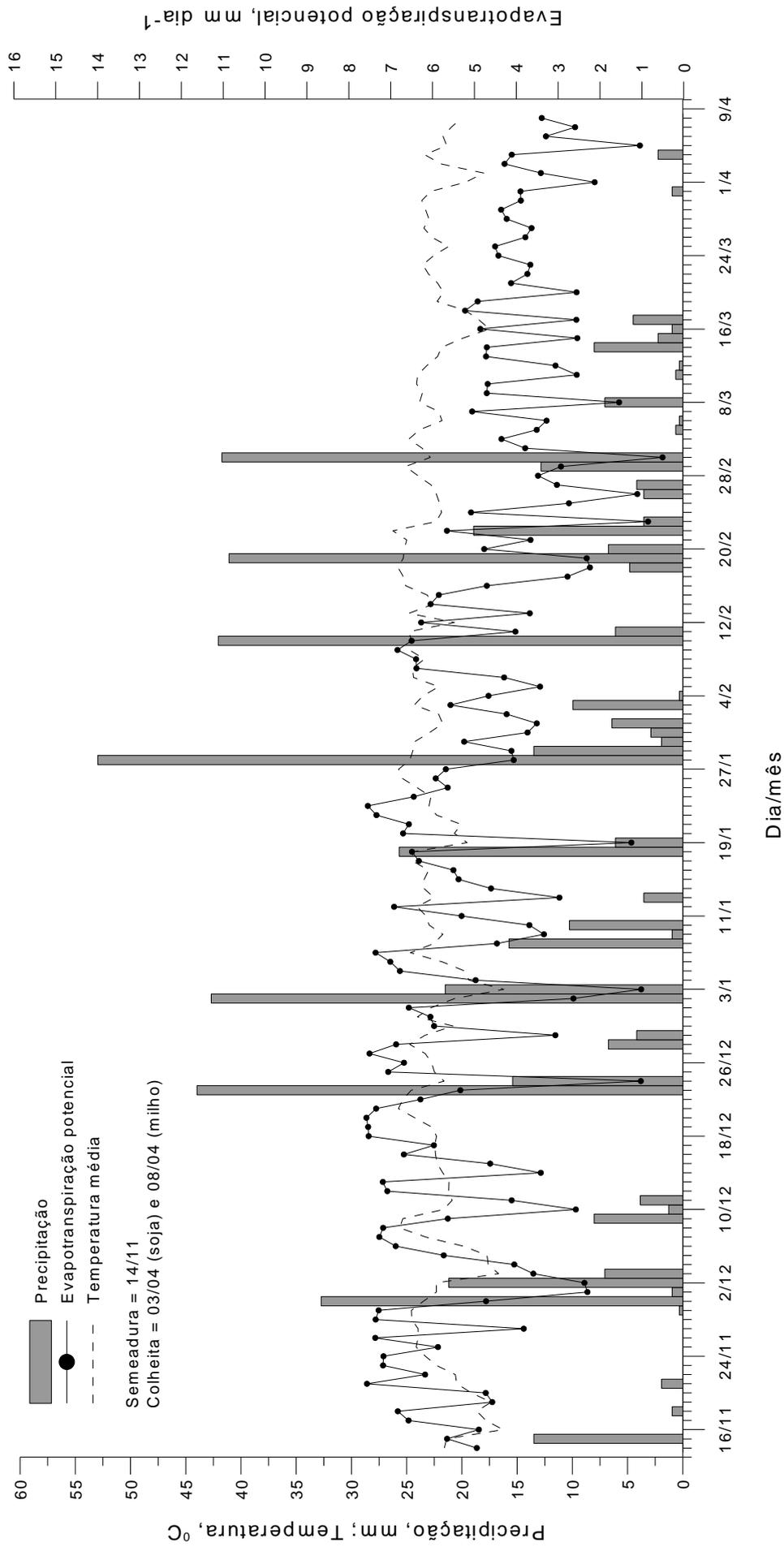
de trator e sem tráfego (Figura 1 – Capítulo II). As amostras foram constituídas pelas plantas existentes em 12 metros de fileiras, o que correspondeu a uma área de amostragem de 10,8 m<sup>2</sup>. Em seguida, as amostras foram trilhadas com uma trilhadora de grãos estacionária, e os grãos pesados. Determinou-se o teor de água dos grãos no momento da pesagem, através da secagem em estufa a 105° C por 72 h, propiciando assim a correção do peso para a umidade de referência de 13%.

Para a análise estatística dos dados, realizou-se a análise de variância (ANOVA) segundo o delineamento experimental em blocos ao acaso, mediante o emprego do modelo bifatorial com parcelas subdivididas no espaço e quatro repetições. O fator principal, distribuído nas parcelas, correspondeu as coberturas de inverno, enquanto que o secundário, disposto nas subparcelas, englobou as profundidades de atuação da haste sulcadora de adubo e a condição de tráfego. Quando a ANOVA indicou a ocorrência de interações significativas (teste F,  $p < 0,05$ ), as médias dos níveis de um fator foram comparadas dentro do outro, através do teste Tukey com 5% de significância. Quando não houve interação, e os efeitos individuais dos fatores foram significativos, as médias dos níveis de cada um deles foram comparadas separadamente, empregando-se o mesmo teste. A ANOVA e os testes de comparação entre médias foram realizados pelo teste Tukey, com o auxílio do programa computacional SAS (SAS Institute, 2002).

### **5.3 Resultados e Discussão**

O período transcorrido entre a semeadura das culturas de verão (14/11/2008), até a colheita (03/04/2009 da soja e 08/04/2009 do milho) apresentou distribuição da precipitação, evapotranspiração potencial e temperatura média do ar conforme apresentado na Figura 12.

A disponibilidade hídrica e o estado físico do solo têm influência direta sobre o rendimento das culturas. Em observação à Figura 12, percebe-se que a distribuição da precipitação foi uniforme no decorrer do ciclo das culturas, o que possivelmente tenha favorecido o desenvolvimento do milho e da soja.



**Figura 12.** Precipitação, temperatura média do ar e evapotranspiração potencial referentes ao período de desenvolvimento das culturas de verão, o milho e a soja, na safra 2008/2009. Fonte: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia/UFRGS.

### 5.3.1 Rendimento da cultura da soja

O rendimento de grãos da cultura da soja, na safra 2008/2009, em função das coberturas de solo no inverno, consta na Tabela 19. Cabe destacar que não houve interação significativa entre as coberturas de inverno com a profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo e entre as coberturas de inverno com a condição de tráfego, para o rendimento da soja, de forma que a comparação entre as médias dos tratamentos foi realizada separadamente para cada fator.

**Tabela 19.** Efeito da cobertura do solo no inverno sobre o rendimento de grãos cultura da soja. Safra 2008/2009.

Cobertura de inverno	Rendimento da soja
	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----
Nabo forrageiro	3,62 A
Pousio	3,20 B
Aveia preta + ervilhaca	2,98 B
<b>Média</b>	<b>3,26</b>

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). CV = 20,56%.

Verifica-se pela Tabela 19 que o maior rendimento de grãos da cultura da soja foi obtido quando da sua semeadura sobre o nabo forrageiro (3,62 Mg ha<sup>-1</sup>). O rendimento de grãos da soja no pousio e no consórcio aveia preta + ervilhaca foi 420 kg ha<sup>-1</sup> e 640 kg ha<sup>-1</sup> inferior, respectivamente, às encontradas para o nabo forrageiro, o que foi estatisticamente significativo. No entanto, o rendimento médio de grãos de soja (3,26 Mg ha<sup>-1</sup>) foi considerado alto. Como as características químicas do solo assemelharam-se entre as coberturas testadas (Apêndice 4), o rendimento de grãos da soja, provavelmente, esteja relacionado ao estado físico atual do solo (capítulos II e III), ao regime pluviométrico (Figura 12) e ao efeito de resíduos das espécies de cobertura de inverno.

