

LEONARDO PIM PETEAN

**QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRICO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**

**MARINGÁ
PARANÁ-BRASIL
FEVEREIRO – 2011**

LEONARDO PIM PETEAN

**QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRRICO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas para obtenção do título de Doutor.

**MARINGÁ
PARANÁ-BRASIL
FEVEREIRO – 2011**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

P477q Petean, Leonardo Pim, 1981
Qualidade física de um latossolo vermelho
distroférico sob integração lavoura-pecuária /
Leonardo Pim Petean. -- Maringá, 2011.
128 f. : figs. cols., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Maringá, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2011.

1. Solo - Compactação. 2. Solo - Densidade. 3.
Pastejo. 4. Solo - Porosidade. 5. Latossolo vermelho
distroférico - Qualidade física. 6. Integração
lavoura-pecuária. 7. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). I.
Tormena, Cássio Antonio, orient. II. Universidade
Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em
Agronomia. III. Título.

CDD 21.ed. 631.43

LEONARDO PIM PETEAN

**QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO
SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, na área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 28 de fevereiro de 2011.

Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena
Presidente

Prof. Dr. José de Deus Viana da Mata
Membro

Prof. Dr. Sergio José Alves
Membro

Prof. Dr. Getúlio Coutinho Figueiredo
Membro

Prof^a. Dr^a. Karina Maria Vieira Cavalieri
Membro

AGRADECIMENTO

À Universidade Estadual de Maringá e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da UEM, pela oportunidade concedida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Professor Dr. Cássio Antonio Tormena pela orientação, esclarecimentos e todo auxílio prestado durante a pós-graduação em nível de Doutorado.

Aos meus pais pelo auxílio durante toda a minha vida.

Ao Engenheiro Agrônomo Joaquim Mariano Costa e toda equipe da Fazenda Experimental da COAMO, que sem eles não seria possível a realização deste trabalho.

Ao pesquisador do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR, Dr. Sérgio José Alves, pelo auxílio prestado para a realização do presente trabalho.

Ao pesquisador do Instituto Agrônomo do Paraná – Iapar, Dr. Jonez Fidalski, pelo auxílio prestado.

Aos colegas de pós-graduação Edner Betioli Junior, Wagner Henrique Moreira, pelo auxílio na coleta das amostras, determinações de laboratório e colaborações em trabalhos.

Ao técnico do laboratório de Física de Solo da UEM, Reinaldo Bernardo.

Aos graduandos Hélio Henrique Soares Franco, Camila Jorge Bernabé Ferreira, pelo auxílio na coleta das amostras e nas determinações em laboratório.

A todos os demais que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Leonardo Pim Petean, filho de Pompeu Petean Filho e Maria Angélica Pim Petean, nasceu na cidade de Campo Mourão, Estado do Paraná, em 06 de Fevereiro de 1981. Ingressou na Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR, em Fevereiro de 2000, no curso de Agronomia, onde colou grau em Janeiro de 2005. Em Março de 2005, ingressou no Programa de Pós-graduação em Agronomia, em nível de Mestrado, área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Estadual de Maringá (UEM) e apresentou-se à Banca Examinadora em Fevereiro de 2007. Em Março de 2007, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UEM, em nível de Doutorado, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas.

ÍNDICE

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL	3
Integração Lavoura-Pecuária	3
Efeitos do pisoteio animal sobre o solo na Integração Lavoura-Pecuária.....	6
Compactação do solo e qualidade do solo.	8
Plantio direto e sustentabilidade da produção agrícola	11
Intervalo Hídrico Ótimo	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
3. CAPÍTULO 1 - INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB PLANTIO DIRETO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA.....	35
RESUMO	35
ABSTRACT:.....	36
3.1. INTRODUÇÃO	37
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	40
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
3.4. CONCLUSÕES	54
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
4. CAPÍTULO 2 - MONITORAMENTO DA COMPACTAÇÃO NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA DURANTE CINCO ANOS..	63
RESUMO:	63
ABSTRACT	64
4.1. INTRODUÇÃO	66

4.2. MATERIAL E MÉTODOS	68
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.4. CONCLUSÕES	81
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
5. CAPÍTULO 3 - DETERMINAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB PLANTIO DIRETO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA UTILIZANDO DUAS ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS	86
RESUMO	86
ABSTRACT	88
5.1. INTRODUÇÃO	89
5.2. MATERIAL E MÉTODOS	95
5.2.1. Caracterização da área experimental	95
5.2.2. Tratamentos	95
5.2.3. Determinações das propriedades físicas do solo	97
5.2.4. Monitoramento da qualidade física do solo.....	103
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
5.4. CONCLUSÕES	119
5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121

RESUMO

PETEAN, Leonardo Pim, Dr. Universidade Estadual de Maringá, Fevereiro de 2011. **Qualidade física de um latossolo vermelho distroférico sob integração lavoura-pecuária.** Orientador: Dr. Cássio Antônio Tormena. Co-orientador: Dr. Sérgio José Alves.

RESUMO. A integração lavoura-pecuária pode ser definida como a alternância temporária ou a rotação, numa mesma área, de culturas de grãos e pastagens.. Este sistema vem atraindo grande interesse dos agricultores nas regiões produtoras de grãos. No sul do Brasil, esta prática se baseia na semeadura de forrageiras de inverno para o pastejo do gado em rotação com culturas de verão. Estudos mostram que o pisoteio do gado compacta o solo, enquanto outros demonstram que com carga animal adequada, suspensão do pastejo em condições de solo úmido e manutenção de cobertura vegetal adequada do solo, não há influência negativa na produtividade das culturas de verão. Os objetivos deste trabalho foram avaliar algumas propriedades indicadoras da qualidade física do solo para a comparação de diferentes sistemas de manejo da oferta de forrageira de inverno. Para avaliação da qualidade física do solo foi quantificado o Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO), utilizando a densidade do solo crítica (Dsc) (Ds em que o IHO=0). Foi feita uma proposta de metodologia alternativa para sua quantificação. O estudo foi conduzido numa área com sistema de integração lavoura-pecuária implantado em 2002 na Fazenda Experimental da COAMO – Cooperativa Agroindustrial, no município de Campo Mourão, Paraná. Os tratamentos foram constituídos de diferentes níveis de altura de pastejo da forragem de aveia e azevém em 7, 14, 21 e 28 cm e um tratamento onde não houve pastejo. Os tratamentos apresentaram redução do IHO em função da altura de pastejo devido ao aumento da Ds ocasionado pelo impacto do pisoteio animal. Os resultados obtidos com a metodologia alternativa indicaram que a mesma foi precisa e adequada para a quantificação do IHO. A densidade do solo e macroporosidade mostraram serem indicativos básicos de qualidade física do

solo, sendo estes avaliados ao longo de cinco anos para verificação da dinâmica do sistema. Verificou-se que, densidade do solo e macroporosidade são dependentes dos manejos utilizados em sistema de Integração Lavoura Pecuária, que ocorrem flutuações temporais de Ds e macroporosidade do solo no sistema de Integração Lavoura-Pecuária. Para manter ou melhorar a qualidade física do solo, manejado sob pastejo da aveia + azevém no inverno, a altura de pastejo deve ser mantida acima de 21cm.

Palavras-chave: compactação do solo, densidade do solo, pastejo, porosidade do solo, Intervalo Hídrico Ótimo.

ABSTRACT

PETEAN, Leonardo Pim, PhD. Maringá State University, February 2011. **Soil Physical quality of a Typic Oxisol under crop-livestock integration.** Advisor: PhD. Cassio Antonio Tormena. Co- advisor: PhD. Sérgio José Alves.

ABSTRACT. The crop-livestock integration can be defined as the temporary rotation, in the same area, of grain crops and pastures with livestock. This system has attracted interest of farmers in grain-producing regions. In southern Brazil, this practice is based on the sowing of winter forage for grazing cattle in rotation with summer crops. Studies show that cattle trampling compacts the soil, while others show that with proper stocking, suspension of grazing in wet soil conditions and maintenance of adequate soil cover, there is no negative influence on yield of summer crops. The experimental area has a system of crop-livestock integration implemented in 2002 in an area of 8 ha, at the Experimental Farm COAMO - Cooperativa Agroindustrial, in Campo Mourao, Parana, in which the treatments are made of different height levels of forage grazing where the management of animals kept grazing heights of ryegrass and oats in 7, 14, 21 and 28 cm and a treatment where no grazing. The objectives of this study were to evaluate some physical properties of soil for comparison of different management systems in the supply of winter forage. In order to verify whether the animal trampling reduces soil physical quality to evaluate the soil physical quality the least limiting water range (LLWR) was quantified as a modern indicator of soil physical quality. An alternative methodology also was evaluated to obtain the LLWR faster and using the critical soil density (Soil bulk density in which $IHO = 0$) for monitoring of soil physical quality. The bulk density and macroporosity are indicative of basic soil physical quality, which were measured over five years for monitoring the soil physical quality. The treatments reduced the LLWR due to grazing height with increased soil bulk density associated to the impact of animal trampling. The alternative methodology for LLWR evaluation was accurate and appropriate for LLWR

quantification. It was found that the soil bulk density and macroporosity both are dependent on management practices used in integrated crop livestock. To maintain a appropriate soil physical quality the forage management should be done to maintain the grazing height equal or above 21cm.

Keywords: soil compaction, soil bulk density, grazing, soil porosity, Least Limiting Water Range.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O sistema de integração lavoura-pecuária (SILP) pode ser definido como a alternância temporária ou rotação, numa mesma área, de culturas de grãos e pastagens destinadas à produção animal (MORAES et al., 1998). Ainda que não possua formato rígido definido, a integração pode ser feita numa das fases do sistema de rotação de culturas, em que uma ou mais forrageiras (consórcio) sejam cultivadas para pastejo. No sul do Brasil, esta prática se baseia na semeadura de forrageiras de inverno para o pastejo do gado em rotação com culturas de verão. Aveia, azevém e trevo são as culturas que podem ser cultivadas isoladas ou em misturas no período do inverno, com dupla finalidade: alimentar os animais no período de inverno e produzir biomassa para cobrir o solo para as culturas do verão (FONTANELI et al., 2000), em sistema de semeadura direta.

Com o manejo da lavoura podemos ter uma melhoria na fertilidade do solo, principalmente no caso das leguminosas, incorporando nitrogênio ao solo, importante benefício para a pastagem, que por sua vez, proporciona um solo mais bem estruturado para a lavoura em função de seu sistema radicular abundante que acaba explorando um maior volume de solo. Entretanto nas áreas em pastejo, a presença dos animais tem efeitos diretos e indiretos tanto sobre a forragem quanto sobre o solo. Os cascos dos animais causam injúrias ou perda de vegetação, e provocam compactação da superfície do solo pela pressão que exercem. Logo em um sistema de integração lavoura-pecuária, evitar o pisoteio excessivo do gado é fundamental para que o solo não sofra compactação, principalmente se o sistema de manejo for o plantio direto em que o revolvimento do solo ocorre apenas, localizadamente nas linhas das culturas.

Em solos com problemas de compactação, ocorre alteração da drenagem e retenção de água assim como a permeabilidade do solo e concentração de CO₂ próximos as raízes das plantas bem como aumentando a resistência do solo à penetração das raízes, resultando num maior risco de estresse hídrico e deficiência de nutrientes devido menor volume de solo explorado pelas raízes. O

impacto do SILP na qualidade física do solo ainda tem sido pouco explorado, com poucas avaliações realizadas em propriedades indicadoras das relações massa/volume do solo como, a densidade do solo, porosidade, e outras propriedades físicas do solo. Em SILP, os impactos na qualidade físico-hídrica do solo ocorrem mais significativamente na camada de 0-5 cm de profundidade (MARCHÃO, 2007), na qual a pressão proveniente do pisoteio animal, durante a fase de pastejo, resulta num aumento da densidade do solo (Ds). Entre os indicadores da qualidade física do solo destaca-se o intervalo hídrico ótimo (IHO), o qual integra os fatores diretamente associados com crescimento das plantas: aeração, resistência do solo à penetração e água disponível às plantas. Assim o pisoteio animal, no período de inverno, pode reduzir a qualidade física do solo ao modificar o IHO pela mudança em um ou mais destes fatores.

Este trabalho visou avaliar as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de plantio direto com soja ou milho com forrageiras de inverno utilizadas para uso animal e a cultura da soja, constituindo um sistema de integração lavoura-pecuária. Neste trabalho testou-se a hipótese de que a qualidade física do solo é reduzida pelo pisoteio animal no período de inverno. A apresentação dos resultados experimentais será disposta em três capítulos: o primeiro abordará o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária; o segundo capítulo trata do monitoramento da qualidade física do solo em função das mudanças na densidade e macroporosidade em um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária durante cinco anos; e o terceiro capítulo tem como objetivo a determinação do IHO de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária utilizando duas diferentes estratégias metodológicas. Buscou-se avaliar algumas propriedades físicas do solo para o estudo de diferentes níveis de oferta de forrageira de inverno, via mudança na carga animal para controlar a altura de corte das forrageiras. Destaca-se a quantificação do IHO para utilizá-lo na avaliação e monitoramento da qualidade física do solo e indicar limites de altura de corte das forrageiras pelo pastejo mantendo a qualidade física do solo

para as culturas implantadas após o pastejo.

Os objetivos gerais foram avaliar algumas propriedades físicas do solo para a comparação de diferentes níveis de oferta de forragem de inverno, via mudança, na carga animal para controlar a altura de corte das forrageiras de inverno, monitorando ao longo de cinco anos. Especificamente foi quantificado o IHO e avaliada a Ds e a macroporosidade nos tratamentos de diferentes alturas de pastejo de aveia mais azevém, utilizando um valor de densidade do solo crítica embasado no IHO e um valor de 10% de macroporos, ambos como referência para monitorar a qualidade física do solo. Além disso, buscou-se desenvolver uma estratégia metodológica alternativa mais rápida e mais barata, para quantificar o IHO.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

Integração Lavoura-Pecuária

A integração lavoura-pecuária pode ser definida como a alternância temporária ou a rotação, numa mesma área, de culturas de grãos e pastagens destinadas à produção animal (MORAES et al., 1998). Esse sistema não possui um formato rígido definido, onde a integração pode ser feita numa das fases do sistema de rotação de culturas em que uma ou mais forrageiras (consórcio) sejam cultivadas para pastejo (FONTANELI et al., 1998). Também pode ocorrer em ciclos mais longos, com as fases de pastagem e lavoura durando alguns anos, podendo a área ser cultivada por três anos com lavoura e cinco anos com pastagem (STUDDERT et al., 1997), ou a sucessão de cultivos de grãos e

O Brasil possui aproximadamente 172,3 milhões de hectares com pastagens (IBGE, 2006), sendo que desta área 100 milhões de hectares são pastagens cultivadas, que apresentam em sua maioria um sistema extensivo de pecuária, utilizando plantas forrageiras adaptadas às condições edafoclimáticas de cada região produtora. Nas regiões Sul do Brasil, a integração lavoura-pecuária é um sistema produtivo que vem se expandindo (FONTANELI et al.,

1998), sendo que, seu crescimento foi proporcional ao aumento das área de plantio direto, pois à adoção desse sistema possibilitou a exploração de novas áreas agrícolas (COSTA et al., 2009). Nesta região o sistema utilizado de integração mais comum é a prática de produção de grãos na primavera/verão e o cultivo de pastagens para alimentação do gado no outono/inverno em que a semeadura das culturas de verão e inverno é realizada no sistema de plantio direto ou convencional (COSTA et al., 2009). Assim, a integração lavoura-pecuária apresenta uma grande importância em viabilizar as duas atividades do sistema de lavoura e pecuária que muitas vezes são concorrentes em um mesmo local. Muitas vezes a integração da agricultura com a pecuária está associada com a redução do custo de estabelecimentos e reformas de pastagens, sendo que a pastagem viabiliza uma quantidade de palha necessária para o plantio direto, concorrendo para um acréscimo no teor de matéria orgânica (CARVALHO et. al., 2008). Além disso, o sistema produz um pasto de boa qualidade durante a entressafra e ainda deixa uma boa quantidade de palha para o plantio direto, dependendo do manejo.