O Capítulo II evidenciou a evolução e a recuperação física do solo, no decorrer do tempo, para todos os sistemas de manejo com cobertura de

solo no inverno, incluindo o pousio. O maior rendimento de grãos no sistema com nabo forrageiro (Tabela 19) pode estar relacionado à cobertura do solo com maior quantidade de resíduos (Capítulo II - Tabela 4), o que colaborou para a manutenção de um maior conteúdo de água no solo e menores oscilações na temperatura do solo, o que repercute sobre o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, no rendimento de grãos. O menor rendimento de grãos obtido para o sistema de manejo com aveia preta + ervilhaca, embora semelhante ao pousio (Tabela 19), ocorreu devido à velocidade de decomposição dos resíduos da ervilhaca. Resultados semelhantes foram obtidos por Beutler (2005), trabalhando nesse mesmo experimento, onde obteve que o consórcio aveia preta + ervilhaca reduziu o rendimento da soja em  $550 \text{ kg ha}^{-1}$  quando comparada à aveia preta e ao pousio na safra 2002/2003. O autor atribuiu esse resultado a maior disponibilidade de N no início do ciclo da soja, em função da decomposição dos resíduos da ervilhaca. Aita & Giacomini (2003) explicam que a velocidade de decomposição dos resíduos da ervilhaca e liberação de N é alta, mesmo quando consorciado à aveia preta. A semeadura das culturas de verão, para a safra 2008/2009, foi realizada três dias após a dessecação das culturas de cobertura de inverno. Considerando o fato da alta velocidade de decomposição da ervilhaca e disponibilização de N, isso pode ter acarretado em efeitos negativos sobre a infecção das plântulas de soja pelos rizóbios e, conseqüentemente, prejudicado a nodulação e a fixação biológica do N (EMBRAPA, 2006).

A quantidade de resíduos das culturas de cobertura de inverno, sobre a superfície do solo, contribuiu para o rendimento de grãos. Observando a Tabela 4 do Capítulo II verifica-se que a maior quantidade de resíduos foi proporcionada pelo nabo forrageiro ( $8,37 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) diferindo do pousio que apresentou a menor quantidade de resíduos ( $3,32 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Maiores quantidades de resíduos proporcionaram maior rugosidade superficial, maior infiltração e conservação da água no sistema solo, diminuindo a sua evaporação, bem como menores oscilações de temperatura do solo, o que repercutiu sobre o desenvolvimento radicular da cultura da soja e conseqüentemente sobre o seu rendimento.

Como já evidenciado anteriormente, o solo apresentou evolução na sua recuperação física, com o tempo. O rendimento de grãos, além de estar

atrelado a este fato, mostra-se muito dependente do regime hídrico. Debiasi (2008), em avaliação da safra agrícola 2005/2006, na mesma área experimental da presente pesquisa, encontrou rendimento médio da soja de  $1,75 \text{ Mg ha}^{-1}$ , sendo que o menor valor foi encontrado para o sistema em pousio ( $1,57 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Neste período o solo possuía maior densidade, menor porosidade total e menores teores de matéria orgânica, em comparação com os valores atuais, estudados no Capítulo II. Dessa forma, o solo apresentava menor qualidade física, o que poderia estar repercutindo sobre o rendimento de grãos. O autor ainda atribuiu o menor rendimento do sistema com pousio a maior densidade do solo, sendo que na camada superficial estava acima dos limites críticos ao crescimento das plantas sugeridos por Reichert et al. (2003), que em média para a classe textural do solo utilizado nesta pesquisa é na média de  $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ . A evolução da estrutura física do solo, documentada no Capítulo II, mostra que a densidade do solo para o pousio, em 2008 foi de  $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$ , na camada superficial (Capítulo II, Tabela 9). Entretanto, na safra 2005/2006 ocorreram vários períodos relativamente longos sem chuvas e segundo Debiasi (2008), o déficit hídrico atingiu praticamente toda a fase reprodutiva dessa cultura, repercutindo negativamente sobre o rendimento da cultura. De forma diferenciada, na safra 2006/2007, como levantado por Debiasi (2008), o regime hídrico foi favorável ao desenvolvimento das culturas de verão tornando alto rendimento da soja, em média  $3,54 \text{ Mg ha}^{-1}$ , não encontrando diferenças significativas entre os tratamentos com cobertura do solo no inverno.

Em situações de deficiência hídrica os efeitos negativos sobre as plantas produzidos por um elevado grau de compactação tornam-se mais acentuados (Unger & Kaspar, 1994; Torres & Saraiva, 1999; Lipiec & Hakansson, 2000; Beutler et al., 2005). Isto ocorre porque o aumento do conteúdo de água diminuiu a resistência mecânica à penetração (Tormena et al., 1998; Genro Junior et al., 2004; Cavalieri et al., 2006), de forma que em solos suficientemente úmidos as raízes podem atravessar camadas compactas sem grandes dificuldades. Além disso, o armazenamento de água disponível às plantas tende a ser baixo em solos compactados, devido à menor capacidade de infiltração (Dexter, 1991) e a maior energia de retenção da água (Reichardt & Timm, 2004). A média de rendimento de grãos de soja encontrado por

Debiasi (2008) na safra 2006/2007 foi maior do que a encontrada para a safra 2008/2009, que foi de 3,26 Mg ha<sup>-1</sup>. Isso, no entanto, pode ter ocorrido em função do regime hídrico na safra 2006/2007, ter-se apresentado melhor distribuído durante os períodos mais críticos do ciclo de desenvolvimento dessa cultura, como a floração, a formação de legumes e enchimento de grãos, já que houve evolução positiva da qualidade física do solo, até o presente momento.

Não houve diferença significativa, quando avaliada o rendimento da soja, nas áreas trafegadas por rodados do trator agrícola, colhedora e nas linhas de semeadura não trafegadas (Tabela 20). Embora as menores densidades (Capítulo II - Tabela 9) e melhores condições de aeração do solo (Capítulo III, Tabela 15), tenham sido obtidas nas condições de solo não trafegado, isso não repercutiu sobre o rendimento de culturas. Isso ocorreu em função da qualidade física do solo adquirida com o tempo, da boa distribuição de chuvas durante o ciclo das culturas e a compactação aparente ocasionada pelo tráfego de rodados de maquinários não ser restritiva ao desenvolvimento de plantas.

**Tabela 20.** Efeito da condição de tráfego (rodados do trator, rodados da colhedora e solo não trafegado) sobre o rendimento de grãos da cultura da soja. Safra 2008/2009.

<b>Condição de tráfego</b>	<b>Rendimento da soja</b> ----- Mg ha <sup>-1</sup> -----
Rodados do trator	3,28 A
Rodados da colhedora	3,28 A
Não trafegado	3,24 A
<b>Média</b>	<b>3,26</b>

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05). CV = 22,22%

A profundidade de atuação das hastes sulcadoras da semeadora não afetou de forma significativa o rendimento da soja (Tabela 21). Beutler (2005) e Debiasi (2008) também não obtiveram resposta do rendimento da soja ao emprego de maiores profundidades de atuação da haste sulcadora de adubo, mesmo em safras agrícolas que apresentaram déficit hídrico. Por outro lado, Xavier (2005) concluiu que, na ausência de irrigação, o rendimento da

soja foi aproximadamente  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  superior quando a haste atuou a 0,10 m, comparativamente a 0,064 m, diferença essa que se mostrou estatisticamente significativa.

A ausência de diferenças significativas no rendimento de grãos da soja, na safra 2008/2009, em virtude da profundidade de atuação das hastes sulcadoras da semeadora (Tabela 21), pode ser justificada, além da adequada disponibilidade hídrica durante os subperíodos mais críticos da soja, a própria mobilização na linha de semeadura em ambas as profundidades apresentarem-se igualmente favorável ao estabelecimento das culturas. A mobilização na linha de semeadura, com a haste sulcadora atuando a maiores profundidades, apresenta efeitos positivos sobre os parâmetros físico-hídrico-mecânicos. Com a mobilização, mesmo que somente na linha de semeadura, há diminuição das limitações físicas ao desenvolvimento radicular, principalmente da resistência mecânica à penetração de raízes no solo.

**Tabela 21.** Efeito da profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora-adubadora sobre o rendimento de grãos da cultura da soja. Safra 2008/2009.

<b>Profundidade da haste sulcadora</b> ----- m -----	<b>Rendimento da soja</b> ----- $\text{Mg ha}^{-1}$ -----
0,21	3,36 A
0,12	3,17 A
<b>Média</b>	<b>3,26</b>

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). CV = 21,86%.

A conservação da água no sistema solo, manejado com semeadura direta e mobilizado esporadicamente pela escarificação é evidenciada por Câmara e Klein (2005). Nesse sentido, Vieira e Klein (2007) encontraram, 24 meses após a escarificação, maior infiltração de água no sistema em comparação com área não escarificada. Citam-se esses trabalhos no intuito de evidenciar que a mobilização na linha de semeadura e a escarificação, citada anteriormente, podem apresentar efeitos semelhantes no solo. Entretanto os efeitos em longo prazo, sobre a conservação do solo e da água, e,

consequentemente sobre o desenvolvimento de plantas, podem ser mais positivos no sistema onde mobiliza-se somente a linha de semeadura. Isso ocorre porque o solo manejado de uma determinada forma tende a buscar um equilíbrio, com o tempo, perante os seus processos físicos, e quando qualquer sistema de manejo diferenciado é atribuído, ocorre uma desordem estrutural, afetando os processos físicos e assim começa a prevalecer a busca por um novo estado equilíbrio físico (Vezzani, 2001). O solo da presente pesquisa, com o manejo utilizado (integração da SD com utilização de plantas de cobertura de solo de inverno, tráfego controlado e maior profundidade de atuação das hastes sulcadoras da semeadora), desde 2002, além de ter recuperado fisicamente a estrutura de solo degradada, alcançou ou está próximo de atingir o estado de equilíbrio físico, evidenciado no Capítulo II.

### **5.3.2 Rendimento da cultura do milho**

Na avaliação do rendimento de grãos da cultura do milho na safra 2008/2009, da mesma forma que para a soja, a ANOVA demonstrou que não houve interações significativas entre as coberturas de inverno e a profundidade de atuação da haste sulcadora de adubo e entre as coberturas de inverno e as condições de tráfego. Desse modo, as comparações foram efetuadas em separado para cada fator testado.

A Tabela 22 relaciona o rendimento de grãos da cultura do milho em função das coberturas de solo no inverno. Verifica-se que o maior rendimento de grãos de milho foi obtido quando da sua semeadura sobre a aveia preta + ervilhaca ( $11,57 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), o que não diferiu do nabo forrageiro ( $10,64 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), embora tenha apresentado  $930 \text{ kg ha}^{-1}$  (aproximadamente 15 sacas) a mais. O sistema em pousio apresentou o menor rendimento de milho ( $10,35 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), o que não diferiu do tratamento nabo forrageiro. Entretanto, o rendimento encontrado para o milho, em qualquer dos manejos com cobertura do solo no inverno foi considerado alto ( $10,85 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), tendo em vista que o experimento não foi irrigado e a cultura foi semeada fora da época recomendada, superando em praticamente o dobro do rendimento da cultura nos anos anteriores à safra 2008/2009.

**Tabela 22.** Efeito da cobertura do solo no inverno sobre o rendimento de grãos da cultura do milho. Safra 2008/2009.

Cobertura de inverno	Rendimento do milho
	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----
Aveia preta + ervilhaca	11,57 A
Nabo forrageiro	10,64 AB
Pousio	10,35 B
<b>Média</b>	<b>10,85</b>

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). CV = 16,84%.

Como as características químicas do solo se assemelharam entre as coberturas testadas (Apêndice 4), igualmente para a cultura da soja, o rendimento de grãos de milho é relacionado ao estado físico atual do solo (capítulo II), ao regime pluviométrico (Figura 12) e ao efeito resíduos das espécies de cobertura de inverno e das culturas de verão, sendo que destas, há a rotação anual. O capítulo II evidenciou a evolução e a recuperação física do solo, no decorrer do tempo, e isso parece ter repercutido maximizando o potencial produtivo da cultura do milho. O rendimento do milho nos anos anteriores, como evidenciado por Beutler (2005) e por Debiasi (2008) foi notadamente influenciado pela escassez hídrica, principalmente durante os períodos mais críticos da cultura do milho, e assim, os efeitos proporcionados pelas plantas de cobertura de inverno e/ou atuação mais profunda das hastes sulcadoras durante a semeadura, tornaram-se minimizados.

Um dos fatores mais limitantes ao rendimento de grãos de milho é a disponibilidade de N, pois este é um dos nutrientes requeridos em maior quantidade por essa cultura e que, em solos tropicais, apresenta-se normalmente em baixas concentrações (França & Resende, 2003). Os tratamentos avaliados englobam uma leguminosa no consórcio com a aveia preta (ervilhaca) e uma brassicácia (nabo forrageiro). A ervilhaca e o nabo forrageiro possuem o potencial de aumentar a disponibilidade de N no sistema e favorecer o desenvolvimento e rendimento do milho. Entretanto, as diferenças no rendimento de grãos de milho com a utilização de diferentes culturas de cobertura no inverno, com diferentes relações C/N, são reduzidas em função do aumento da quantidade de N fornecida via adubação química

(Pöttker & Roman, 1994). Na presente pesquisa procurou-se eliminar o problema relativo ao fornecimento de N às culturas utilizando uma dose de N via adubação química relativamente elevada, correspondente à quantidade recomendada pela Comissão...(2004) visando a produção de 7 Mg ha<sup>-1</sup> de grãos e considerando como cultura antecessora uma gramínea. Entretanto, a tendência foi de aumentar o rendimento de milho quando a cultura antecessora de inverno envolveu as espécies nabo forrageiro e ervilhaca, sendo a isto relacionado à maior disponibilidade de N ao sistema, por essas culturas.

Igualmente para a cultura da soja, não houve diferença significativa, quando avaliado o rendimento do milho, nas áreas trafegadas por rodados de trator agrícola, colhedora e nas linhas de semeadura não trafegadas (Tabela 23). Embora o solo não trafegado tenha apresentado uma melhor qualidade física-hídrica em comparação ao solo trafegado (Capítulos II e III), ressaltada principalmente através dos menores valores de densidade, maior macroporosidade superficial, maior permeabilidade do solo ao ar e maiores valores do índice S, isso não foi limitante ao desenvolvimento e rendimento das culturas do milho. Isso demonstra que os valores dos indicadores de qualidade física do solo, encontrados na situação de solo trafegado, não são restritivos à relação existente entre o solo e as plantas, num ano com chuvas regulares (Figura 12).

**Tabela 23.** Efeito da condição de tráfego (rodados do trator, rodados da colhedora e solo não trafegado) sobre o rendimento de grãos da cultura do milho. Safra 2008/2009.

Condição de tráfego	Rendimento do milho
	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----
Rodados do trator	11,18 A
Não trafegado	10,88 A
Rodados da colhedora	10,50 A
<b>Média</b>	<b>10,85</b>

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05). CV = 17,36 %.

A profundidade de atuação das hastes sulcadoras da semeadora não afetou, de forma significativa, o rendimento do milho (Tabela 24). Isso pode

ser atribuído ao fato de que ambas as profundidades de atuação da haste sulcadora atuaram minimizando a ocorrência de fatores restritivos ao desenvolvimento radicular de plantas, tais como a resistência mecânica à penetração e a densidade do solo, aumentando a relação entre macroporos e microporos, essencial aos fluxos de água e ar no solo. Houve, no entanto, a tendência de ocorrer o maior rendimento de grãos quando a haste sulcadora atuou a maiores profundidades.

Como já comentado anteriormente, são positivos os efeitos da utilização de hastes sulcadoras de semeadora sobre os parâmetros físico-hídrico-mecânicos do solo e conseqüentemente sobre o rendimento de culturas. Levien et al. (2003) não obteve diferença de rendimento do milho utilizando sulcadores de adubo, facão ou discos duplos. Entretanto, nas parcelas semeadas com facão houve menor número de plantas acamadas e quebradas, o que implicou em diferença significativa no rendimento de grãos passível de ser colhida com colhedora autopropelida munida de plataforma despigadora. O menor revolvimento do solo com a utilização dos discos duplos pode ter propiciado o desenvolvimento radicular mais superficial, e assim, as plantas apresentam-se mais suscetíveis ao tombamento e acamamento. Dessa forma, verifica-se que é positivo o efeito da utilização de hastes sulcadoras da semeadora, atingindo maiores profundidades, uma vez que promove um melhor ambiente radicular, na linha de semeadura, importante para o desenvolvimento e rendimento das culturas.

**Tabela 24.** Efeito da profundidade de atuação da haste sulcadora da semeadora-adubadora sobre o rendimento de grãos da cultura do milho. Safra 2008/2009.

<b>Profundidade da haste sulcadora</b> ----- m -----	<b>Rendimento do milho</b> ----- Mg ha <sup>-1</sup> -----
0,21	11,07 A
0,12	10,63 A
<b>Média</b>	<b>10,85</b>

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). CV = 14,67.%.