Podemos ter como benefícios da integração lavoura-pecuária a diversificação das atividades da propriedade, tendo uma maior racionalização do uso da terra, infraestrutura e mão-de-obra, minimizando os custos e diluindo os riscos das atividades isoladas, melhorando assim a relação risco/rentabilidade (MELLO et al., 2004), proporcionando ganhos tanto na pecuária quanto na produção de grãos. Neste sistema as áreas de lavoura devem dar suporte às áreas de pecuária, de modo que a venda dos animais na entressafra proporciona uma melhor receita (MELLO et al., 2004). Esse sistema também contribui para melhoria das condições físicas do solo com a pastagem nas áreas de lavoura, sendo que podemos recuperar a fertilidade física e química do solo em áreas de pastagem degradada, aumentando a eficiência de fertilizantes e corretivos e do sistema de produção.

Ambrosi et al. (2001) comparando sistemas de produção, observaram que o sistema trigo/soja/aveia preta+ervilhaca (pastejadas) /milho, com um inverno de pastagem e um de lavoura, foi melhor que sistemas com dois invernos

de pastagem e uma de lavoura, e que o sistema somente com lavoura, tanto pela maior rentabilidade como pelo menor risco. Kichel et al. (2000) afirmam que a rotação entre soja e pastagem utilizando dois a três anos de soja e três anos de pastagem, tem propiciado benefícios para a cultura da soja e para a pastagem, tendo a diminuição da incidência de plantas daninhas e a ocorrendo a quebra do ciclo de pragas e doenças da soja, possibilitando uma maior produtividade e lucratividade.

As consorciações de aveia-preta, centeio e azevém são comuns no Sul do Brasil, onde esse sistema de consórcio permite pastoreio mais longo que o cultivo isolado das forrageiras (POSTIGLIONI, 1982). Consorciações são, em geral, vantajosas na produção animal, pois proporcionam maior rendimento de forragem do que cada espécie isoladamente. Isso se deve à melhor distribuição sazonal e à maior qualidade de forragem durante a estação de crescimento (MANNETJE et al., 1976 citados por FONTANELI e FREIRE JÚNIOR, 1991).

Em sistemas de produção de carne ou leite, as pastagens anuais de estação fria tornam-se boas alternativas aos cereais (FONTANELI e FREIRE JÚNIOR, 1991), sendo que as pastagens formadas principalmente por aveia e azevém, são especialmente viáveis na região centro-sul do Brasil, produzindo grande quantidade de forragem e permitindo o aproveitamento intensivo de áreas ociosas no inverno (ALVIM, 1989). Müller e Primo (1986) observaram que bovinos suplementados com azevém no inverno atingiram 430 kg de peso vivo aos dois anos, enquanto que, alimentados somente com pastagem natural, os animais atingiram esse peso apenas aos quatro anos.

A escolha das espécies forrageiras de inverno influencia diretamente no manejo da integração entre lavoura e pecuária, onde algumas forrageiras podem ser manejadas com duplo propósito, fornecendo forragem e permitindo colheita de grãos (FONTANELI et al., 200). Com a integração lavoura-pecuária podemos obter alguns benefícios mútuos, geralmente, observados para a lavoura e para a pastagem. Com o manejo da lavoura podemos ter uma melhoria na fertilidade do solo, principalmente no caso das leguminosas, incorporando nitrogênio ao solo, importante benefício para a pastagem, que por sua vez, proporciona solo mais

bem estruturado para a lavoura, em função de seu sistema radicular abundante que acaba explorando um maior volume de solo e reciclando uma maior quantidade de nutrientes. Os resíduos de material orgânico deixado na superfície, o qual viabiliza o Sistema Plantio Direto (SPD) (SALTON et al., 1998), proporcionam um aumento da atividade biológica do solo, favorece a elevação do teor de matéria orgânica e reduzindo a erosão (SALTON et al., 2001). Em qualquer sistema produtivo temos que levar em consideração as medidas de manejo, as condições específicas de clima e solo que podem gerar diversos resultados, dependendo de suas condições.

Em conjunto com a integração agricultura-pecuária o sistema plantio direto deve ser priorizado, (KLUTHCOUSKI et al., 2003), principalmente em solos de extrema fragilidade à degradação, , visto que possibilita a manutenção e, ou, melhoria nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

Efeitos do pisoteio animal sobre o solo na Integração Lavoura-Pecuária

Em áreas de pastagem, a presença dos animais tem efeitos diretos e indiretos tanto sobre a forragem quanto sobre o solo. Os cascos dos animais causam injúrias ou perda de vegetação, e provocam compactação da superfície do solo pela pressão que exercem (LEWIS, 1980; BALPH e MALECHECK, 1985). As altas pressões aplicadas na área de pastejo pelos cascos dos animais danificam a vegetação e tendem a deformar o solo (SCHOLEFIELD et al., 1985), onde a intensidade desses efeitos é influenciada, principalmente, pela quantidade de pisoteio , classe de solo e seu teor de água. Tanner e Mamaril (1959) encontraram redução de 20% na produção de pastagens em áreas com pastejo intensivo; entretanto Trein et al. (1991) relata o aumento da produtividade de milho com o uso de preparo convencional de solo, comparado ao sistema plantio direto após o pisoteio de animais durante o inverno. Por outro lado, com a carga animal ajustada ao crescimento da pastagem, Bassani (1996) não encontrou diferenças de produtividade de milho após o pastejo de inverno entre o sistema plantio direto e o preparo convencional.

Segundo Alderfer e Robinson (1947) dependendo do manejo dos animais na área de pastagem podem ocorrer modificações nas propriedades físicas do solo em médio e longo prazos, pois a pressão aplicada pelo pisoteio dos animais ocasiona alterações na densidade e porosidade do solo, principalmente nos primeiros 3 a 6 cm de profundidade (GRADWELL, 1966; BERTOL, 1998). Além disso, também ocorrem modificações na resistência dos agregados e infiltração de água no solo, sendo que essas alterações podem refletir no desenvolvimento do sistema radicular e produção de massa da parte aérea das pastagens (GRADWELL, 1966).

A carga estática dos animais sobre o solo pode ser calculada dividindo-se o peso do animal pela superfície total de contato dos cascos (ABDEL-MAGID et al., 1987). Assim, um animal de 400 kg de peso vivo, com área média de 80 cm² por casco, exerceria uma carga estática, quando os quatro cascos estão em contato com o solo, de 1,25 kg cm⁻². Esse valor pode aumentar quando o animal se desloca na área, havendo apenas dois cascos em contato com o solo, tendo um valor da carga animal de 2,5-5,0 kg cm⁻², podendo a carga variar ainda em função da fração da área total de casco efetivamente em contato com o solo. Com carga de quatro vezes maior que na condição estática, os animais em movimento apresentam alto potencial de compactação (SCHOLEFIELD et al., 1985), sendo o peso individual dos animais, a lotação e o manejo dos animais nas áreas pastejadas de grande importância para a redução dos efeitos causados sobre o solo e a planta. Segundo Brown e Evans (1973) a quantidade de pisoteio é determinante na compactação do solo, devendo ser utilizadas práticas que reduzam o caminhar dos animais, tais como disponibilidade de forragem e água e redução da duração de pastejo, diminuindo os danos provocados sobre a pastagem.

Uma área de pastagem com problemas de compactação apresenta alterações na drenagem e retenção de água assim como a permeabilidade do solo e concentração de CO₂ próximos as raízes das plantas, bem como aumentando a resistência do solo à penetração das raízes no solo afetando a disponibilidade de nutrientes e água para as plantas (CORREA e REICHARDT, 1995). Trein et al.

(1991) estudando pastagem de aveia preta + trevo subterrâneo cultivada em Argisolo Vermelho, com lotação elevada em curto espaço de tempo observou a ocorrência de compactação na camada superficial do solo até 7,5 cm de profundidade devido ao pisoteio animal verificando aumento da densidade e microporosidade do solo e diminuição de porosidade total e macroporosidade. A compactação produzida pelo pisoteio apresenta a tendência de ocorrer apenas superficialmente (FEDERA et al., 1961; SCHOLEFIELD et al., 1985), podendo modificar o formato da superfície do solo e causar pequenos alagamentos com a chuva, tornando o solo mais susceptível a deformações (MULHOLLAND e FULLEN, 1991), as quais podem, então, levar a compactação a manifestar-se em maiores profundidades. Entretanto, Albuquerque et al. (2001) afirmam que a presença das raízes de gramíneas melhora a estrutura do solo amenizando os problemas ocorridos pelo pisoteio animal nas áreas de integração lavoura-pecuária.

Conte et al. (2007) constatou que a resistência do solo à penetração (RP) diminuiu com o aumento da altura da pastagem, analisando a camada de 6 a 12 cm de profundidade, demonstrando que o aumento dos valores da RP ocorreram em função do incremento no número de animais em pastejo, atribuindo a compactação do solo ao pisoteio animal e também pelo menor conteúdo de água nos tratamentos com maior intensidade de pastejo conforme observado pelos autores.

Compactação e qualidade do solo do solo.

Os solos podem sofrer modificações em suas estruturas, causadas por forças atuantes ao longo de seu perfil, sendo essas classificadas como externas e internas (CAMARGO e ALLEONI, 1997). As forças internas resultam de ciclos de umedecimento e secamento, expansão e contração da massa do solo, enquanto as forças externas são aplicadas pelo tráfego de veículos, animais ou pessoas, além do crescimento de raízes grandes que empurram as partículas do

solo para forçar sua passagem, podendo até causar compactação no solo próximo a elas.

No solo pode ocorrer o processo de compressão, que se refere ao decréscimo de volume e deformação do solo por causas antrópicas, ou seja, quando forças externas são aplicadas. Em solos saturados, a compressão é chamada de consolidação, enquanto que para solos não saturados o processo é denominado compactação (HORN e LEBERT, 1994). Em estudos de pedologia a compactação é definida pela alteração no arranjo das partículas constituintes do solo (CAMARGO e ALLEONI, 1997). Assim, a compactação do solo pode ser definida como o processo de deformação do solo não saturado e redução do volume, causado por forças externas aplicadas ao solo, como o tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (LIMA, 2004). A utilização contínua de grade aradora em sistema de preparo convencional do solo pode levar a formação de camadas compactadas de solo, comumente chamada de “pé de grade”. -

Em áreas com sistema de plantio direto ocorre o aumento da densidade do solo, refletindo em maior resistência do solo à penetração (HAKANSSON e MEDVEDEV, 1995; SILVA et al., 2000). A distribuição da compactação do solo em áreas de plantio direto ocorre de maneira sistemática, sendo maior nas laterais da lavoura (bordadura dos talhões), diminuindo para o centro, em função do tráfego de máquinas (SILVA et al., 2004).

A compactação é o principal processo decorrente de forças de compressão, sendo que a condição do solo resultante do processo de compactação é conhecida como estado ou grau de compactação (HAKANSSON et al., 1988) e o termo compressibilidade indica a resistência do solo ao decréscimo de volume quando submetido a uma carga mecânica (HORN e LEBERT, 1994). A compactação do solo é um fator limitante da qualidade física dos solos agricultáveis, prejudicando a obtenção de maiores índices de produtividade (ALAKUKKU e ELOMEN, 1994). As plantas em solos compactados se desenvolvem menos em função do impedimento mecânico ao crescimento radicular, afetando o volume de solo explorado com menor absorção

de água e nutrientes, resultando em menor produtividade (VIEIRA e MUZILLI, 1984; TORMENA et al., 1998).

Com a compactação, o volume do solo é reduzido, principalmente, à custa do ar, que é expelido ou pode ser comprimido, havendo ainda a modificação do potencial de água do solo. Ocorre nos solos compactados um rearranjo das partículas sólidas e a matéria orgânica muda de forma, sendo que as pontes ou ligações entre as partículas primárias podem ser desfeitas (KOOLEN, 1994). Em solos compactados a porosidade e permeabilidade do solo diminuem e a resistência à deformação aumenta (SOANE e OUWERKERK, 1994). Com a redução no volume de macroporos resultante da compactação (KOOLEN, 1994), o solo compactado pode apresentar aeração insuficiente, prejudicando raízes em crescimento, causar a produção de compostos nocivos às plantas, como o etileno, ou gerar perda de nitrogênio por desnitrificação (STEPNIEWSKI et al., 1994).

Na quantificação da qualidade física do solo diferentes propriedades físicas têm sido utilizadas (TOPP e ZEBTCHUK, 1979) e dentre estas, a densidade e a porosidade do solo são as mais amplamente utilizadas. No processo de compactação ocorre um incremento na densidade do solo, o espaço poroso do solo é reduzido (HORTON et al., 1994) ocorrendo alterações nas propriedades hídricas do solo que dependem dos poros, como a infiltração e a retenção de água (KLUTE, 1982). Com o aumento do grau de compactação, a taxa de infiltração de água (DAWIDOWSKI e LERINK, 1990) e a condutividade hidráulica do solo (MAPA et al., 1986) diminuem. Apesar de a compactação diminuir a porosidade total, em condição de solo não saturado a retenção de água pode ser maior no solo compactado que no solo não compactado, devido ao aumento da microporosidade (REICOSKY et al., 1981).

Biologicamente, um solo com boa qualidade física requer um balanço entre aeração e retenção de água, além de resistência do solo à penetração não impeditiva ao crescimento e às funções fisiológicas das raízes (LETEY, 1985). Skopp et al. (1990) indicam que a máxima atividade biológica, medida pela produção de nitrogênio disponível às plantas, via mineralização, da matéria orgânica, ocorreu quando a saturação relativa do solo foi de 66% ou,

alternativamente, com 34% do espaço poroso do solo ocupado com ar. Estas proporções são medidas em potencial mátrico correspondente à capacidade de campo, considerando-se o teor de água retido e a capacidade de aeração total do solo em relação à porosidade total.

Sistema de Plantio direto e sustentabilidade da produção agrícola

Cada vez mais se procura aumentar a produção agropecuária, fazendo com que sistemas produtivos mais intensivos sejam adotados, gerando uma maior eficiência e sustentabilidade agrícola e ambiental. Para elevar a produção agrícola deve-se considerar a capacidade da natureza de assimilar novas tecnologias, recuperando os recursos naturais, o que geralmente é encarado como um paradigma para o desenvolvimento de agroecossistemas sustentáveis (GASSEN, 1993).

No estado do Paraná, com o avanço das culturas produtoras de grãos, ocorreu uma intensificação do preparo do solo, e em consequência ocorreu maior erosão e compactação, assim como a perda da fertilidade e da matéria orgânica (TORMENA et al., 2004). A degradação física é uma das principais causas do decréscimo do potencial produtivo das lavouras (TREIN et al., 1991). Assim, os sistemas de manejo do solo devem manter a capacidade do mesmo e exercer as funções físicas, químicas e biológicas para o crescimento e ancoragem das raízes, bem como favorecer o suprimento de água, nutrientes e oxigênio às plantas (BLAINSKI ET al., 2008).

Diversas propriedades do solo podem ser alteradas em diferentes graus dependendo do manejo, sendo que os efeitos ocorrem na estrutura. (BASSO e REINERT, 1998). A estrutura do solo depende de fatores físicos, químicos e biológicos que se relacionam intimamente e funcionalmente dependentes do manejo (NEUFELDT et al., 1999), existindo uma inter-relação entre esses fatores que controlam os processos e os aspectos relacionados à sua variação no tempo e no espaço. No sistema de preparo convencional são realizadas operações de aração e gradagem, que podem exercer efeitos negativos sobre as propriedades

do solo, em longo prazo, sendo comum verificar camadas compactadas próximo à superfície (CAMARGO e ALLEONI, 1997), devido à carga aplicada apresentar efeito acumulativo em subsuperfície ao longo dos anos (HAKANSSON et al., 1988). Essas operações de preparo quebram os macroagregados em unidades menores, criando novas faces de exposição, intensificando o processo de mineralização e diminuindo o teor de matéria orgânica (ROTH et al., 1991; WESTERHOF et al., 1999). Quando há um aumento no número de operações pode-se aumentar as perdas de solo e água por erosão (HENKLAIN e CASÃO JUNIOR, 1989). Castro Filho, 1999 indica que a excessiva mobilização cria camadas compactadas de menor permeabilidade, devido à redução do tamanho dos agregados.

Para minimizar os efeitos causados pelo preparo convencional, técnicas de preparo conservacionistas foram desenvolvidas na tentativa de proporcionar menor mobilização e manter maior proteção da superfície do solo com resíduos culturais. Dentre estas o sistema plantio direto (SPD) surge com caráter conservacionista visando a sustentabilidade do sistema produtivo. Introduzido no Brasil por agricultores na década de 70, o SPD surgiu como alternativa ao sistema convencional de preparo de solo, para controlar a erosão nas lavouras cultivadas com a sucessão trigo/soja na região sul. Na década de 80, com maior quantidade de informações técnicas geradas, é que o SPD se difundiu no Brasil (KOCHHANN e DENARDIN, 2000). Segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha, a área sob plantio direto no Brasil na safra 2005/06 era de 25,5 milhões de hectares.

O SPD apresenta como características principais não revolver o solo e manter os resíduos vegetais na superfície, os quais formam uma cobertura que protege o solo da erosão hídrica reduzindo as perdas de solo e nutrientes (HERNANI et al., 1997; HERNANI et al., 1999). Outros benefícios são o aumento no teor de matéria orgânica, economia de combustível nas operações agrícolas (De MARIA et al., 1999), maior resistência à erosão devido ao maior tamanho médio dos agregados (SINGH et al., 1994) e maior disponibilidade de água no solo (BUSCHIAZZO et al., 1998; UNGER e JONES, 1998).

Entretanto, neste sistema tem-se verificado problemas de compactação superficial, principalmente após a implantação do SPD. Essa compactação é provocada pela acomodação natural das partículas sólidas do solo (KLEIN e BOLLER, 1995) e pelo efeito acumulativo do tráfego de máquinas e implementos, principalmente em solos argilosos sob altos teores de água (TORMENA et al., 1998a; UNGER e JONES, 1998). De maneira geral, o SPD apresenta maior densidade do solo e resistência à penetração do que o sistema convencional de preparo, principalmente nas camadas superficiais.

Em SPD, geralmente há aumento da densidade e microporosidade na camada superficial do solo em um período de três a quatro anos, apresentando um menor valor da porosidade total e macroporosidade comparados ao Plantio Convencional (PD). Voorhees e Lindstrom (1984) verificaram ser necessários de três a quatro anos para que um Molissolo em clima temperado, tivesse maior porosidade sob SPD que sob PC, considerando a camada de 0,00-0,15 m. Na camada de 0,15-0,30 m o tempo necessário foi de sete anos. Em condições tropicais e subtropicais, o acúmulo de matéria orgânica é mais difícil e lento (LAL et al., 1986), sendo assim esperar-se que, nas regiões tropicais, o SPD leve mais tempo para reverter a compactação superficial inicialmente estabelecida.

Apesar de haver maior grau de compactação superficial no solo sob SPD, a condição física não parece ser tão limitante para o crescimento radicular e a produtividade das culturas. De Maria et al. (1999) encontraram valores de densidade radicular de soja maiores no SPD em relação ao PC, apesar do solo sob SPD ter apresentado maiores valores de resistência à penetração e Ds. Mello Ivo e Mielniczuk (1999), avaliando os efeitos de métodos de preparo sobre o enraizamento e a produtividade do milho, observaram que a densidade de comprimento radicular sob SPD na camada de 0,00-0,05m foi significativamente maior em relação ao PC. No entanto, não foram observadas diferenças significativas entre tratamentos no acúmulo de matéria seca de raízes e na produtividade.

Apesar de ser um sistema conservacionista de solo, a utilização do SPD como simples técnica de semeadura não constitui um sistema de manejo

adequado, pois seu funcionamento depende de um conjunto de práticas agrícolas interdependentes, podendo o SPD ser considerado como um sistema de exploração (KOCHHANN e DENARDIN, 2000). Sendo assim, é fundamental o planejamento da implantação do sistema plantio direto (SPD), realizando-se a sistematização da lavoura, a descompactação do solo e a correção da acidez antes de iniciar as atividades de cultivo. A camada de palha na superfície do solo possibilita a redução da erosão e controle da infestação de plantas daninhas, aumenta o armazenamento de água, o teor de matéria orgânica e a atividade microbiana no solo (SALTON et al., 1998), além disso a palha na superfície reduz efetivamente a compactação causada pelo tráfego da maquinaria agrícola (KAYOMBO e LAL, 1994), podendo contribuir para mitigar o problema do maior grau de compactação nas áreas sob SPD. A cobertura contínua do solo no SPD deve ser priorizada, embora muitas vezes seja difícil sua manutenção, para garantir uma quantidade adequada de palha nas regiões tropicais (KAYOMBO e LAL, 1994). Para isso deve ser utilizada uma seqüência adequada de culturas para a formação de palha, principalmente na fase inicial do SPD pode garantir a obtenção de ótima cobertura do solo (SALTON et al., 1998). Em SILP, cuidados com a manutenção de biomassa das forrageiras de inverno são fundamentais para garantir adequada cobertura do solo.

Intervalo Hídrico Ótimo

A estrutura do solo consiste no agrupamento e organização das partículas em agregados e relacionando-se com a distribuição das partículas e agregados num volume de solo (KAY, 1990). Os componentes sólido, líquido e gasoso do solo são estabelecidos por esse arranjo e determinam o fornecimento de água, oxigênio e a resistência à penetração das raízes no solo. Sendo assim, a organização destes componentes controla suas propriedades físicas interferindo na quantidade de ar e de água e conseqüentemente sobre o crescimento das plantas. Assim uma estrutura ideal deve permitir uma grande área de contato entre raiz e solo havendo espaços porosos suficientes para difusão de gases e

movimentação de água, devendo apresentar uma resistência à penetração que não venha a impedir o crescimento das raízes das plantas (KOPI e DOUGLAS, 1991).

O manejo do solo e das culturas pode causar algumas mudanças nas propriedades físicas do solo e essas alterações podem ser temporárias ou permanentes (BERTOL et al., 2001), manifestando-se de diversas maneiras e influenciando o desenvolvimento das plantas. Karlen e Stott (1994) relatam que diferentes propriedades físicas são usadas para quantificar as mudanças advindas do manejo. Geralmente essas propriedades são analisadas individualmente desconsiderando possíveis interações entre elas.

Segundo Letey, (1985) as propriedades físicas do solo importantes para o crescimento das plantas são divididas entre propriedades que se relacionam diretamente com o desenvolvimento das plantas, (conteúdo de água, aeração e temperatura e a resistência do solo à penetração das raízes); e propriedades indiretamente relacionadas (textura, densidade, agregação, e porosidade do solo). As propriedades físicas diretamente relacionadas ao crescimento das plantas determinam a taxa dos processos fisiológicos, ligados com o crescimento radicular, com a fotossíntese e com o crescimento foliar. As propriedades indiretamente relacionadas são mais utilizadas na avaliação dos impactos causados pelos sistemas de manejo sobre a estrutura dos solos, e os efeitos destas propriedades sobre a produtividade das culturas que podem ocorrer pela influência sobre a retenção de água, aeração, temperatura e resistência do solo à penetração das raízes.

A disponibilidade de água às plantas é fundamental para o seu crescimento e desenvolvimento. Tradicionalmente é quantificada pela água disponível (AD), que compreende a quantidade existente entre a capacidade de campo (θ_{cc}) e o ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) (VIEHMEYER e HENDRICKSON, 1927). Os potenciais de água no solo de 0,01MPa e 1,5 MPa tem sido utilizados para determinar os valores do teor de água na capacidade de campo (θ_{cc}) e o teor de água no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), respectivamente. Esse conceito de água disponível é utilizado em estudos de

verificação e quantificação de efeitos de sistemas de manejo nas condições físicas do solo. Neste sentido a AD incorpora uma ampla variação de tamanhos de poros, onde a sua utilização como indicador da qualidade para o crescimento das plantas implica assumir que, dentro destes limites, não ocorre nenhum outro tipo de limitação.

O potencial em que a água se encontra no solo, exerce um efeito crítico sobre o crescimento vegetal, atuando como uma “variável de equilíbrio” afetando de forma positiva ou negativa os efeitos da aeração, resistência do solo à penetração, e temperatura do solo (LETEY, 1985). Dependendo da condição estrutural do solo, entre o limite superior e inferior da AD podem ocorrer limitações por excessiva resistência do solo à penetração das raízes, aeração deficiente ou pela temperatura do solo.

A energia solar incidente na superfície do solo é responsável pelo seu aquecimento influenciando tanto em seu processo de formação quanto nas suas propriedades físicas, é também responsável pela translocação de fluidos, reações químicas e biológicas que ocorrem no perfil do solo influenciando as variações de temperatura (DECICO e REICHARDT, 1976). A temperatura do solo exerce grande influência no crescimento e desenvolvimento das plantas, controlando a germinação de sementes, taxa e duração do crescimento e absorção de nutrientes. Além disso, tem influência na difusão de água e de gases, atua também sobre processos fisiológicos, atividade de microrganismos, reações químicas, difusão de solutos e gases, dentre outros processos relevantes ao ambiente do solo (VAN WIJK, 1963). Por exemplo, Hatfield e Egli (1974) relatam que uma temperatura de 40°C é prejudicial à fase de germinação da soja.

Sanchez (1976) descreve que os efeitos da temperatura têm sido mais relatados em regiões de clima temperado com invernos rigorosos. Helms et al. (1996, 1997) verificaram que, em um mesmo teor de água no solo, a germinação decrescia com o aumento da temperatura e do período expostos a mesma. Nas regiões tropicais, a temperatura do solo raramente apresenta-se como fator limitante ao desenvolvimento das plantas.

Quando não há limitações ao crescimento das plantas impostas pela temperatura, as condições físicas na interface solo-raiz são controladas pela disponibilidade de água, aeração do solo e resistência à penetração, onde sua importância é determinada pela estrutura do solo (LETEY, 1985; BOONE, 1988; HADAS, 1997). No entanto, a inter-relação entre estes fatores dificultam o estabelecimento de um nível ótimo destes em relação à produtividade das culturas (LETEY, 1985).

Alguns limites de condições físicas do solo às plantas têm sido considerados: um valor de porosidade de aeração (PA) mínima de 10% (GRABLE e SIEMER, 1968; GLINSKI e LIPIEC, 1990), uma vez que abaixo dessa condição a difusão de oxigênio no solo torna-se limitante ao funcionamento das raízes; várias pesquisas apontam a resistência do solo à penetração como uma variável física muito sensível à condição estrutural do solo (EHLERS et al., 1983; HAMBLIN, 1985; STIRZAKER et al., 1996), sendo um índice integrado pela densidade do solo, textura, matéria orgânica e umidade do solo (CAMARGO e ALLEONI, 1997; IMHOFF et al., 2000; TORMENA et al., 2004; RIBON e TAVARES FILHO, 2004). Um valor de resistência do solo à penetração de 2,0 MPa tem sido comumente associado como impeditivo para o crescimento das raízes (TAYLOR et al., 1966) e da parte aérea das plantas (TARDIEU, 1994; WEAICH et al., 1996). Contudo alguns autores indicam que valores de resistência do solo à penetração na ordem de 2,8 a 3,2 MPa retardam a elongação das raízes e com 4,0 MPa não há crescimento de raízes (VEPRASKAS e MINER, 1986). É senso comum que para o crescimento das plantas o solo deve apresentar uma boa qualidade física, estando diretamente relacionado à água, aeração, resistência do solo à penetração e temperatura (LETEY, 1985).

Letey (1985) teorizou o conceito do “non-limiting water range” (NLWR) ou taxa de água não limitante, como alternativa para integrar as propriedades físicas em um único parâmetro. Esse conceito foi aprimorado por Silva et al. (1994), redefinindo-o como uma taxa de conteúdo de água em que a limitação do crescimento das plantas são mínimas quando associados ao potencial matricial do

solo, porosidade de aeração e resistência do solo à penetração, denominando-a de “Least Limiting Water Range” (LLWR).