A análise conjunta de todos os dados de rendimento das culturas do

milho e da soja, anteriormente discutidos, permite inferir que, dentro das condições de manejo sob as quais esse estudo foi realizado e, conseqüentemente, a recuperação física alcançada, em um período inferior a dez anos, o rendimento de culturas de verão foi satisfatória. Entretanto cabe ressaltar que foi uma safra agrícola que apresentou chuvas regulares. Para a presente pesquisa, perante a evolução e a qualidade física adquirida do sistema (documentadas nos Capítulos II e III), permite fazer a inferência de que o déficit hídrico é o maior precursor em quedas nos rendimentos do milho e da soja.

#### 5.4 Conclusões

1. O rendimento de grãos das culturas da soja e do milho foram altos, com médias, respectivamente, de 3,26 Mg ha<sup>-1</sup> e 10,85 Mg ha<sup>-1</sup>. O alto rendimento de grãos foi devido à disponibilidade hídrica adequada e principalmente à qualidade física do solo adquirida com o tempo, resultante do manejo de solo em semeadura direta com a utilização de plantas de cobertura de solo no inverno e maiores profundidades de atuação das hastes sulcadoras;

2. As plantas de cobertura de solo no inverno, o nabo forrageiro e a aveia preta + ervilhaca, proporcionaram, respectivamente, para a soja e o milho os maiores rendimentos. A maior cobertura do solo proporcionada pelos resíduos culturais do nabo forrageiro aumentou o rendimento da soja. A maior quantidade de resíduos vegetais sobre o solo, oriundos das culturas de cobertura de inverno, o nabo forrageiro e o consórcio aveia preta + ervilhaca, e a maior disponibilização de N por essas culturas, aumentaram o rendimento de grãos do milho;

3. O tráfego de rodados não influenciou sobre o rendimento de grãos de milho e de soja, sendo reflexo da qualidade física do solo adquirida com o tempo e adequada ao desenvolvimento de plantas, e à boa disponibilidade hídrica na safra 2008/2009;

4. A maior profundidade de atuação da haste sulcadora (0,21 m), em comparação a menor profundidade (0,12 m) não influenciou sobre o rendimento de grãos das culturas da soja e do milho. Os efeitos promovidos

por essas duas profundidades de atuação das hastes sulcadoras, sobre a linha de semeadura, são igualmente favoráveis ao desenvolvimento radicular, infiltração e conservação de água no sistema.

## 6 CONCLUSÕES GERAIS

O solo degradado fisicamente pela compactação, passando a ser manejado continuamente com a semeadura direta, num sistema que incluiu as plantas de cobertura de solo no inverno, tráfego controlado e maior profundidade de atuação das hastes sulcadoras da semeadora, apresenta-se recuperado e com estado estável de sua estrutura, em sete anos. A recuperação das funções primordiais do solo, perante o manejo, com o tempo levou o solo a adquirir qualidade adequada ao desempenho de suas funções, perante a sustentabilidade da produção agrícola e conservação dos recursos naturais (solo e água).

A recuperação da estrutura física do solo em sete anos foi verificada a partir do estudo evolutivo de parâmetros indicadores de qualidade do solo que foram a matéria orgânica do solo e suas frações particulada e associada aos minerais, a densidade e a porosidade do solo. Houve aumento nos teores de matéria orgânica do solo e de suas frações, com o tempo, o que influenciou diretamente sobre a diminuição dos valores de densidade e no aumento da macroporosidade e da porosidade total do solo.

A densidade, a porosidade e a matéria orgânica do solo influenciaram diretamente sobre o comportamento dos indicadores físico-hídricos de qualidade do solo, avaliados através da retenção de água no solo, índice S e permeabilidade do solo ao ar. Todos esses indicadores de qualidade do solo utilizados foram sensíveis e eficazes em detectar as alterações na estrutura do solo em função do manejo.

O efeito da matéria orgânica sobre a diminuição da densidade e aumento da quantidade de poros de maior tamanho no solo, aumentou a retenção de água em maiores potenciais. O aumento da densidade do solo

sobre as regiões de solo trafegadas por rodados de máquinas, aumentou a retenção de água nos menores potenciais. O aumento da retenção de água no solo na capacidade de campo, no solo trafegado, aumentou a quantidade de água disponível às plantas.

O índice S indicou que a melhor qualidade física do solo foi encontrada no solo não trafegado, nas camadas de 0,02 - 0,05 e de 0,10 – 0,13 m.

A permeabilidade do solo ao ar apresentou alta variabilidade, devida a grande diversidade no tamanho, proporção, forma e continuidade dos poros no solo, entretanto, expressou as alterações na estrutura do solo quando a proporção de macroporos foi afetada. A diminuição da macroporosidade, em decorrência do aumento da densidade do solo, em solo trafegado por rodados de máquinas, reduziu a permeabilidade do solo ao ar.

A densidade e a porosidade do solo influenciaram diretamente sobre o comportamento físico-hídrico do solo, sendo assim indicadores ideais de qualidade física do solo.

O rendimento de grãos das culturas da soja e do milho foi alto, sendo reflexo da qualidade física do solo adquirida com o tempo, perante o manejo de solo utilizado. As plantas de cobertura de solo no inverno, o nabo forrageiro e a aveia preta + ervilhaca, proporcionaram, respectivamente, para a soja e o milho os maiores rendimentos. O tráfego de rodados de maquinários e a profundidade de atuação das hastes sulcadoras da semeadora não influenciaram sobre o rendimento de grãos de milho e de soja.

O sistema de manejo do solo empregado na pesquisa, e especificado anteriormente, é sustentável, uma vez que atuou conservando os recursos naturais, recuperou as funções primordiais do solo e atingiu bom rendimento de culturas produtoras de grãos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004.

ACIAR - AUSTRALIAN CENTRE FOR INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH. **Project 9209**: Conservation tillage and controlled traffic, Canberra, 1998.

ADDISCOTT, T. M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Madison, v. 46, p. 161-168, 1995.

AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de Resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 601-612, 2003.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.189-197, 2001.

ANDRADE, R. da S. **Efeito de culturas de cobertura na qualidade física do solo sob plantio direto**. 2008. 78 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira de**

**Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.4, p. 411-418, 2009.

ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 1-2, p.159-170, 1998.

AZOOZ, R. H.; ARSHAD, M. A.; FRANZLUEBBERS, A. J. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in northwestern Canada. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1197-1201, 1996.

BALL, B. C.; CAMPBELL, D. J.; HUNTER, E. A. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, n. 1-2, p. 83-91, 2000.

BALL, B. C.; SCHJONNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (ed.). **Methods of soil analysis**. 5th ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 2002. Part 4, p. 1141-1158.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica do solo. In: SANTOS G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O.(Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. Porto Alegre : Metrópole, 2008. p. 7 – 16.

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, p. 677-683, 2004.

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

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de

CO<sub>2</sub>. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.599-607, 2000b.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.2, p. 235-239, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p.599-607, 2000.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F., SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26 p. 829-834, 2002.

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

BEUTLER, J. F. **Parâmetros de solo e máquinas na semeadura direta de milho e soja em duas coberturas de solo sobre campo natural**. 2005. 107 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2005.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos.. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 829-834, 2002.

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M. R.; CARDOSO, L. S.; SILVA, M. I. G. **Clima da Estação Experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 78 p.

BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; GUPTA, H. S. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 129-140, 2006.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo a penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 975 – 983, 2008.

BLANCO-CANQUI, H. LAL, R. POST, W. M.; CESAR IZAURRALDE, R.; SHIPITALO, M. J. Soil hydraulic properties influenced by corn stover removal from no-till corn in Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.92, p.144-155, 2007.

BOTTA, G. F.; POZZOLO, O.; BOMBEN, M.; ROSATTO, H.; RIVERO, D.; RESSIA, M.; TOURN, M.; SOZA, E.; VAZQUEZ, J. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max L.*): Effect on yields and soil under a direct sowing system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 145-154, 2007.

BRADY, N. C. **The natures and properties of soils**. 8th ed, New York: MacMillan, 1984. 639 p.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. 2004. 107 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRANDT, A. A. **Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo**. 2009. 161 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife: IPEAS, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, 30).