No Brasil, o LLWR recebeu o nome de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e foi utilizado pela primeira vez por Tormena et al. (1998b). O IHO tem sido utilizado por vários pesquisadores como índice para avaliação da qualidade física do solo (LEÃO et al., 2006; SILVA et al., 2006; TORMENA et al., 2007).

O IHO é definido como o conteúdo de água no solo em que não ocorrem limitações hídricas ao crescimento das plantas devido à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes (RP) (SILVA et al., 1994; TOPP et al., 1994; TORMENA et al., 1998b, 1999; LEÃO et al., 2005; SILVA et al., 2006), sendo parâmetro físico do solo que integra numa única medida os efeitos da estrutura do solo nos fatores físicos que diretamente influenciam o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas. O IHO tem como limite superior o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{cc}) ou o conteúdo de água em que a aeração do solo torna-se insuficiente para suprir a necessidade da planta (θ_{PA}) e como limite inferior o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou o conteúdo de água em que a resistência do solo à penetração torna-se limitante (θ_{RP}) (SILVA et al., 1994).

Na determinação do IHO, para cada valor de densidade é calculado um valor do IHO, podendo ocorrer valores de densidade do solo em que os valores do IHO são nulos, sendo que nesses casos o valor de densidade do solo está associado às condições estruturais do solo altamente restritivas para o crescimento radicular. Quando o valor de densidade do solo que apresenta um valor do IHO igual a zero, é considerada como densidade do solo crítica (D_{sc}), indicando que a partir deste valor de densidade do solo as condições físicas são altamente restritivas para o crescimento radicular. A ocorrência da densidade crítica foi constatada por vários autores em solos com diferentes texturas e manejos (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999; IMHOFF et al., 2001; BENJAMIN et al., 2003; LEÃO et al., 2004; CAVALIERI et al., 2006), sempre associada com a resistência do solo à penetração e com a porosidade livre de água necessária à aeração do solo.

Quatro possibilidades de resultados pode ser obtidos no calculo do IHO sendo dependentes dos valores dos parâmetros envolvidos na sua determinação. Segundo Wu et al. (2003) essas possibilidades podem ser apresentadas simplificadamente como:

a) Se $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$:

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP};$$

b) Se $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$:

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP};$$

c) Se $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$:

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP};$$

d) Se $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$:

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP};$$

O IHO é descrito como um índice de qualidade física e estrutural do solo para o crescimento das plantas (SILVA et al., 1994; WU et al., 2003), e sua amplitude indica o risco de exposição das culturas ao estresse hídrico ou condições estruturais do solo que restringem o crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo positivamente correlacionado com o conteúdo de matéria orgânica e negativamente com a densidade do mesmo (SILVA e KAY, 1997a). Quando a densidade do solo é maior que a densidade crítica do solo, esse apresenta sérios problemas de degradação estrutural do solo (BLAINSKI et al., 2009). Sistemas de manejo que proporcionem redução no IHO expõem às culturas a maior frequência de estresses por uma alta RP ou baixa PA (SILVA e KAY, 1997a; KLEIN e CAMARA, 2007). Com a degradação da estrutura do solo geralmente ocorre um aumento na densidade do solo e conseqüentemente, redução do IHO, de tal maneira que, aumenta a probabilidade das raízes das culturas serem expostas à ocorrência de limitações físicas no solo (SILVA e KAY, 1997b). Com o aumento da D_s a porosidade total do solo é diminuída, principalmente a macroporosidade, reduzindo assim as trocas de gases entre o solo e a atmosfera, aumentando a resistência do solo à penetração, podendo atuar

de forma à limitar o crescimento das plantas dentro da faixa de água disponível (LETEY, 1985; TOPP et al., 1994).

Com a compactação e/ou as reduções nos teores de matéria orgânica nos solos aumentam a probabilidade de ocorrência de condições físicas impróprias para o crescimento das plantas. Frequentemente a RP é a propriedade física do solo que mais reduz o IHO (TORMENA et al., 1999, 2007; ZOU et al., 2000; IMHOFF et al., 2001; BEUTLER et al., 2007), sendo o fator que assume maior importância em termos de limitações ao crescimento radicular (TORMENA et al., 1998b).

Beutler et al. (2004) avaliando a compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro constatou que uma densidade superior a $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$, o limite inferior do IHO foi reduzido pela RP, a RP não reduziu o IHO, sendo o limite superior o conteúdo de água em capacidade de campo. Tormena et al. (1998) verificaram que o IHO tem seu limite superior no conteúdo de água na capacidade de campo e na parte inferior, a resistência do solo à penetração.

Silva e Kay (1996) avaliaram o crescimento de plantas de milho, que foi negativamente correlacionado com a magnitude do IHO e com a frequência de ocorrência da umidade do solo fora dos limites do IHO. Beutler et al. (2004) verificaram valores acima de 1,82 MPa para a resistência do solo à penetração causaram uma redução de produtividade de arroz de sequeiro no Latossolo Vermelho de textura média.

Reichert et al. (2003) discutem que lavouras cultivadas em solos que apresentam reduzido IHO são mais vulneráveis à queda de produtividade por falta ou excesso de água do que àquelas cultivadas em solos com elevado valor de IHO. O IHO é um grande avanço na área de biofísica do solo e os autores acima recomendam seu uso como um índice integrador da qualidade física do solo. Algumas pesquisas estão sendo realizadas no Brasil, em diferentes culturas e sistemas de manejo, apontado o IHO como um excelente índice na avaliação da qualidade física do solo (TORMENA et al., 1998b, 1999b; IMHOFF et al., 2001; ARAUJO et al., 2004; LEÃO et al., 2004; CAVALIEIRI et al., 2006).

Entretando, a utilização do IHO, na avaliação da qualidade física do solo em sistemas de integração de pecuária com lavouras em semeadura direta, vêm sendo pouco utilizados no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-MAGID, A.H.; TRLICA, M.J.; HART, R.H. Soil and vegetation responses to simulated trampling. **Journal of Range Management**, v.40, n.4, p.303-306, 1987.

ALAKUKKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.36,n.1, p.141-152, 1994.

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

ALDERFER, R.B.; ROBINSON, R.R. Runoff from pastures in relation to grazing intensity and soil compaction. **Journal of American Society of Agronomy**, Madison, v.39, p.948-958, 1947.

ALVIM, J.M. **Produção e utilização de forrageiras de inverno: aveia e azevém**. Coronel Pacheco: EMBRAPA Gado Leiteiro, 1989. 28p. (Embrapa Gado Leiteiro. Documentos, 42).

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

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.2, p.337-345, 2004.

BALPH, D.F.; MALECHECK, J.C. Cattle trampling of crested wheat-grass under short-duration grazing. **Journal of Range Management**, Arizona, v. 38, n. 3, p. 226-227, 1985

BASSANI, H.J. **Propriedades físicas induzidas pelo plantio direto e convencional em área pastejada e não pastejada**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1996. 90p. (Tese de Mestrado)

BASSO, C.J.; REINERT, D.J. Variação da agregação induzida por plantas de cobertura de solo no inverno e plantio direto de milho em um solo podzólico. **Ciência Rural**,. Santa Maria, v.28, n.4, p.567-571,. 1998

BENJAMIN, J.G.; NIELSON, D.C.; VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, n.1,p.137-148, 2003..

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001
BERTOL, I.; GOMES, K.E.; DENARDIN, R.B.N.; MACHADO, L.A.Z. & MARASCHIN, G.E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v.33n.1, p. 779-786, 1998.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V.; Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, V.39, n.6, p.575-580, 2004.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num nitossolo vermelho distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa, v.33, n.6 p.273-281, 2009

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 à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.975-983, 2008.

BOONE, F.R. Wheater and other enviromental factors influencing crop responses to tillage and traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3, p.283-324, 1988.

BROOKES, P.C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 19, n. 2, p. 269-279, 1995.

BROWN, K.R.; EVANS, D.S. Animal treading: a review of the work of the late D.B. Edmond. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v.1, n.3, p.217-226, 1973.

BUSCHIAZZO, D.E.; PANIGATTI, J.L.; UNGER, P.W. Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid argentinean pampas, **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.49, n.2, p105-116, 1998.

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

CARVALHO, D.B.; BELLO, M.; MORAES, A.; PELISSARI, A.;BONA FILHO, A. **Desenvolvimento de pastagens em integração lavoura-pecuária na região de Guarapuava-PR** Revista. Acadêmica de Ciências. Agrárias e Ambientais., Curitiba, v. 6, n. 1, p. 11-19, jan./mar. 2008

CASTRO FILHO, C.; et al. Tillage methods and soil and water conservation in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p.271-83, 1991.

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.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; MAZURANA, M.; HENRIQUE DEBIASI, H.. Resistência mecânica do solo e força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras em sistema de integração lavoura-pecuária. Engenharia Agrícola., Jaboticabal, v. 28, n.4, p.730-739, 2008

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

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L.; SILVA, F.R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária, **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p. 235-244, 2009

DAWIDOWSKI, J.B.; LERINK, P. Laboratory simulation of the effects of traffic during seedbed preparation on soil physical properties using a quick uni-axial compression test. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.17, n.1, p.31-45 1990.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3,p.703-709, 1999.

DECICO, A.; REICHARDT, K. Determinação das propriedades térmicas do solo em condições de campo. **Ciência e Cultura**,Campinas, v.28, n.3, p.359-362, 1976.

EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in the tilled an untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, n.3, p.261-275, 1983

FEDERA, C.A.; TENPAS, G.H.; SCHMIDT, D.R.; TANNER, L.B. Pasture soil compaction by animal traffic. **Agronomy Journal**, Madison, v.53, n.1p.53-54, 1961.

FONTANELI, R.S.; FREIRE JR, N. Avaliação de consorciações de aveia e azevém-anual com leguminosas de estação fria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, . Brasília, v.26, n.5, p.623-630,1991

FONTANELI, R.S.; SANTOS, H.P.; AMBROSI, I.; IGNACZAK, J.C., DENARDIN, J.E.; REIS, E.M.; VOSS, M. **Sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, sob plantio direto**. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, 2000. 84p. (Circular Técnica, 6)

FONTANELI, R.S.; SANTOS, H.P.; REIS, E.M.; AMBROSI, I. Efeito da rotação de culturas com pastagens anuais de inverno no rendimento de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.10, p.1581-1586, 1998.

GASSEN, D.N. O manejo de pragas no sistema plantio direto. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo: EMBRAPA CNPT/FUNDACEP/FECOTRIGO/ FUNDAÇÃO ABC, 1993. p.129-139.

GLINSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton: CRC Press, 1990. 248p.

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, n. 1, p. 180-186, 1968.

GRADWELL, M.W. Soil moisture deficiencies in puddled pastures. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, New Zealand, v.9, p.127-136, 1966.

HADAS, A. Soil tilth: the desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, n.1, p.7-40,1997.

HAKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n.1, p.85-97, 1995.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3-4, p.239-282, 1988
HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.38, n.1, p.95-158, 1985.

HATFIELD, J.L. & EGLI, D.B. Effect of temperature on the rate of soybean hypocotyl elongation and field emergence. **Crop Science**, Madison, v.14, n.2, p.423-426, 1974.

HELMS, T.C.; DECKARD, E.L. & GREGOIRE, P.A. Corn, sunflower, and soybean emergence influenced by soil temperature and water content. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, n.1, p.59-63, 1997.

HELMS, T.C.; DECKARD, E.L.; GOOS, R.J. & ENZ, J.W. Soil moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence. **Agronomy Journal**, V.88, n.4, p.662-667, 1996.

HENKLAIN, J; CASÃO JUNIOR, R. Preparo do solo. In: **Manual técnico do subprograma de manejo e conservação do solo**. Paraná rural. Curitiba, SEAB/SEAB-PR, 1989 p.130-150.

HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H.; SILVA, W.M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.1, p.145-154, 1999.

HERNANI, L.C.; SALTON, J.C.; FABRÍCIO, A.C.; DEBECEK, R.; ALVES JÚNIOR, M. Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um latossolo roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 21:667-676, 1997.

HORN, R.; LEBERT, M. Compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p.45-70.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 10 janeiro de 2010.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; DIAS JR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.7, p.1493-1500, 2000

KARLEN, D.L.; STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 1994. p.53-72. (Special publication, 35).

KAY, B.D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advance Soil Science**, New York, v.12, n.1, p.1-51, 1990.

KAYOMBO, B.; LAL, R. Responses of tropical crops to soil compaction. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p.287-316.

KICHEL, A. N.; MIRANDA, C. H. B.; TAMBOSI, S. A. T. Produção de bovinos de corte com a integração agricultura x pecuária. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS: TEMAS EM EVIDÊNCIAS, 1., 2000, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2000. p. 51-68.

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

KLEIN, VA & CAMARA, RK. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.221-227, 2007

KLUTE, A. Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In: VAN DOREN, D.M.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; WHISLER, F.D. (Ed.) **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison: ASA, 1982. cap.3, p.29-43..

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F. & AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 570p

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2000. 36p. (EMBRAPA Trigo. Documentos, 20).

KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p.23-44.

KOPI, A.J.; DOUGLAS, J.T. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use and Management**, Oxford, v.7, n.1, p.52-56

LAL, R. Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained production. **Advances in Soil Science**, New York, v.5, n.1, p.1-109, 1986.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.1, p.151-170, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil Tillage Research**, Amsterdam v.88, n.2, p. 279-285, 2006.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, n.4, p.1210-1215, 2005..

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

LEWIS, C.E. Simulated cattle injury to planted slash pine: combination of defoliation, browsing and trampling. **Journal of Range Management**, Lakewood, v.33, n.1 p.340-345, 1980.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. Tese

(Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 70p. 2004.

MAPA, R.B.; GREEN, R.E.; SANTO, L. Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, n.11, p.1133-1138, 1986.

MELLO IVO, W.M.P.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.1, p.135-144, 1999.

MELLO, M.M.L; ÉLCIO H. YANO, E.H.; NARIMATSU K.C.P.; TAKAHASHI C.M.; BORGHI, E. integração agricultura-pecuária em plantio direto: produção de forragem e resíduo de palha após pastejo **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.121-129, 2004

MORAES, A. et al. Lavoura-pecuária em sistemas integrados na pequena propriedade. In: Encontro Latino Americano Sobre Plantio Direto na Pequena Propriedade, 3., 1998, Pato Branco. **Anais...** Pato Branco: CEFET-PR, 1998. CD-ROM.

MULHOLLAND, B.; FULLEN, M.A. Cattle trampling and soil compaction on loamy sands. **Soil Use and Management**, v.7 n.1, p.189-193, 1991.

MÜLLER, L., PRIMO, A.T. Influência do regime alimentar no crescimento e terminação de bovinos e na qualidade da carcaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v.21, n.4, p.445-452, 1986.

NEUFELDT, H.; AYARZA, M.A.; RESCK, D.V.S.; ZECH, W. Distribution of water-stable aggregates and aggregating agents in Cerrado Oxisols. **Geoderma**, Amsterdam, v.93, n.1, p.85-99, 1999.

POSTIGLIONI, S.R. **Comportamento da aveia, azevém e centeio na região dos Campos Gerais, PR**. Londrina: IAPAR, 1982. 18p. (IAPAR. Boletim Técnico, 14).

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.

REICOSKY, D.C.; VOORHEES, W.B.; RADKE, J.K. Unsaturated water flow through a simulated wheel track. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, n.1, p.3-8, 1981.

RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Models for the estimation of the physical quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) under pasture. **Brazilian Archives of Biology and Technology**.Curitiba, v.47, n.1, p.25-31, 2004.

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.5, p.821-828, 1999.

ROTH, C.H.; CASTRO FILHO, C.; MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com agregação de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, n.3., p. 241-248, 1991.

SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. M.; HERNANI, L. C. **Integração lavoura-pecuária: alternativas de rotação de culturas**. In: ENCONTRO REGIONAL DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO, 5., 2001, Dourados. Anais... Dourados: UFMS/Embrapa CNPAO, 2001. p. 31-32 (Documentos, 31).

SALTON, J.C.; HERNANI, L.C.; FONTES, C.Z. **Sistema Plantio Direto: o produtor pergunta a Embrapa responde**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação,1998. 248p.

SANCHEZ, P.A. **Properties and management of soil in tropics**. New York: John Wiley, 1976. 619p.

SCHOLEFIELD, D.; PATTO, P.M.; HALL, D.M. Laboratory research on the compressibility of four topsoils from grassland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.6 n.1., p.1-16, 1985.

SHARMA, P.K.; BHUSHAN, L. Physical characterization of a soil amended with organic residues in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. **Soil Tillage Research**, Amsterdam v. 60, n.1., p.143-152, 2001

SILVA, A. P. ; KAY, B. D.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. C.; Least Limiting Water Range of Soils. In: LAL, Rattan. (Org.). **Encyclopedia of Soil Science**. New York: , 2006, v. 1, p. 1026-1029.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.884-888, 1997b.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.877-883, 1997a.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant Soil**, Dordrecht, v.184, n.2 p.323-329, 1996.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775 -1781, 1994.

SILVA, V. R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n2., p.239-249, 2000

SINGH, B.; CHANASYK, D.S.; MCGILL, W.B.; NYBORG, M.P.K. Residue and tillage management effects on soil properties of a typic cryoboroll under continuous barley. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam 32:117-133, 1994.

SKOPP, J.; JAWSON, M.D.; DORAN, J.W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 54:1619–1625,1990.

SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE B.D.; OUWERKERK, C.van, (eds.). **Soil compaction in crop production**. Netherlands: Elsevier Science, 1994. p.1-22.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B.C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p.167-190.

STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 185, n. 1, p. 151-162, 1996.

STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; CASANOVAS, E.M. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a typic Argiudoll. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.4,;1466-1472, 1997.

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

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction: Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.30, n.2/4, p.217-243, 1994.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3.,p.725-730, 2001.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JR, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.102, n.1, p.18-22, 1966.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Soil Quality Evaluation Program. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36p. (Technical report, 2)

TOPP, G.C.; ZEBTCHUK, W. The determination of soil water desorption curves for soil cores. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.59, n.1, p.19-26, 1979.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.1023-1031, 2004

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, 1998a.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.52.n.2, p.223-232, 1999b.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998b.

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

UNGER, P.W.; JONES, O. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.45,n.1, p. 39-57, 1998.

VAN WIJK, W.R. (ed.). Physics of plant environment. Amsterdam: North Holland Publishing Company. 1963, 382p.

VEPRASKAS, M.J., MINER, G.S. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root-growth. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam v.50, n.2, p.423-427, 1986.

VIEHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiology**. v.2, n.1, p.71-78, 1927

VIEIRA, M.J., MUZILLI, O. Características físicas de um latossolo vermelho-escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19 n.7, p.873-882, 1984.

VOORHEES, W.B.; LINDSTROM, M.J. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48. n.1, p.152-156, 1984.

WEAICH K.; CASS, A.; BRISTOW, K.L. Pre-emergent growth of maize (*Zea mays* L.) as a function of soil strength. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.40, n.1, p.3-23, 1996.

WESTERHOF R. et al. Aggregation studied by laser diffraction in relation to plowing and liming in the Cerrado region in Brazil. **Geoderma**, v. 90, n.1, p. 277-290, 1999.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the no limiting water range. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, n.3, p.401-414, 2003.

3. CAPÍTULO 1

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB PLANTIO DIRETO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA.

RESUMO. O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é considerado um moderno indicador da qualidade física do solo para o crescimento das plantas. O objetivo desse estudo foi determinar o IHO para avaliar a qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. A área de estudo foi constituída de um sistema de integração lavoura-pecuária com cultivo de soja (*Glycine Max* L) no verão e aveia (*Avena strigosa* Schreb) + azevém (*Lolium multiflorum* Lam) no inverno manejados com diferentes alturas de pastejo: 7, 14, 21 e 28 cm de altura e testemunha sem pastejo. Foram retiradas amostras indeformadas nas camadas de 0-7,5 cm e 7,5-15 cm, nas quais foram determinadas a densidade do solo (D_s), curva de retenção de água e de resistência do solo à penetração e estimado o IHO. A densidade do solo crítica (D_{sc}) foi tomada como aquela em que o $IHO=0$. Independente dos tratamentos, foi constatado que com o aumento da D_s são necessários maiores teores de água para que a resistência do solo à penetração seja menor que 2,5 MPa, bem como menores teores de água para que a aeração do solo não se torne limitante. Nos tratamentos 21 e 28 cm de altura de pastejo, na camada de 0-7,5 cm, verificou-se maior amplitude do IHO em relação à testemunha, sugerindo que a integração lavoura-pecuária crie um ambiente físico positivo no solo desde que se mantenha uma carga animal adequada para evitar o sobrepastejo das áreas. No tratamento 7 cm, a degradação física do solo é muita elevada na camada superficial, e certamente predispõe as culturas a estresses de RP sob secamento do solo e de aeração com elevados teores de água sob períodos prolongados. Verificou-se redução progressiva da proporção de amostras com valores de $D_s > D_{sc}$ do tratamento 7 cm para a testemunha,

indicando que o pisoteio excessivo dos animais resulta numa perda da qualidade física do solo na camada de 0-7,5. Para manter a qualidade física do solo adequada sob pastejo da aveia e azevém no inverno, na camada de 0-7,5 cm, a altura de pastejo deve ser mantida em 21 cm da superfície do solo.

Palavras-chave: qualidade física do solo, densidade do solo, resistência do solo à penetração, estrutura do solo, água disponível.

LEAST LIMITING WATER RANGE OF AN DYSTROFERRIC RED LATOSOL UNDER NO-TILLAGE IN FARM-LIVESTOCK INTEGRATED SYSTEM

ABSTRACT: Least limiting water range (LLWR) is considered a modern indicator of soil physical quality for plant growth. The aim of this study was to determine the LLWR for assessing the soil physical quality of a dystroferric Red Latosol (Oxisol) under no-tillage in a farm-livestock integration system. The study area consists of a farming-livestock integration system with soybean (*Glycine Max* L) in the summer and oat (*Avena strigosa* Schreb) plus ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam) in the winter managed with different grazing heights during the grazing: 7, 14, 21 and 28 cm and a control without grazing. Undisturbed soils samples were taken from layers of 0-7.5 cm and 7.5-15 cm depth, in which were determined the soil bulk density (Bd), soil water retention and soil resistance to penetration curves, for then calculate the LLWR. The critical soil bulk density (Bdc) was taken as the one in which the LLWR=0. Regardless of the treatments, it was found that an increased of the soil bulk density require an increase of soil water contents to maintain the soil resistance to penetration below 2.5 MPa and a decreased in soil water for properly soil aeration, mainly in the 0-7.5 cm depth. In treatments 21 and 28 cm heights grazing, there was a greater magnitude of LLWR in relation to the control, suggesting that farming-livestock integration creates a positive physical environment on the soil, providing that it could be maintained appropriate stocking to prevent overgrazing. In the treatment 7 cm, the soil physical

degradation is very high in the 0-7.5 cm layer, and certainly predisposes the crop to stress resistance under soil drying and aeration under conditions of prolonged high soil moisture. A progressive reduction in the proportion of samples with values of soil bulk density greater than the critical bulky density of the soil treatment 7 cm toward the witness, indicating that the treatment effect of excessive trampling of the animals results in loss of soil physical quality in the 0-7.5 cm soil layer. Grazing height of oat and ryegrass pasture need to be maintained above 21 cm to get an adequate physical soil quality in the 0-7.5 cm soil layer. Key words: soil physical quality, soil bulk density, soil resistance to penetration, soil structure, available water.

3.1. INTRODUÇÃO

O sistema de integração lavoura-pecuária (SILP) é uma alternativa que vem atraindo grande interesse dos agricultores nas regiões produtoras de grãos. Nesse sistema, as áreas de lavouras dão suporte à pecuária através da produção de forragem para os animais no intervalo entre dois cultivos de grãos, agregando renda aos produtores e constituindo-se em uma alternativa mais segura e eficiente de produção agropecuária. No sul do Brasil, a utilização das pastagens anuais de estação fria para a produção de carne ou leite se constitui em uma alternativa ao cultivo de cereais (FONTANELI e FREIRE JÚNIOR, 1991). Na maior parte dessa região, as pastagens de inverno são formadas principalmente por aveia (*Avena strigosa* Schreb) e azevém (*Lolium multiflorum* Lam), produzindo grande quantidade de forragem e permitindo o aproveitamento intensivo de áreas ociosas no inverno (ALVIM, 1989), com produção residual de fitomassa necessária à formação de palhada para o plantio das culturas de verão em sistema de plantio direto (SPD).

A presença dos animais na pastagem tem efeitos diretos e indiretos tanto sobre a forragem quanto sobre o solo. As altas pressões aplicadas pelos cascos dos animais tendem a danificar a vegetação e deformar o solo (SCHOLEFIELD et al., 1985) e provocam a compactação superficial do solo (LEWIS, 1980;

BALPH e MALECHECK, 1985). Por outro lado, observa-se em pastagens bem manejadas, um incremento dos teores de matéria orgânica do solo, assim como o crescimento do sistema radicular fasciculado e vigoroso das gramíneas forrageiras favorecendo a estruturação do solo e com potencial para a reversão da compactação causada pelo pisoteio animal (MORAES e LUSITOSA, 1997). No processo de compactação, há um concomitante aumento da densidade do solo e redução no volume do espaço poroso, principalmente de macroporos (KOOLEN, 1994), reduzindo a infiltração, a disponibilidade de água e a difusão de gases bem como aumentando a resistência do solo à penetração das raízes. Outros efeitos incluem a perda de nitrogênio por desnitrificação (STEPNIEWSKI et al., 1994) sob condições de reduzida aeração do solo, as quais podem ocorrer em solos argilosos compactados submetidos a períodos prolongados de elevado teor de água no solo.

Em SILP, os impactos na qualidade físico-hídrica do solo ocorrem mais significativamente na camada de 0-5 cm de profundidade (MARCHÃO, 2007), na qual a pressão proveniente do pisoteio animal, durante a fase de pastejo, resulta num aumento da densidade do solo (D_s) (LANZANOVA et al., 2007), conseqüentemente reduzindo a porosidade (FLORES et al., 2007). Em muitos estudos os valores de D_s não têm atingido níveis críticos que limitam a produtividade dos cultivos subseqüentes (MARCHÃO, 2007; FLORES et al., 2007). Spera et al. (2009) também indicam que, apesar do pisoteio animal alterar os atributos físicos do solo, isso não ocorre em intensidade suficiente para degradá-lo. No SILP, o pisoteio dos animais provoca diminuição da porosidade, modificando a retenção e disponibilidade de água (COSTA et al., 2009). Para haver uma melhoria ou manutenção da qualidade física do solo nesse sistema, deve-se estabelecer uma correta altura de pastejo, via controle da lotação animal, para que não haja compactação do solo pelo excessivo pisoteio animal (CARDOSO et al., 2007; FIDALSKI et al., 2008).

Diferentes propriedades físicas têm sido utilizadas para avaliar a qualidade física do solo (KARLEN e STOT, 1994) e, dentre estas, a D_s e a porosidade são as mais utilizadas. Um solo com boa qualidade física requer um

balanço entre aeração e retenção de água, além de resistência do solo à penetração não impeditiva ao crescimento das raízes (LETEY, 1985). Na ausência de limitações térmicas, as condições físicas na interface solo-raiz são controladas pela disponibilidade de água, aeração e resistência à penetração, as quais são dependentes da estrutura do solo (LETEY, 1985; BOONE, 1988; HADAS, 1997). De maneira geral, condições físicas do solo favoráveis ao crescimento das plantas têm sido associadas com uma porosidade de aeração mínima de 10% (GRABLE e SIEMER, 1968; GLINSKI e LIPIEC, 1990; XU et al., 1992), abaixo da qual a difusão de oxigênio no solo se torna limitante à respiração das raízes. Várias pesquisas apontam a resistência do solo à penetração como uma variável física muito sensível à condição estrutural do solo (EHLERS et al., 1983; HAMBLIN, 1985; STIRZAKER et al., 1996), e um valor de resistência do solo à penetração de 2,0 MPa tem sido comumente associado como impeditivo para o crescimento das raízes (TAYLOR et al., 1966) e da parte aérea das plantas (TARDIEU, 1994; WEAICH et al., 1996).

A qualidade física do solo é função da condição estrutural e do conteúdo de água do solo. O intervalo hídrico ótimo (IHO) integra três fatores diretamente associados com crescimento das plantas: aeração, resistência do solo à penetração e água disponível às plantas. Devido a esta característica, o IHO é considerado um indicador multifatorial da qualidade física do solo (SILVA et al., 2006, TORMENA et al., 2007;), tendo sido utilizado com esta finalidade em vários estudos (SILVA e KAY, 1996; TORMENA et al., 1999; SHARMA e BHUSHAN, 2001; WU et al., 2003; LAPEN et al., 2004; LEÃO et al., 2005). Em geral, com o aumento da D_s ocorre uma redução do IHO, indicando que as condições físicas do solo vão se tornando limitantes às plantas. O valor de densidade do solo em que o IHO se iguala à zero ($IHO=0$) indica que, a partir dessa densidade, as condições físicas são altamente restritivas para o crescimento radicular. Este valor de densidade é considerado como a densidade do solo crítica (D_{sc}). A ocorrência da D_s maior do que a D_{sc} foi constatada por vários autores em solos com diferentes classes texturais e sistemas de manejo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999; IMHOFF et al., 2001; BENJAMIN et al., 2003;

LEÃO et al., 2004; CAVALIERI et al., 2006), a qual geralmente estava associada com a $RP > 2,0$ MPa e/ou com a porosidade de aeração do solo $< 10\%$. No entanto, Leão et al. (2005) argumentam que, para a definição dos limites críticos do IHO, é recomendado que se estabeleçam os valores dos limites críticos conforme as condições experimentais e o conhecimento dos processos ou fenômenos envolvidos.