BREWER, R.; SLEEMAN, J. R. Soil structure: attempts at its quantitative

characterization. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 11, p. 172 – 185, 1960.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 789-796, 2005.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; CASSOL, L. C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 383-391, 1999.

CANALI, L. B.; ROLOFF, G. Influência do preparo e da correção do solo na condição hídrica de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 99-104, 1997.

CARTER, M. R. Organic matter and sustainability. In: REES, B. C.; BALL, B. C.; CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A. (Eds.) **Sustainable management of soil organic**, Wallingford : CAB International, 2001. p. 9 -22.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. The influence of crop rotation on soil structure and soil physical properties under conventional tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 37, n. 2-3, p.113-125, 1996.

CHAN, K. Y. Consequences of changes in particulate organic carbon in vertisols under pasture and cropping. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, p.1376-1382, 1997.

CHAN, K. Y.; OATES, A.; SWAN, A.D.; HAYES, R. C.; DEAR, B. S.; PEOPLES, M. B. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. **Soil**

**and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 13-21, 2006.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, New York, v.20, p. 2-90, 1992.

COLLARES, G. L. **Compactação em latossolos e argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 394 p.

CONCEIÇÃO, P. C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil**. 138 f. 2006. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CONCEICAO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinamica da materia organica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p. 777-788, 2005.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.425-432, 1999.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 289-298, 1999.

COSTA, S. E. V. G. de A.; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.;

ANDRIGUETTI, M. H. Distribuição de potássio e de raízes no solo e crescimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.5, p. 1291-1301, 2009.

DA ROS, C. O. **Plantas de inverno para cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto**. 1993. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1993.

DA ROS, C. O.; AITA, C. Efeitos de espécies de inverno na cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 135-140, 1996.

DAO, T. H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a paleustoll. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.2, p.141-148, 1996.

DEBIASI, H. **Recuperação física de um argissolo compactado e suas Implicações sobre o sistema solo-máquina-planta**. 2008. 263 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 199-238, 1988.

DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 87-100, 1991.

DEXTER A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004a.

DEXTER A. R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 215-225, 2004b.

DEXTER A. R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p. 227-

239, 2004c.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182, 1996.

DIEKOW, J., MIELNICZUK, J., KNICKER, H., BAYER, C., DICK, D. P., KNABNER, I. K., Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 268, p. 319-328, 2005.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**, Madison: SSSA, 1994. p.1-20. (Special 35)

DORAN, J. W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro, 1997.

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q.; BOTREL, T. A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 1, p. 92-102, 1990.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 1999. 412 p.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja – Paraná 2007**. Londrina: CNPSo, 2006. 217 p.

FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos**: con énfasis en suelos de América Latina. 2.ed. San José: IICA, 1994. 420p.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M.; BRONSON, R. D. & MANNERING, J. V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na

porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 329-333, 1983.

FISH, A. N.; KOPI, A. J. The use of a simple field air permeability as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, Amsterdam, v. 63, p. 255-264, 1994.

FLIEBBACH, A.; OBERHOLZER, H-R.; GUNST, L. & MÄDER, P. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 118, p. 273-284, 2007.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, n. 1-2, p.21-35, 1998.

FORSYTHE, W. M. Las propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. **Fitotecnia Latino Americana**, Costa Rica, v. 4, p. 165-176, 1967.

FRANZLUEBBERS, A.J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, p. 95-106, 2002.

FRANÇA, G. E.; RESENDE, M. Manejo de corretivos e fertilizantes em agricultura irrigada. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; COUTO, L. (org.). **Cultura do milho irrigado**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 2003. p. 89-196.

FONTANELA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de Manejo e níveis de tráfego**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,

Viçosa, v. 28, n. 3, p. 477-484, 2004.

GOLDCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. **Soil process and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 245-266.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, p. 1633-1635, 1979.

HASSINK, J.; WHITMORE, A. P. A model of the physical protection of organic matter in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 131-139, 1997.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.

HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 71-85, 2000.

HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 105-120, 1990.

HARGROVE, W. L. Winter legumes as a nitrogen source for no-till grain sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, n. 1, p. 70-74, 1986.

HEINRICHS, R.; AITA, C.; AMADO, T. J. C.; FANCELLI, A. L. Cultivo consorciado de aveia e ervilhaca: relação C/N da fitomassa e produtividade do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p.

331-340, 2001.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 364 p.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. Amherst, Massachusetts : Academic Press, 1980. 413 p.

HORN, R.; DOMA H.; SOWISKA-JURKIEWICZ, A.; OUWERKERK, C. V. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1995.

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 207-219, 2004.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94 f. Tese (Doutorado – Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

IVERSEN, B. V. et al. Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 2, p. 618-626, 2003.

JANZEN, H. H., CAMPBELL, C. A., BRANDT, S. A., LAFOND, G. P., TOWNLEY-SMITH, L. Light-fraction organic matter in soils from longterm crop rotations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1799–1806. 1992.

JARECKI, M. K.; LAL, R.; JAMES, R. Crop management effects on soil carbon sequestration on selected farmers' fields in ortheastern Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 2, p. 265-276, 2005.

JORAJURÍA, D.; DRAGHI, L. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 66, n. 4, p 261–265, 1997.

JUHÁSZ, C. E. P.; COOPER, M.; CURSI, P. R.; KETZER, A. O.; TOMA, R. S. Savanna woodland soil micromorphology related to water retention. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n.4, p. 344-354, 2007.

JUNIOR, A. A. B.; BACKES R.L.; TÔRRES, A. N. L. et al. Desempenho de plantas invernais na produção de matéria e cobertura do solo sob cultivos isolado e em consórcios. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 3, n. 1, p. 38-42, 2004.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH M. J.; DORAN J. W.; CLINE R. G.; HARRIS R. F.; SCHUMAN G. E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 61, p. 4-10, 1997.

KARLEN, D.L.; ANDREWS, S.S.; DORAN, J.W. Soil quality: Current concepts and applications. **Advances in Agronomy**, New York, v. 74, p. 1-40, 2001.

KARLEN, D. L.; EASH, N. S.; UNGER, P. W. Soil and crop management effects on soil quality indicators. **American Journal of Alternative Agriculture**, Maryland, v. 7, p. 48-55, 1992.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em área sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, 1995.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, p.959-964, 2000.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição de diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista**

**Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, 2002.

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

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KIRBY, J. M. The influence of soil deformations on the permeability to air. **European Journal of Soil Science**. Madison, v. 42, p. 227-235, 1991.

LAGUË, C.; AGNEW, J.; KHELIFI, M. Theoretical evaluation on the feasibility of controlled-traffic farming (CTF) using wide-span implements carriers (WSIC) for Canadian agriculture. In: ANUAL MEETING OF THE CSAE/SCGR, 2003, Montréal, Canada. **Proceedings...** Montreal, 2003. Paper n.03-233.

LAL, R. Residue management, conservation tillage and restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub>-enrichment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 81-107, 1997.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, SSSA, 1994. p. 37-51. (Special, 35).

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 2002. 58 f. Dissertação (Mestrado - Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

LEÃO, T. T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de manejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 415 – 432, 2004.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions.

**Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LEVIEN, R.; GAMERO, C. A.; FURLANI, C. E. Semeadura direta de milho com dois tipos de sulcadores de adubo, transversalmente ao sentido do declive do terreno. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2003.

LI, Y. X.; TULLBERG, J. N.; FREEBAIRN, D. M. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, p. 282-292, 2006.

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; ROMERO, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 2005, v. 29, p. 677-684.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 307-317, 1991.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 87-94, 2000.

LOVELAND, P.; WEBB, J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review, **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 70, p.1-18, 2003.

MELLO, L. M. M.; TAKAHASHI, C. M.; YANO, E. H. Condicionamento físico do solo na linha de semeadura de milho em plantio direto: mecanismos sulcadores e rodas compactadoras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2002, Salvador. **Anais...** Salvador, 2002.

MERTEN, G. H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 369-374, 1991.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURTI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.) **Tópicos ciência do solo**. Viçosa, MG : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3. p.209-248.

MIGLIERINA A. M.; IGLESIAS, J. O.; LANDRISCINI, M. R.; GALATINI, J. A.; ROSSEL, R. A. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 129-135, 2000.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 76, n. 1-3, p. 319-337, 1984.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, 1993.

O'SULLIVAN, M. F.; HENSHALL, J. K.; DICKSON, J. W. A simplifid method for estimating soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 4, p. 325-335, 1999

PETH, S.; HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim v. 169, p. 401-410, 2006.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 355 p.