Reichert et al. (2003) consideram que o IHO é um grande avanço na área de biofísica do solo. Neste sentido, várias pesquisas realizadas no Brasil, em diferentes culturas e sistemas de manejo, têm utilizado o IHO na avaliação da qualidade física do solo (TORMENA et al., 1998, 1999; IMHOFF et al., 2001; ARAUJO et al., 2004; LEÃO et al., 2004; CAVALIERI et al., 2006). No entanto, a utilização do IHO na avaliação da qualidade física do solo em SILP com lavouras sob semeadura direta continuada ainda são escassas no Brasil. Práticas de manejo que favorecem o acúmulo de matéria orgânica no solo, como no caso da semeadura direta e do cultivo de pastagens, tendem a proporcionar condições físicas menos restritivas às plantas, uma vez que, em virtude da cobertura do solo pela palha, é esperado que ocorram mais frequentemente teores de água no solo dentro dos limites do IHO.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi quantificar o IHO num Latossolo Vermelho distroférico sob SILP submetido a diferentes alturas de pastejo de aveia mais azevém e utilizá-lo na avaliação da qualidade física do solo e indicar limites de altura de corte das forrageiras pelo pastejo mantendo a qualidade física do solo para as culturas implantadas após o pastejo.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Fazenda Experimental da Cooperativa Agroindustrial de Campo Mourão (COAMO), localizada no município de Campo Mourão, Estado do Paraná ($24^{\circ}02' S$ e $52^{\circ}22' W$). A região apresenta um clima tipo Cfa, subtropical úmido mesotérmico, segundo a classificação de Köppen, com médias anuais de $20^{\circ}C$ de temperatura e de 1340 mm de precipitação. O

solo da área experimental é identificado como Latossolo Vermelho distroférico, com teores médios de 850 g kg⁻¹ de argila, 120 g kg⁻¹ de silte e 30 g kg⁻¹ de areia na camada de 0-20 cm, enquadrando-se na classe textural muito argilosa.

O experimento foi implantado em 2002 em uma área de 8 ha, , divididos em oito parcelas com tamanhos variando de 0,5 a 1,7 ha. e é constituído de um SILP envolvendo as culturas de soja ou milho semeadas no verão e aveia (*Avena strigosa* Schreb) + azevém (*Lolium multiflorum* Lam) consorciadas, no inverno, manejado em sistema de plantio direto. As culturas de aveia e azevém foram semeadas em quantidades de 60 kg/ha⁻¹ de aveia e 30 kg/ha⁻¹ de azevém. Os tratamentos foram definidos visando manter as alturas de pastejo de aveia + azevém em 7, 14, 21 e 28 cm, assim como um tratamento testemunha, no qual não havia a entrada de animais para pastejo. Foram utilizadas duas repetições por tratamento, dispostas uma ao lado da outra. A testemunha foi mantida no interior de cada repetição, constituída de uma área de 100 m² delimitada com cerca elétrica, à qual os animais não tiveram acesso durante o período experimental.

No período de pastejo (120 dias) a altura da pastagem foi monitorada semanalmente, sendo ajustada com taxas de lotações médias de 2,44; 2,61; 2,25 e 1,82 UA ha⁻¹(unidades animal) (), respectivamente para os tratamentos de 7, 14, 21 e 28 cm de altura prevista para o pastejo. Foi utilizado o método de pastejo contínuo com a técnica de “put and take”. Em cada unidade experimental permaneciam dois animais “testers” e um número variável de animais reguladores, utilizados de forma a se manter os diferentes tratamentos de altura da pastagem (MOTT e LUCAS, 1952).

Após a retirada dos animais, foram coletadas em cada parcela amostras indeformadas de solo nas camadas de 0-7,5 e 7,5-15 cm de profundidade, sendo 36 amostras em cada camada, totalizando 72 amostras por tratamento. Para a coleta dessas amostras foram utilizados cilindros em aço inox com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro interno, totalizando cerca de 100 cm³ de volume. A amostragem foi realizada utilizando um macaco hidráulico para a introdução lenta dos anéis no solo com o auxílio de uma amostrador, para evitar a deformação da estrutura do solo durante a coleta das amostras.

No laboratório, cada camada e tratamento, as amostras foram divididas em 12 grupos de três amostras e saturadas com uma solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} , por 48 h. Em seguida, foi determinada a massa da amostra na condição saturada. Posteriormente, utilizando-se grupos de três amostras por tratamento e camada, as mesmas foram submetidas às tensões de 20, 40, 60 e 80 hPa em uma mesa de tensão (ROMANO et al., 2002) e de 100, 300, 500, 700, 1000, 2000, 4000 e 15000 hPa em placas porosas em extratores de Richards (DANE e HOPMANS, 2002). Ao cessar a drenagem, condição de equilíbrio para cada tensão, as amostras tiveram suas massas registradas para a determinação do teor de água das mesmas. Na seqüência, foi determinada a resistência à penetração (RP), utilizando-se um penetrômetro eletrônico de bancada com as seguintes características: haste de penetração com ponta cônica de 4 milímetros de diâmetro e semi-ângulo de 30° ; deslocamento da haste em velocidade constante de 0,01 m por minuto; e frequência de leitura de resistência de um valor a cada 0,75 segundos, sendo calculado um valor médio de resistência para cada amostra, desconsiderando-se as primeiras e as últimas 30 leituras. As amostras foram posicionadas no penetrômetro de forma que a ponta cônica se deslocou ao longo do eixo longitudinal no centro dos cilindros.

Após a determinação da RP, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105^\circ\text{C}$ por 24 horas e, na seqüência, transferidas para dessecadores e determinada a massa do solo seco. A partir da massa do solo seco e do volume do cilindro foi calculada a D_s pela razão da massa de sólidos e o volume do cilindro. O teor de água do solo, em base de volume, foi calculado pela razão da massa de água e o volume do cilindro, considerando a densidade da água igual a 1000 kg m^{-3} .

Para a determinação do IHO, é necessário descrever matematicamente as curvas de retenção de água e de resistência do solo. A curva de retenção de água no solo (CRA), expressa pela relação entre a tensão da água no solo (ψ) e o conteúdo de água (θ), foi estimada utilizando-se a função proposta por Ross et al. (1991), descrita na equação 1:

$$\theta = a \psi^b \quad (1)$$

em que θ é o conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ψ é a tensão da água no solo (hPa) e a e b são parâmetros ajustados. Para a quantificação do IHO, é necessário incorporar a D_s na descrição matemática da CRA, uma vez que a D_s permite descrever a variabilidade da estrutura do solo e estimar o conteúdo de água em potenciais específicos. Desta forma, a equação 1 toma a forma da equação 2, a qual foi utilizada por Silva et al. (1994) e Betz et al. (1998).

$$\ln(\theta) = \ln(a + bD_s) + c \ln(\psi) \quad (2)$$

em que a , b e c são coeficientes de ajuste do modelo. Este modelo foi aplicado a cada tratamento e o efeito de profundidade foi avaliado considerando-a como variável “dummy” ou de classe, assumindo-se valor igual a 0 para a camada de 0-7,5 cm e valor igual a 1 para a camada de 7,5-15 cm.

A RP varia com o conteúdo de água (θ) e com a D_s e da relação funcional entre a RP, D_s e θ , pode-se determinar a curva de resistência do solo (CRS). A CRS foi ajustada por meio de um modelo não-linear utilizado por Busscher (1990). O modelo utilizado é descrito na equação 3.

$$RP = d \theta^e D_s^f \quad (3)$$

que com a transformação logarítmica do mesmo, resulta na equação 4:

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln D_s \quad (4)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ é o conteúdo de água do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e d , e e f são os coeficientes de ajuste do modelo. O efeito de profundidade foi avaliado seguindo o mesmo procedimento adotado para a curva de retenção de água no solo.

O IHO foi determinado conforme Silva et al. (1994), calculando um valor para cada amostra. Os valores das características físicas do solo limitantes/críticos ao crescimento das plantas foram definidos a partir de dados publicados na bibliografia: (1) em relação à tensão da água no solo: a capacidade de campo ou o conteúdo de água do solo foi estimado numa tensão equivalente a 100 hPa (θ_{CC}), conforme Reichardt (1988) e o ponto de murcha permanente como o teor de água retido na tensão de 15000 hPa (θ_{PMP}), conforme Savage et al. (1996); (2) em relação à resistência do solo à penetração, estimou-se o

conteúdo de água do solo para um valor de resistência à penetração (θ_{RP}) de 2,5 MPa (CAVALIERI et al., 2006); e (3) em relação à porosidade de aeração, estimou-se o teor de água do solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de 10%. O valor da θ_{PA} foi calculado utilizando a densidade do solo (D_s) e de partículas $[(1-D_s/D_p)-0,1]$. A D_p foi estimada pelo método do balão volumétrico, conforme Embrapa (1997), e foi utilizado um valor de $2,85 \text{ Mg m}^{-3}$, que corresponde à média de 33 amostras coletadas aleatoriamente na área experimental.

Os ajustes de CRA e CRS foram feitos com a rotina PROC REG e PROC GLM do programa SAS (SAS INSTITUTE, 1986). Após a obtenção do IHO, a densidade do solo crítica foi determinada a partir da interseção dos limites inferior e superior do IHO, no qual o IHO é igual a zero.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os indicadores estatísticos das propriedades físicas determinados nas amostras, para cada tratamento e camada, são apresentados na Tabela 1. As variáveis D_s , θ e RP apresentaram ampla faixa de valores, o que é desejável para a modelagem da CRA e CRS. Constatou-se a ocorrência de elevados valores do coeficiente de variação (CV) para a RP, os quais estão associados ao gradiente de conteúdo de água do solo, bem como à variação da D_s . Resultados semelhantes são encontrados em diversas publicações (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998, 1999; IMHOFF et al., 2001; LEÃO et al., 2004; LEÃO et al., 2005; CAVALIERI et al., 2006). A RP teve uma tendência decrescente de seus valores médios, do tratamento 7 cm à testemunha, apresentando a maior variação entre os tratamentos na camada de 0-7,5 cm.

Tabela 1 – Propriedades físicas do solo determinados para cada tratamento, nas amostras com estrutura preservada.

Propriedade	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
Tratamento 7 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,31	0,05	1,18	1,40	3,94
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,43	0,06	0,36	0,54	14,12
RP (MPa)	3,98	1,98	1,59	9,83	49,81
Tratamento 7 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,30	0,05	1,19	1,44	4,19
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,42	0,06	0,31	0,54	14,71
RP (MPa)	3,61	2,04	1,14	11,28	56,50
Tratamento 14 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,29	0,05	1,18	1,39	3,94
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,43	0,06	0,31	0,53	14,30
RP (MPa)	3,86	1,96	0,49	9,75	50,74
Tratamento 14 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,32	0,05	1,20	1,42	3,81
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,43	0,06	0,36	0,54	14,45
RP (MPa)	3,62	1,65	1,37	7,63	45,51
Tratamento 21 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,27	0,05	1,16	1,40	4,31
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,43	0,06	0,34	0,54	14,70
RP (MPa)	3,47	1,46	0,43	6,79	42,09
Tratamento 21 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,29	0,04	1,16	1,37	3,35
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,42	0,06	0,34	0,55	15,13
RP (MPa)	3,33	1,80	1,04	7,78	54,16
Tratamento 28 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,26	0,08	1,00	1,40	7,50
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,41	0,07	0,33	0,60	17,75
RP (MPa)	3,77	2,37	0,55	10,87	62,87
Tratamento 28 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,31	0,06	1,15	1,44	4,79
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,41	0,06	0,32	0,53	15,39
RP (MPa)	3,43	1,46	0,59	6,59	42,60
Testemunha – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,21	0,07	0,95	1,34	6,45
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,42	0,06	0,32	0,54	15,28
RP (MPa)	2,63	1,43	0,77	6,26	54,52
Testemunha – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m^{-3})	1,29	0,04	1,21	1,38	3,48
θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,43	0,05	0,33	0,53	13,66
RP (MPa)	3,03	1,71	1,21	9,59	56,41

N = 36; Ds = densidade do solo; θ = conteúdo de água; RP = resistência do solo à penetração

Os modelos CRS e da CRA são apresentados na Tabela 2. Apesar do menor coeficiente de determinação do modelo ajustado à curva de resistência do solo à penetração para alguns tratamentos, na camada de 0-7,5 cm, os valores de F são altamente significativos ($p < 0,001$). Para a curva de retenção de água, o modelo matemático ajustado aos dados explicou acima de 80% da variabilidade do conteúdo de água para os tratamentos, à exceção do tratamento 28 cm. No ajuste da CRA, a Ds mostrou uma influência positiva na variação do conteúdo de água no solo (θ), também verificado neste mesmo solo por Tormena et al. (2007).

Os resultados indicam que o fenômeno de retenção de água do que de RP, como identificado pelos maiores valores de r^2 dos modelos ajustados em todos os tratamentos. A CRS foi influenciada pela profundidade, cujo efeito foi incorporado nos coeficientes de ajuste do modelo. A maior RP na camada de 0-7,5 cm pode ser atribuída ao efeito do pisoteio animal no aumento da Ds. A maior densidade na camada superficial do solo decorrente do pisoteio animal decorre da proporcionalidade da distribuição da carga em função da área de contato (SOEHNE, 1958), como também destacado por Mapfumo et al. (1999). Com exceção da testemunha, os coeficientes de determinação dos modelos de resistência foram menores na camada superficial, em razão, provavelmente, da maior variabilidade espacial da estrutura imposta pelo pisoteio animal, pelo crescimento das raízes das forrageiras e de atividade de mesofauna. Já, em profundidade, os coeficientes de determinação foram maiores que 80%, similar àqueles obtidos por outros autores em diferentes solos (TORMENA et al., 1998, 1999; LEÃO et al., 2004; CAVALIERI et al., 2006). Para a CRA, não se verificou diferença significativa entre as camadas amostradas ($p > 0,05$), indicando que a retenção de água é similar no perfil amostrado em cada tratamento, e que a Ds capturou os possíveis efeitos estruturais associados às camadas amostradas.