PÖTTKER, D.; ROMAN, E. S. Efeito de resíduos de culturas e do pousio de inverno sobre a resposta do milho a nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 5, p. 763-770, 1994.

POTT, A. **Levantamento ecológico da vegetação de um campo natural sob**

**três condições: pastejado, excluído e melhorado.** 1974. 223f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Plantas Forrageiras, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1974.

PRIMAVESI, A. **O manejo ecológico do solo.** 4.ed. São Paulo: Nobel, 1982. 541p.

PULLEMAN, M. M.; BOUMA, J.; VAN ESSEN, E. A.; MEIJLES, E. W. Soil organic matter content as a function of different land use history. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 64, p. 689-693, 2000.

RANELLS, N. N.; WAGGER, M. G. Nitrogen release from crimson clover in relation to plant growth stage and composition. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, p. 424-430, 1992.

RANELLS, N. N.; WAGGER, M. G. Nitrogen release grass and legume cover crop monocultures and bicultures. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 777-782, 1996.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, Amsterdam, v. 42, n. 3-4, p. 259-280, 2005.

RAPER, R. L.; KIRBY, J. M. Soil compaction: How to do it, Undo it, or Avoid doing it. In: AGRICULTURAL EQUIPMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2006, Louisville, Kentucky. [**Proceedings...**] St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. p. 1-14. (ASABE Distinguished Lecture Series, 30)...

RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advanced Soil Science**, New York, v. 16, p. 213-234, 1991.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** Barueri: Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e

sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.27, p.29-48, 2003.

REINERT, D. J., REICHERT, D.J.; VEIGA, M.; SUZUKI, L.E.A.S. Qualidade física dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16, 2006, Aracaju. **Resumos e Palestras...** Aracaju, 2006.

REIS, E. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES, H. C.; NAIME, J. M.; ARAÚJO, E. F. Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 777-785, 2006.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORREA, G. F. **Pedologia: base para a descrição de ambientes**. 2.ed. Viçosa : NEPUT, 1997. 367 p.

RESSURECCION, A. C.; KAWAMOTO, K.; KOMATSU, T.; MOLDRUP, P.; OZAKI, N.; ROLSTON, D. E. Gás transport parameters along field transects of a volcanic soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 172, p. 3 – 16, 2007.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuaria Oeste, 2002. 86 p.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; MACEDO, M. C. M.; FABRICIO, A. C.; BROCH, D. L.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C. Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V. **Dinámica y mecânica de suelos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1996. 426 p.

SAS INSTITUTE. **Getting started with the SAS learning edition**. Cary, 2002. 200p.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de**

**culturas**. 2003. 108f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SEYBOLD, C. A.; MAUSBACH, M. J.; KARLEN, D. L.; ROGERS, H. H. Quantification of soil quality. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. (Eds). **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 387-404.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.87, p.194-204, 2006.

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. 21, n. 1, p. 113-117, 1997a.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 313-319, 1997b.

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

SILVA, A. P. Interação manejo versus física. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria-RS. **Palestra...** Santa Maria, 2004.

SILVA, A. A.; SILVA, P. R. F.; SUHRE, E.; ARGENTA, G.; STRIEDER, M. L.; RAMBO, L. Sistemas de coberturas de solo no inverno e seus efeitos sobre o rendimento de grãos do milho em sucessão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 928-935, 2007.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A. P.; LEÃO, T. P.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1535 – 1545, 2009.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; LIMA, J. F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 833-842, 2004.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, R. H. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 855-860, 2002.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J. C. M.; ALBERECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils effects of no-tillage. **Agronomie**, Paris, v. 22, p. 755-77, 2002.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 179-201, 1990.

SOUZA, E. D. **Evolução da matéria orgânica, do fósforo e da agregação do solo em sistema de integração agricultura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo**. 2008. 163 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M.A.C.; PAULINO, H.B.; SILVA, C.A. & BUZETTI, S. Fracos do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, p. 323-329, 2006a.

SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; PAULINO, H.B.; SILVA, C.A.; BUZETTI, S. Alterações nas frações do carbono em um neossolo quartzarenico submetido a diferentes sistemas de uso do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.

28, p. 305-311, 2006b.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

STONE, L. F.; BALBINO, L.C.; CUNHA, E. Índice S como indicador da qualidade física do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Resumos...** Canoas, 2005.

STRECK, C. A. **Índice S e fluxo de água e ar em solos do Sul do Brasil**. 2007. 95 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SUHRE, E. et al. Sistemas de cobertura de solo no inverno e seus efeitos sobre o rendimento de grãos de milho implantado em sucessão. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 2004, Cuiabá. **Resumos Expandidos...** Sete Lagoas, 2004. CD-ROM.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 Ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, C. F. A.; PAULETTO, E. A.; SILVA, J. B. Resistência mecânica à penetração de um Argissolo Amarelo distrófico típico sob diferentes sistemas de produção em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1165-1167, 2003.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA Soja, 1999. 58 p. (EMBRAPA Soja, Circular Técnica, 23).

TRINSOUTROT, I.; RECOUS, S.; BENTZ, B.; LINÉRES, D.; CHÈNEBY, D. &

NICOLARDOT, B. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 918-926, 2000.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 759-766, 1994.

USDA-NRCS. Soil Quality Institute, Ames, IA. Disponível em <http://soils.usda.gov/sqi/> Acesso em: 10 abr. 2008.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 892-898, 1980.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 104-113, 2007.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 68, p. 75-94, 1949.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 743-755, 2009.

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.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1271-1280, 2007.

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren**. **Schriftenreihe**. Kiel : Institut für Pflanzenernährung

und Bodenkunde. Christian Albrechts Universität Kiel, 2004. 63 p.

WAGGER, M. G. Cover crop management and nitrogen rate in relation to growth and yield of no-till corn. **Agronomy Journal**, Madison, av. 81, p. 533-538, 1989.

WILLIAMS, J.; PREBBLE, R. E.; WILLIAMS, W. T.; HIGNETT, C. T. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. **Australian Journal of Soil Research**, Amsterdam, v. 21, p.15-32, 1983.

WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, E. 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.

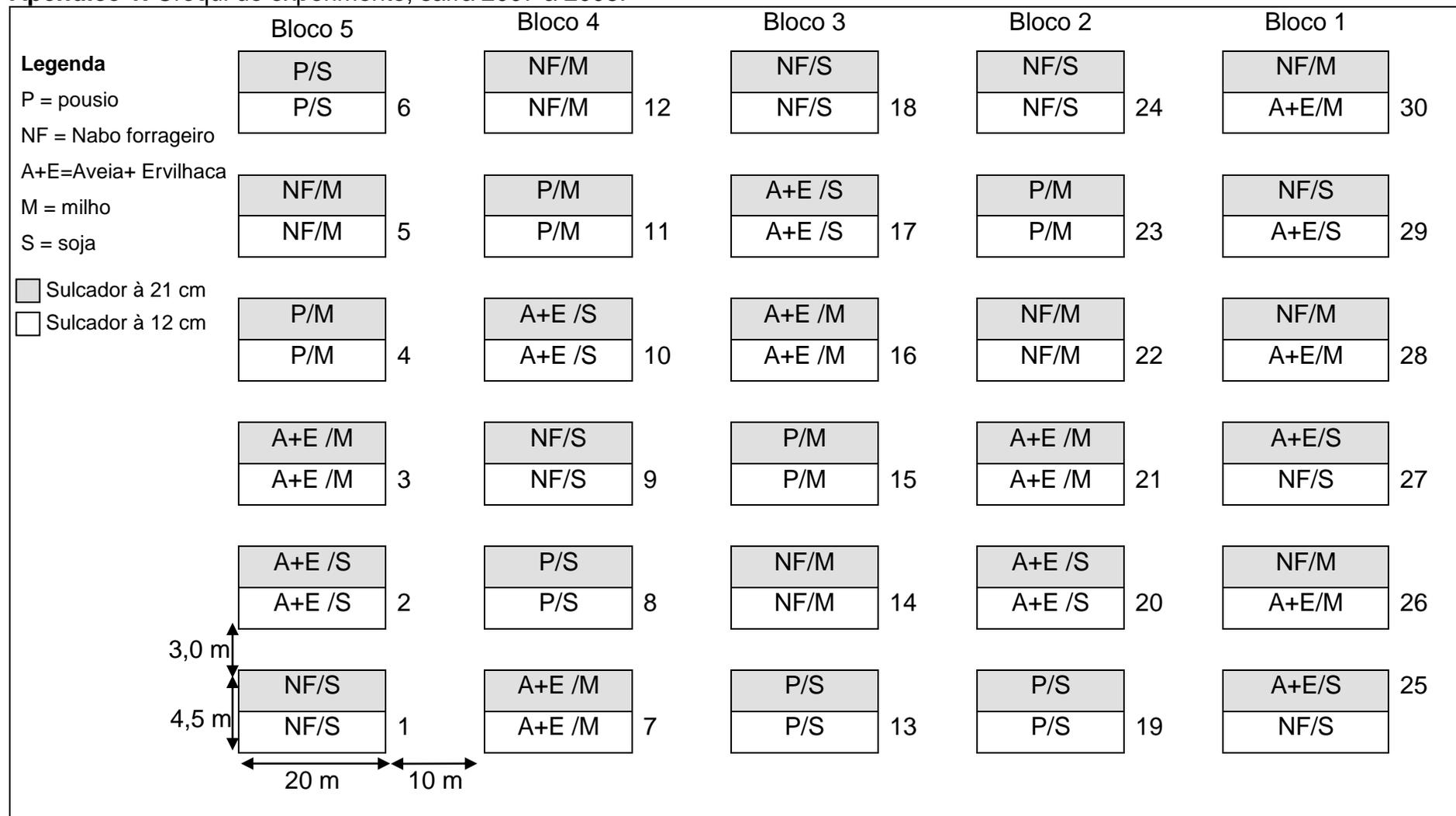
XAVIER, A. **Comportamento da cultura da soja em função de resíduos culturais, mobilização do solo e irrigação, em semeadura direta**. 2005. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2005.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F. C. B.; MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, p. 510-519, 2007.