Os coeficientes estimados do modelo da CRS indicam que a resistência variou positivamente com a Ds e negativamente com θ , estando em concordância com os resultados obtidos por vários autores (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; TORMENA et al., 1999; IMHOFF et al., 2001; LEÃO et al., 2004;

CAVALIERI et al., 2006). O aumento da RP com o decréscimo da umidade é um processo bem conhecido, estando relacionado com a redução da espessura da película de água sobre as partículas individuais e conseqüente aumento na magnitude das forças de coesão entre as partículas do solo, ampliado com o aumento da Ds. A partir da estimativa dos coeficientes apresentados na Tabela 2, foram obtidos os conteúdos de água em que a resistência à penetração atingiu 2,5 MPa (θ_{RPc}), valor tomado como impeditivo para o crescimento das raízes. Para a CRA, o sinal positivo do coeficiente relacionado com a Ds indica que a retenção de água aumenta com a Ds, corroborando com os resultados obtidos por Tormena et al. (2007) e Araújo et al., (2004) neste mesmo solo. O efeito da Ds no aumento da retenção de água ocorre por causa da alteração na distribuição dos tamanhos de poros, com aumento proporcional de poros de menor diâmetro, os quais retêm a água com maior energia (RICHARD et al., 2001).

A variação do conteúdo de água nos limites críticos do IHO, para os tratamentos e camadas, é apresentada na Figura 1. Em todos os tratamentos foi constatado que, com o aumento da Ds, tem que aumentar o teor de água para manter a resistência a penetração (θ_{RP}), bem como decréscimo do teor de água para manter a porosidade de aeração (θ_{PA}) (Figura 1), corroborando os resultados obtidos Silva et al. (1994), Tormena et al. (2007), Imhoff et al. (2001), Araújo et al. (2004) e Leão et al. (2004). Constatou-se que a θ_{RP} foi superior ao conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para todos os tratamentos, exceto para a profundidade 0-7,5 cm com tratamento 28 cm e testemunha nos valores iniciais de Ds, indicando que a resistência à penetração é uma variável de grande importância no controle da qualidade física deste solo.

Tabela 2 – Ajuste das equações da curva de resistência do solo à penetração e da curva de retenção de água no solo nos diferentes tratamentos e camadas estudadas.

Tratamento/ Profundidade	Curva de Resistência do Solo n=36	Curva de Retenção de Água n=72
7 cm/ 0-7,5 cm	RP= 0,129758 Ds ^{5,01776} θ ^{-2,32068} F = 44,57; P = 0,0001; r ² = 0,72	θ = e ^(-1,11285 + 0,50168 Ds) ψ ^(-0,68411)
7 cm/ 7,5-,15 cm	RP = 0,042164 Ds ^{6,81612} θ ^{-2,88958} F = 106,5; P = 0,0001; r ² = 0,86	F = 256,46; P = 0,0001; r ² = 0,88
14 cm/ 0-7,5 cm	RP = 0,083953 Ds ^{7,22308} θ ^{-2,11517} F = 21,47; P = 0,0001; r ² = 0,56	θ = e ^(-0,90115 + 0,34085 Ds) ψ ^(-0,06785)
14 cm/ 7,5-,15 cm	RP = 0,062480 Ds ^{6,04148} θ ^{-2,66663} F = 79,11; P = 0,0001; r ² = 0,82	F = 196,59; P = 0,0001; r ² = 0,85
21 cm/ 0-7,5 cm	RP = 0,107173 Ds ^{5,34981} θ ^{-2,45088} F = 27,81; P = 0,0001; r ² = 0,62	θ = e ^(-0,68740 + 0,19153 Ds) ψ ^(-0,07078)
21 cm/ 7,5-,15 cm	RP= 0,042403 Ds ^{7,62625} θ ^{-2,58448} F = 83,68; P = 0,0001; r ² = 0,83	F = 251,87; P = 0,0001; r ² = 0,87
28 cm/ 0-7,5 cm	RP=0,219883*Ds ^{5,25328} θ ^{-1,61705} F = 30,76; P = 0,0001; r ² = 0,65	θ = e ^(-0,58972 + 0,10180 Ds) ψ ^(-0,07234)
28 cm/ 7,5-,15 cm	RP = 0,058338 Ds ^{6,09219} θ ^{-2,59359} F = 70,51; P = 0,0001; r ² = 0,81	F = 102,78; P = 0,0001; r ² = 0,74
Testemunha/ 0-7,5 cm	RP = 0,091135 Ds ^{6,78827} θ ^{-2,23664} F = 102,5; P = 0,0001; r ² = 0,86	θ = e ^(-0,85358 + 0,31332 Ds) ψ ^(-0,06706)
Testemunha/ 7,5-,15 cm	RP = 0,054637 Ds ^{6,85042} θ ^{-2,50425} F = 37,10; P = 0,0001; r ² = 0,69	F = 554,68; P = 0,0001; r ² = 0,92

Os resultados indicam que, neste solo, o limite inferior de água disponível, associado com a tensão de água no solo de 15000 hPa tem pouco

relevância quando da avaliação da disponibilidade de água no solo e que o mesmo pode ser substituído pelo teor de água em que a RP atinge um valor crítico. No entanto, deve-se considerar que o valor crítico de resistência pode ser ampliado em sistema de plantio direto em função da maior disponibilidade temporal de água associada com a cobertura do solo, especialmente se há formação de uma rede de bioporos contínuos e estáveis que atuam como rotas alternativas ao sistema radicular das culturas. O período de regeneração da vegetação após a saída dos animais e antes do plantio da cultura de verão é de suma importância para a renovação radicular e regeneração dos bioporos eliminados pelo tráfego de máquinas e animais, além dos ciclos de umedecimento e secagem do solo que auxiliam a recuperação da estrutura do solo. A θ_{PA} determinou o limite superior do IHO a partir de diferentes valores de densidade nos tratamentos estudados. De forma geral, os resultados indicam que o aumento na densidade implica em maior perda de água do solo para que se tenham poros ocupados com ar em quantidade suficiente para que o fluxo de gases no solo não limite o crescimento das raízes.

Na camada de 0-7,5 cm, os resultados indicam que o IHO foi fortemente reduzido no tratamento 7, 14 e 21 cm de altura de pastejo, devido resistência do solo à penetração motivada pelo pisoteio animal e, provavelmente, pela menor capacidade de regeneração das plantas de aveia + azevém desde a retirada dos animais até o momento em que foi realizada a amostragem. Para os outros tratamentos, o limite superior do IHO se constitui em θ_{CC} para a maior parte dos valores de D_s e, para D_s entre 1,25 e 1,26 $Mg\ m^{-3}$, a θ_{PA} substitui a θ_{CC} como limite superior do IHO. Observa-se que nessa camada a θ_{RP} substitui a θ_{PMP} a partir das $D_s > 1,12\ Mg\ m^{-3}$ para os tratamentos 28 cm e testemunha. Nos outros tratamentos, como já foi salientado, a θ_{RP} determina o limite inferior do IHO em toda faixa de D_s .

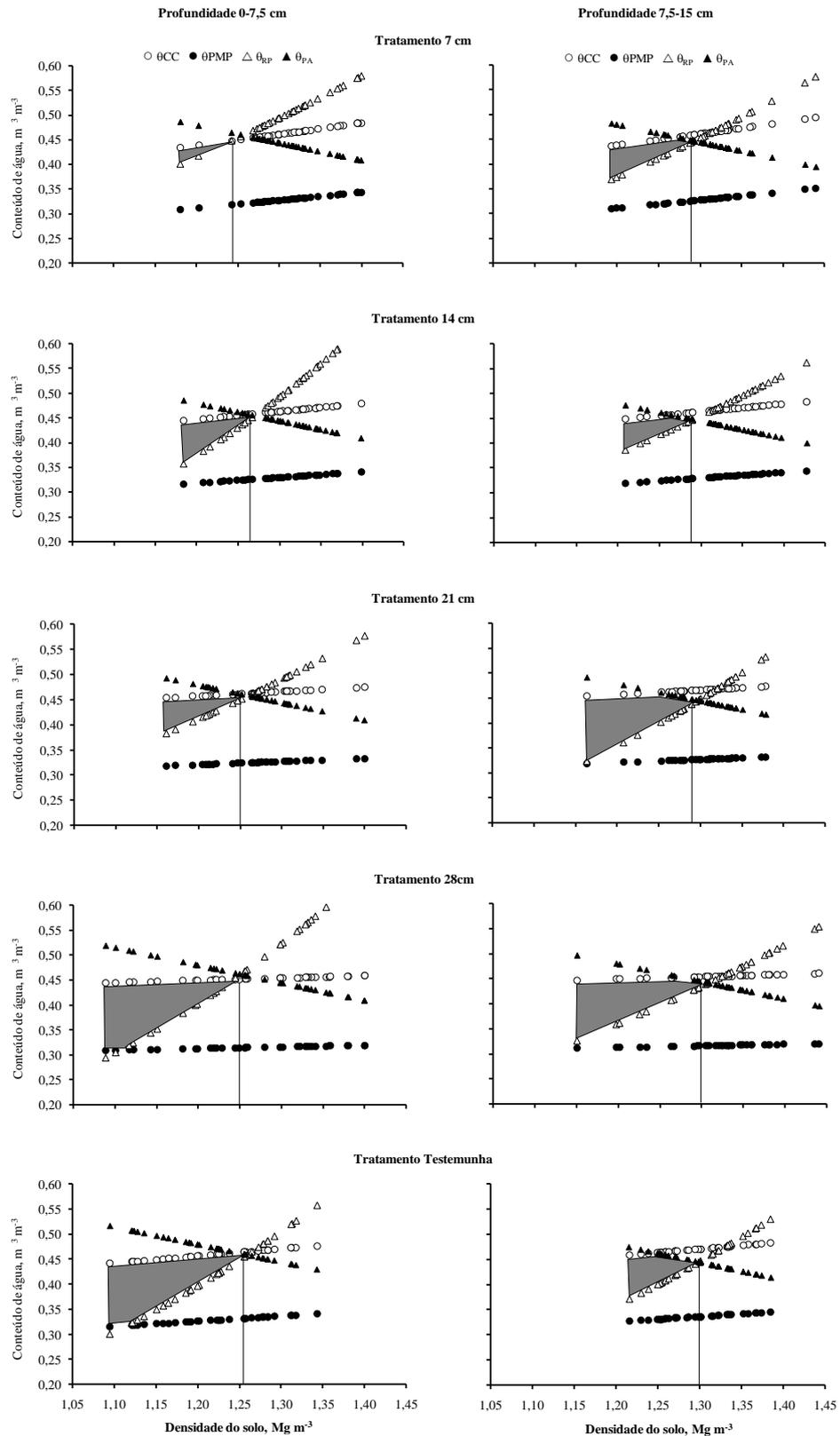


Figura 1 – Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), resistência à penetração (θ_{RP}) e porosidade de aeração (θ_{PA}), nas camadas de 0-7,5 cm e 7,5-15 cm de profundidade, nos tratamentos 7, 14, 21 e 28 cm de altura de pastejo e testemunha sem pastejo.

A análise da Figura 1 mostra a redução gradativa do IHO a partir do tratamento 28 cm, o qual não é diferente da testemunha, em direção ao tratamento 7 cm. Estes resultados mostram que o pisoteio excessivo dos animais pode resultar numa perda da qualidade física do solo. No tratamento 7 cm, a degradação física do solo é muito elevada e certamente predispõe as raízes das culturas a estresses de resistência com o secamento do solo e de aeração sob condições prolongadas de elevados teores de água no solo. Ressalta-se que a disponibilidade de água entre a CC e PMP não sofre variação entre os tratamentos, mas os tratamentos com reduzida altura de corte das forrageiras podem impor restrições de aeração e resistência à penetração dentro desses limites de disponibilidade de água.

A degradação física e estrutural do solo no tratamento 7 cm indica a necessidade de se estabelecer um limite mínimo de oferta de forragem de inverno sob pastejo em sistema de integração lavoura-pecuária. No tratamento com reduzida lotação animal, correspondente ao tratamento 28 cm, verifica-se melhoria na qualidade física do solo na camada superficial em relação ao tratamento 7 cm, não promovendo alterações físicas que comprometesse a qualidade física do solo. Além disso, é possível que o sistema radicular fino e abundante da cultura do azevém tenha contribuído para a manutenção e recuperação da qualidade estrutural do solo, que eventualmente sofreu alguma degradação pelo trânsito dos animais.

Na camada de 7,5-15 cm, tanto θ_{CC} como θ_{PA} determinaram o limite superior do IHO, sendo que com o aumento da D_s a θ_{PA} substitui a θ_{CC} como limite superior do IHO. Os valores de D_s , em que θ_{PA} substitui a θ_{CC} como limite inferior, variam entre 1,25-1,27 Mg m⁻³ entre os diferentes tratamentos. Nessa camada, é provável que os efeitos do pisoteio animal não tenham contribuído diretamente para alterar as propriedades físicas do solo, uma vez que a faixa de valores de D_s é similar entre os tratamentos. No tratamento 7 cm, a forte redução do IHO nesta profundidade pode estar relacionada com a menor resiliência do solo devido o menor crescimento radicular das forrageiras de inverno e da menor área foliar estabelecida pelo frequente consumo das mesmas pelos animais, com

impactos nos ciclos de secagem e umedecimento do solo. A compactação do solo depende da pressão aplicada e da intensidade do pisoteio: como os animais se deslocam mais com menor oferta de forragem, há maior pisoteio nessa condição. A palha que cobre o solo atenua a pressão aplicada instantaneamente sobre o solo na proporção direta de sua quantidade, dissipando parte da energia de compactação (BRAIDA, 2006), de modo que o controle da altura de pastejo constitui-se num elemento chave para o manejo das áreas sob SILP. No entanto, pode-se verificar que nos tratamentos 21 e 28 cm há uma redução da Ds (Figura 1), bem como do teor de água do solo em que a RP atinge o valor crítico. As razões para o comportamento físico do solo diferenciado, nesses tratamentos, podem estar relacionadas a uma melhoria da atividade biológica via maior atividade e crescimento das raízes da cultura da aveia e, posteriormente do azevém associados às diferenças de ciclo vegetativo entre as duas culturas. Alturas de pastejo que permitam manter níveis foliares compatíveis com altas taxas de fotossíntese parecem ser importantes para a renovação e conseqüente manutenção e desenvolvimento do sistema radicular.

A maior amplitude do IHO nos tratamentos 21 e 28 cm em relação à testemunha indica que a integração lavoura-pecuária cria um ambiente físico positivo no solo desde que a lotação animal seja adequada. Nesses tratamentos, o maior valor do IHO no perfil amostrado, possibilita menores riscos de estresses de natureza física nesse solo em função das variações na disponibilidade de água durante o ciclo da cultura. Os valores de Dsc para os tratamentos de 7, 14, 21, 28 cm e testemunha apresentaram, respectivamente, valores de 1,24, 1,27, 1,25, 1,25 e 1,26 Mg m⁻³ na camada de 0-7,5 cm de profundidade e de 1,29 Mg m⁻³ para os tratamentos 7, 14 e 21 cm e 1,30 Mg m⁻³ para os tratamentos 28 cm e testemunha na camada de 7,5-15 cm. Esses valores de densidade crítica são superiores aos obtidos por Tormena et al. (1999) em um Latossolo com textura similar mas com mineralogia e teor de matéria orgânica diferentes.