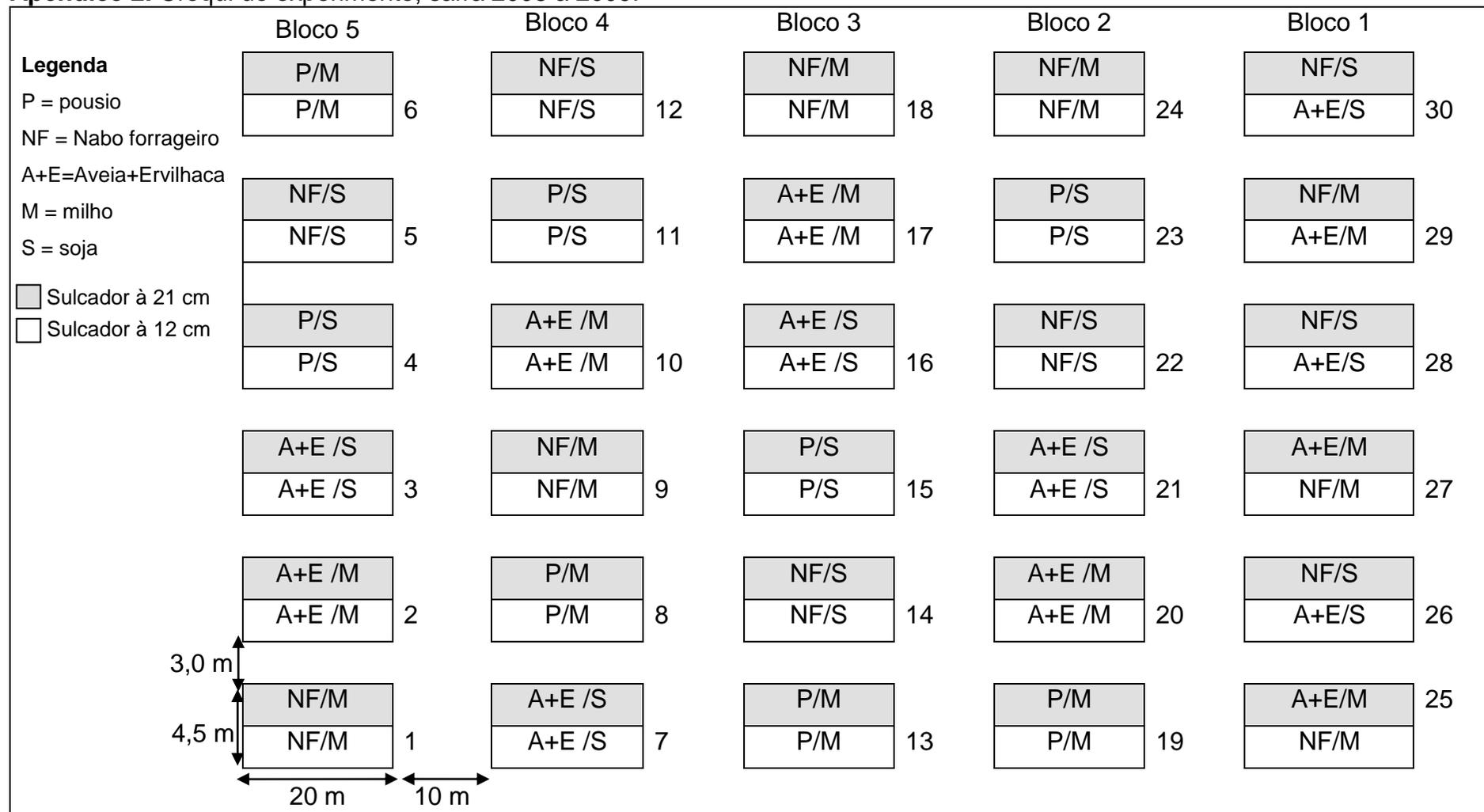
ZHANG, H.; HARTGE, K. H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 239-245, 1997.

## 8 APÊNDICES

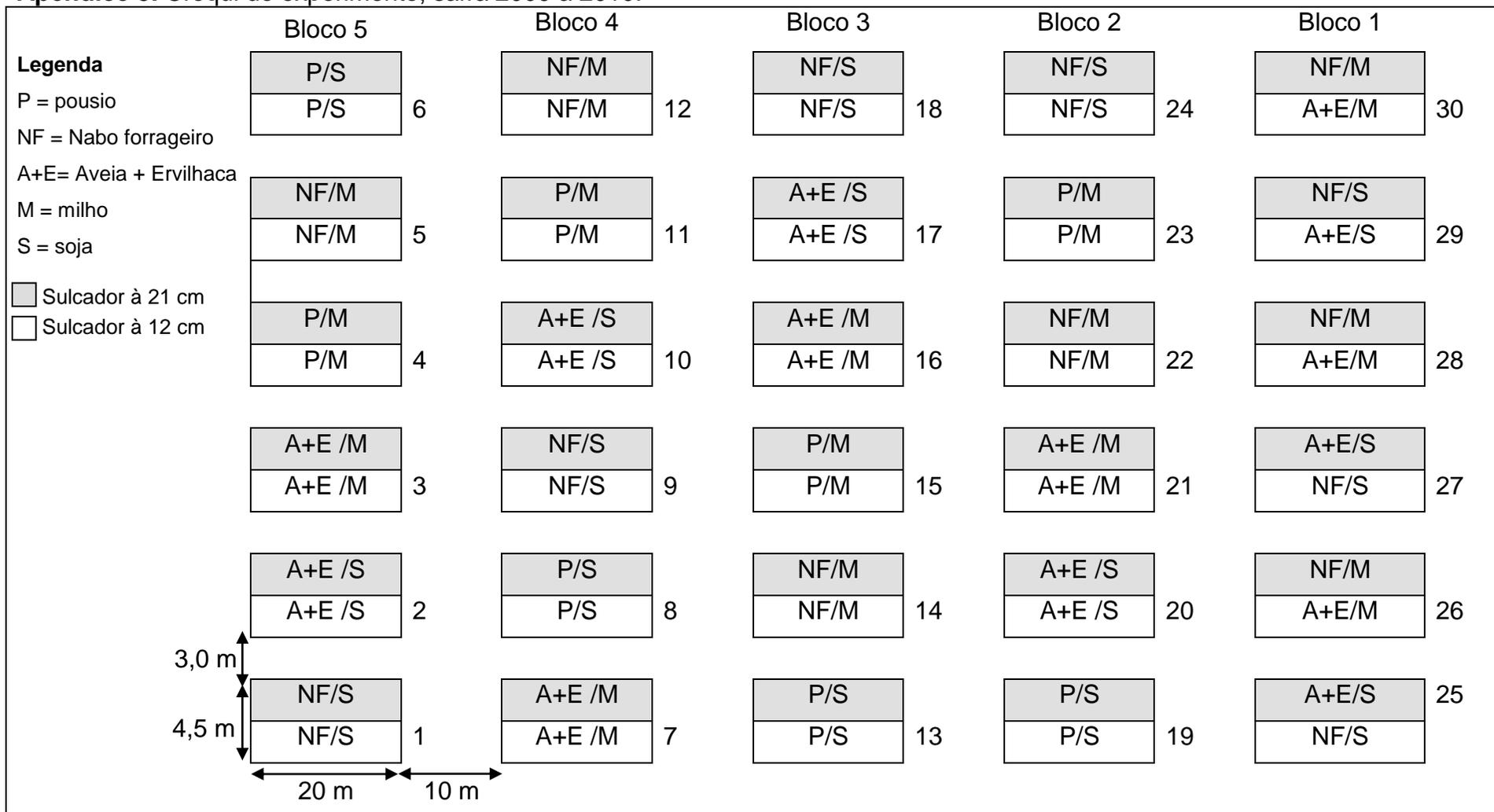
**Apêndice 1.** Croqui do experimento, safra 2007 a 2008.



**Apêndice 2.** Croqui do experimento, safra 2008 a 2009.



**Apêndice 3. Croqui do experimento, safra 2009 a 2010.**



**Apêndice 4.** Teores de nutrientes e pH em água do solo da área experimental, em função da cobertura de inverno e da época de avaliação.

Cobertura	Camada (m)	P	K	Al	Ca	Mg	pH
----- <i>Maio de 2007</i> -----							
<b>Nabo f.<sup>1</sup></b>	0,00-0,10	8,0	258	0,0	5,1	1,6	5,6
<b>A+E<sup>2</sup></b>	0,00-0,10	9,4	212	0,1	4,0	1,6	5,7
<b>Pousio</b>	0,00-0,10	8,3	243	0,0	4,9	1,4	5,7
----- <i>Maio de 2008</i> -----							
<b>Nabo f.<sup>1</sup></b>	0,00-0,10	8,3	228	0,0	3,9	1,6	5,6
<b>A + E<sup>2</sup></b>	0,00-0,10	8,9	239	0,0	3,7	1,5	5,7
<b>Pousio</b>	0,00-0,10	7,6	200	0,1	3,8	1,5	5,6

<sup>1</sup> Nabo forrageiro    <sup>2</sup> Aveia + Ervilhaca

**Apêndice 5.** Permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) em função da cobertura de inverno e do tráfego em diferentes tensões de água no solo, na camada de 0,02 – 0,05 m.

Tensão	Cobertura de inverno <sup>1</sup>	Tráfego <sup>2</sup>			Média
		RT	RC	NT	
----- $K_a$ ( $\mu\text{m}^2$ )-----					
6 kPa	AE	114,29	59,95	169,61	<b>114,62 A</b>
	NF	91,06	106,94	269,90	<b>155,97 A</b>
	P	123,95	123,09	215,19	<b>154,08 A</b>
	<b>Média</b>	<b>109,77 b</b>	<b>96,66 b</b>	<b>218,24 a</b>	
10 kPa	AE	136,16	51,36	162,39	<b>116,64 B</b>
	NF	127,42	123,40	281,06	<b>180,63 A</b>
	P	129,11	88,80	194,55	<b>137,49 AB</b>
	<b>Média</b>	<b>130,90 ab</b>	<b>87,85 b</b>	<b>216,00 a</b>	
33 kPa	AE	158,70	68,36	176,78	<b>134,61 B</b>
	NF	120,67	192,92	328,48	<b>214,02 A</b>
	P	151,06	105,22	189,67	<b>148,65 AB</b>
	<b>Média</b>	<b>143,48 ab</b>	<b>122,17 b</b>	<b>231,64 a</b>	
100 kPa	AE	219,17	57,48	204,53	<b>160,39 A</b>
	NF	135,05	168,59	331,70	<b>211,78 A</b>
	P	142,46	92,39	196,43	<b>143,76 A</b>
	<b>Média</b>	<b>165,56 ab</b>	<b>106,15 b</b>	<b>244,22 a</b>	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> NT = não tráfego; RT = rodado de tratoR; RC = rodado de colhedora.

<sup>2</sup> NF = nabo forrageiro; P = pousio; AE = consórcio aveia + ervilhaca.

**Apêndice 6.** Permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) em função da cobertura de inverno e do tráfego em diferentes tensões de água no solo, na camada de 0,10 – 0,13 m.

Tensão	Cobertura de inverno <sup>1</sup>	Tráfego <sup>2</sup>			Média
		RT	RC	NT	
----- $K_a$ ( $\mu\text{m}^2$ )-----					
6 kPa	AE	38,36	64,10	76,12	<b>65,84 A</b>
	NF	38,36	52,29	101,63	<b>64,09 A</b>
	P	130,43	70,89	89,61	<b>96,98 A</b>
	<b>Média</b>	<b>76,37 a</b>	<b>62,43 a</b>	<b>88,12 a</b>	
10 kPa	AE	54,58	49,04	68,90	<b>57,51 A</b>
	NF	43,04	58,07	107,96	<b>69,69 A</b>
	P	142,84	48,51	99,65	<b>97,00 A</b>
	<b>Média</b>	<b>80,15 ab</b>	<b>51,87 b</b>	<b>92,17 a</b>	
33 kPa	AE	71,16	57,39	91,83	<b>73,46 A</b>
	NF	48,20	81,95	100,19	<b>76,78 A</b>
	P	112,11	89,34	111,21	<b>104,22 A</b>
	<b>Média</b>	<b>77,16 a</b>	<b>76,23 a</b>	<b>101,08 a</b>	
100 kPa	AE	50,53	104,27	93,15	<b>82,65 A</b>
	NF	35,39	51,97	98,52	<b>61,96 A</b>
	P	149,68	60,28	145,63	<b>118,53 A</b>
	<b>Média</b>	<b>78,53 a</b>	<b>72,18 a</b>	<b>112,44 a</b>	

dias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> NF = nabo forrageiro; AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; P = pousio.

<sup>2</sup> RC = rodado de colhedora RT = rodado de trator; NT = não trafegado.

**Apêndice 7.** Permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) em função da cobertura de inverno e do tráfego em diferentes tensões de água no solo, na camada de 0,20 – 0,23 m.

Tensão	Cobertura de inverno <sup>1</sup>	Tráfego <sup>2</sup>			Média
		RT	RC	NT	
----- $K_a$ ( $\mu\text{m}^2$ )-----					
6 kPa	AE	73,21	94,36	86,83	<b>84,80 A</b>
	NF	53,67	56,70	74,87	<b>61,75 A</b>
	P	108,13	38,48	31,01	<b>59,21 A</b>
	<b>Média</b>	<b>78,34 a</b>	<b>63,18 a</b>	<b>64,24 a</b>	
10 kPa	AE	73,13	53,82	92,04	<b>72,99 A</b>
	NF	31,98	48,47	61,45	<b>47,30 A</b>
	P	101,70	42,41	20,53	<b>54,88 A</b>
	<b>Média</b>	<b>68,94 a</b>	<b>48,23 a</b>	<b>58,00 a</b>	
33 kPa	AE	72,78	102,66	104,15	<b>93,53 A</b>
	NF	31,64	61,66	78,79	<b>57,36 A</b>
	P	113,80	46,94	29,34	<b>63,36 A</b>
	<b>Média</b>	<b>72,74 a</b>	<b>70,75 a</b>	<b>70,76 a</b>	
100 kPa	AE	81,10	62,20	96,55	<b>79,95 A</b>
	NF	38,84	110,78	60,17	<b>69,93 A</b>
	P	96,78	53,08	36,99	<b>62,29 A</b>
	<b>Média</b>	<b>72,24 a</b>	<b>75,36 a</b>	<b>64,57 a</b>	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas, dentro de cada camada, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup> NF = nabo forrageiro; AE = consórcio aveia preta + ervilhaca; P = pousio.

<sup>2</sup> RC = rodado de colhedora RT = rodado de trator; NT = não trafegado.