Quanto menor o valor de Dsc aumenta-se as possibilidades em que a densidade do solo atinja valores maiores que este, sugerindo uma maior frequência de condições físicas impeditivas às plantas. Neste sentido, o

tratamento 7 cm promoveu uma redução importante no valor da Dsc, indicando os impactos estruturais decorrentes do pisoteio dos animais e do manejo, além da menor capacidade de recuperação da massa da parte aérea e do sistema radicular das plantas. As proporções de amostras com $D_s > D_{sc}$ são apresentadas na Figura 2. Verifica-se que ocorre redução progressiva da proporção de amostras com valores de $D_s > D_{sc}$ do tratamento 7 cm em direção à testemunha (Figura 2).

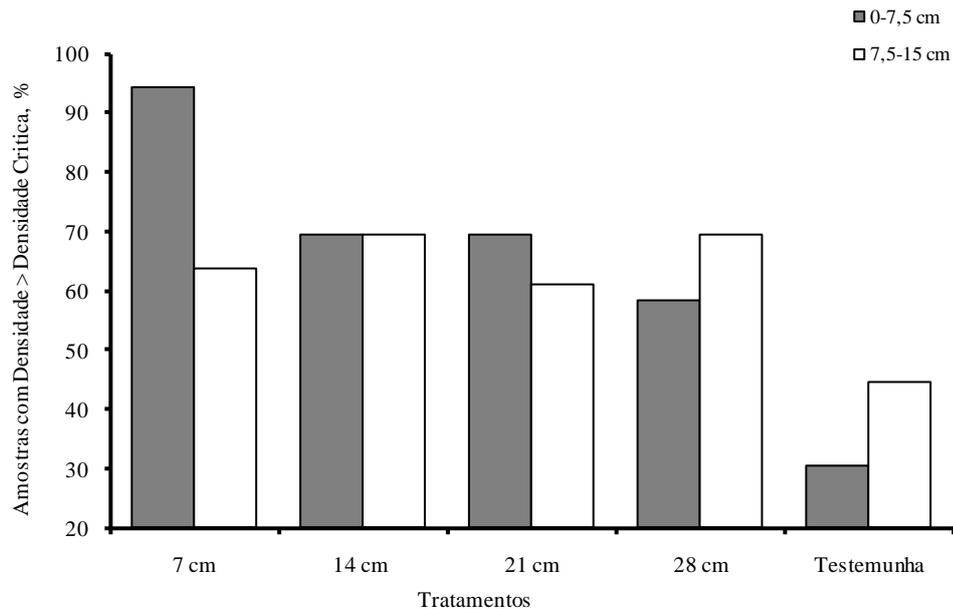


Figura 2 – Percentagem das amostras com densidade do solo maior do que a densidade do solo crítica. Nas camadas de 0–7,5 e 7,5–15 cm de profundidade e nos tratamentos com 7, 14, 21 e 28 cm de altura de pastejo e testemunha sem pastejo.

Entre os tratamentos com pastejo, o tratamento 28 cm apresenta as menores proporções de $D_s > D_{sc}$, mas ainda com elevação substancial em relação à testemunha. A frequência de amostras com $D_s > D_{sc}$ é elevada nos solos com pastejo no inverno, sendo que a proporção de $D_s > D_{sc}$ em todos os tratamentos observados é superior aos valores encontrados por Tormena et al. (2007) em um Latossolo Vermelho distroférico de mesma classe textural, sob sistemas de manejo de sucessão e rotação. Esses resultados apontam para a necessidade de controle rigoroso de entrada de animais na área sob pastejo, especialmente quando sob condições de umidade do solo favorecem a compactação, possibilitando a ocorrência da compactação do solo pelos cascos

dos animais. Este é um dos requisitos fundamentais para um acompanhamento criterioso da qualidade física dos solos sob SILP. Na camada de 7,5-15 cm, a distribuição das proporções de amostras com $D_s > D_{sc}$ não mostra um comportamento sistemático ligado à compactação pelo pisoteio animal, ainda que a testemunha apresente elevada percentagem de amostras com $D_s > D_{sc}$.

Esses resultados dão suporte à afirmação de que a compactação pelo trânsito de bovinos ocorre concentrada na camada superficial. O pisoteio animal exerce elevada pressão devido à distribuição de seu peso em uma pequena área do casco (WILLATT e PULLAR, 1983), sendo essa pressão o agente causador da compactação, concentrando-se nas camadas mais superficiais, até 5,0 cm de profundidade (MORAES e LUSTOSA, 1997; SALTON et al., 2002). Por outro lado, as máquinas agrícolas exercem pressão diferenciada sobre o solo, pois seu peso é distribuído em uma área maior, sendo causadora de compactação subsuperficial relacionada à carga total aplicada por eixo (HAMZA e ANDERSON, 2005). Neste estudo, a resistência à penetração foi o fator que assumiu maior importância na redução do IHO. O estabelecimento de níveis críticos das propriedades físicas do solo para o crescimento das plantas é bastante complexo e, de certa forma até subjetivo, pois envolve a integração de variáveis relacionadas com o solo, clima e planta. Os valores para os limites críticos utilizados no cálculo do IHO foram obtidos da literatura, como indicado em Silva et al. (1994), Topp et al. (1994) e Tormena et al. (1998, 1999).

3.4. CONCLUSÕES

- a) O IHO é reduzido com o aumento da densidade;
- b) No tratamento com 7 cm, a degradação física do solo é muita elevada na camada superficial, e certamente predispõe as culturas a estresses de resistência sob baixa umidade do solo e de aeração sob condições prolongadas de elevada umidade do solo;
- c) Ocorreu redução progressiva da proporção de amostras com valores de densidade do solo maior que a densidade do solo crítica do tratamento 7 cm

para a testemunha, indicando que o pisoteio excessivo dos animais resulta numa perda da qualidade física do solo na camada de 0-7,5 cm daquele tratamento;

d) Para manter uma qualidade física do solo, manejado sob pastejo da aveia + azevém no inverno, a altura de pastejo deve ser mantida acima de 21cm.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIM, J.M. **Produção e utilização de forrageiras de inverno: aveia e azevém.** Coronel Pacheco: EMBRAPA Gado Leiteiro, 1989. 28p. (Embrapa Gado Leiteiro. Documentos, 42).

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-34, 2004.

BALPH, D.F.; MALECHECK, J.C. Cattle trampling of crested wheat-grass under short-duration grazing. **Journal of Range Management**, Arizona, v. 38, n. 3, p. 226-227, 1985

BENJAMIN, J.G.; NIELSON, D.C.; VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, n.1,p.137-148, 2003.

BETZ, D.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.62, n.5, p.1384-1393, 1998.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. A.; M. V.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v.30, n.4, p. 605-614, 2006.

BOONE, F.R. Wheater and other enviromental factors influencing crop responses to tillage and traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3, p.283-324, 1988.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transaction of American Society Agricultural Engineering**. St Joseph, V. 3, n.2, p.519-524, 1990.

CARDOSO, R.R.; CARVALHO, P.C.F.; CARASSAI, I.J.; FLORES, J.P.C.; NABINGER, C.; FREITAS, F.K.; MACARI, S.; TREIN, C.R. & SILVA, T. **O manejo do pastejo e seu impacto nos atributos físicos de um argissolo vermelho em integração lavoura-pecuária.** In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL EM INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA, 2007, Curitiba, PR. Anais... Curitiba: UFPR, 2007. CD-ROM.

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.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L.; SILVA, F.R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária, **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p. 235-244, 2009

DANE, J.H. & HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 2002. Part 4. p.688-690.

EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in the tilled an untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, n.3, p.261-275, 1983

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; CECATO, U.; BARBERO, L. M.; LUGÃO, S.M.B. & COSTA, M.A.T. Qualidade física do solo em pastagem adubada e sob pastejo contínuo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, V.43, n11, p.1583-1590, 2008.

FLORES, J.P.C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L.C.; CARVALHO, P.C.F.; LEITE, J.G.D.B ; FRAGA, T.I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.771-780, 2007.

FONTANELI, R.S.; FREIRE JR, N. Avaliação de consorciações de aveia e azevém-anual com leguminosas de estação fria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.5, p.623-630,1991.

GLINSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton: CRC Press, 1990. 248p.

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, n. 1, p. 180-186, 1968.

HADAS, A. Soil tilth: the desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, n.1, p.7-40,1997.

HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.95-158, 1985.

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.1, p.121-145, 2005.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; DIAS JR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

KARLEN, D.L.; STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: **Soil Science Society of America/American Society of Agronomy**, 1994. p.53-72. (Special publication, 35).

KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; VAN OUYWERKERK, C. (Eds.). Soil compaction in crop production. Amsterdam: **Elsevier Science**, 1994. p.23-44.

LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R. da S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.1131-1140, 2007.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.1, p.151-170, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, n.4, p.1210-1215, 2005.

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

LEWIS, C.E. Simulated cattle injury to planted slash pine: combination of defoliation, browsing and trampling. **Journal of Range Management**, Lakewood, v.33, n.1 p.340-345, 1980.

MAPFUMO, E. et al. Soil compaction under grazing of annual and perennial forages. **Canadian Journal of Soil Science** Ottawa, v.79, n.1, p.191-199, 1999.

MARCHÃO, R.L. **Integração lavoura-pecuária num Latossolo do cerrado: impacto na física, matéria orgânica e macrofauna**. 2007. 153p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

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

MOTT, G.O., LUCAS, H.L. **The desing, conduct, and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures**. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 6, 1952, Pennsylvania. Proceedings... Pennsylvania: State College Press, 1952. p.1380-1385.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.12, n2. P.211-16, 1988.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 29-48, 2003.

RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J. F.; BRUAND, A.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, Oxônia, v.52, n.1,p.49-58, 2001.

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W. & DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. Methods of soil analysis: Physical methods. Madison, **Soil Science Society of America/American Society of Agronomy**, 2002. Part 4. p.692-698.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to dryneess. **Soil Science. Society of American Journal**, Madison, v.55, n.4, p.923-927, 1991

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

SAS INSTITUTE. **Statistical Analysis System User's Guide: statistics**. Cary: SAS Inst. Inc., 1986. 584p.

SAS INSTITUTE. SAS/STAT procedure guide for personal computers. 5.ed.Cary, 1999.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soilwater availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.4, p.644-651, 1996.

SCHOLEFIELD, D.; PATTO, P.M.; HALL, D.M. Laboratory research on the compressibility of four topsoils from grassland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.6 n.1., p.1-16, 1985.

SHARMA, P.K.; BHUSHAN, L. Physical characterization of a soil amended with organic residues in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. **Soil Tillage Research**, Amsterdam v. 60, n.1., p.143-152, 2001

SILVA, A.P.; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant Soil**, Dordrecht, v.184, n.2 p.323-329, 1996.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775 -1781, 1994.

SILVA, A. P. ; KAY, B. D.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. C.; Least Limiting Water Range of Soils. In: LAL, Rattan. (Org.). **Encyclopedia of Soil Science**. New York: , 2006, v. 1, p. 1026-1029.

SOEHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, St. Joseph,v.39, n.5, p.276-281, 1958.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOM, G.O. Integração lavoura e pecuária e os atributos físicos de solo manejado sob sistema plantio direto, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.1, p.129-136, 2009.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B.C. **Effects of compaction on soil aeration properties**. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. (Eds.). Soil compaction in crop production. Amsterdam: **Elsevier Science**, 1994. p.167-190.

STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 185, n. 1, p. 151-162, 1996.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction: Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.30, n.2/4, p.217-243, 1994.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JR, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.102, n.1, p.18-22, 1966.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Soil Quality Evaluation Program. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36p. (Technical report, 2)

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo potencial de água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.86-292, 1999.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

WEAICH K.; CASS, A.; BRISTOW, K.L. Pre-emergent growth of maize (*Zea mays* L.) as a function of soil strength. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.40, n.1, p.3-23,1996.

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

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the no limiting water range. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, n.3, p.401-414, 2003.

XU, X.; NIEBER, J.L. & GUPTA, S.C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.56, n.6, p.1743-1750, 1992.

4. CAPÍTULO 2

MONITORAMENTO DA COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA DURANTE CINCO ANOS

RESUMO: Em um sistema de integração lavoura-pecuária (SILP), o manejo deve ser realizado de forma que uma atividade não prejudique a outra. O pisoteio do solo na área pastejada pode promover a redução da qualidade física na camada superficial. O objetivo deste trabalho foi avaliar durante cinco anos as variações dos valores da Ds e macroporosidade em um Latossolo Vermelho distroférico sob SILP para monitorar a compactação do solo. O experimento foi realizado em um sistema de integração lavoura-pecuária implantado em 2002 em uma área de 8 ha na Fazenda Experimental da COAMO – Cooperativa Agroindustrial, no município de Campo Mourão, Paraná, conduzido com a semeadura direta de soja ou milho no verão e consórcio de aveia mais azevém no inverno. Foi utilizado o método de pastejo contínuo com a técnica de “put and take”. Os tratamentos foram determinados pelos níveis de intensidade de pastejo: T0 - área não pastejada disposta em área total de 0,08 ha; T1 - forragem mantida em 7 cm de altura de pastejo, com taxa de lotação de 2,44 unidade animal por hectare (UA ha⁻¹) em uma área total de 1,02 ha; T2 - forragem mantida em 14 cm de altura de pastejo e lotação de 2,61 UA ha⁻¹, em uma área de 1,6 ha; T3 - forragem mantida em 21 cm de altura de pastejo, lotação de 2,25 UA ha⁻¹ e área de 2,16 ha; T4 - forragem mantida em 28 cm de altura de pastejo, taxa de lotação de 1,82 UA ha⁻¹ e área de 3,3 ha. Foram avaliadas a densidade e a macroporosidade nas camadas de 0-7,5 e 7,5-15 cm de profundidade em oito épocas diferentes ao longo de cinco anos. Os resultados indicam aumento gradual nos valores médios de Ds, evidenciando compactação do solo no SILP. Sob maior intensidade de pastejo (T1) verificou-se maior densidade do solo na primeira avaliação, devido à maior compactação do solo causado por maior pisoteio animal. A variação dos valores

de Ds foi semelhante ao tratamento T2, no qual se observou uma redução e aumento da Ds intercalados ao longo das épocas. No tratamento T0 os valores de Ds para a camada de 7,5-15 cm não apresentaram diferença estatística quanto às épocas; exceto o período de março de 2009 e 2010 com outubro de 2009, possivelmente pelas condições de precipitação pluviométrica. A macroporosidade foi reduzida com o incremento da Ds. Os resultados mostram ocorre uma flutuação temporal nos valores de macroporosidade. Os resultados indicam uma maior variabilidade de Ds e macroporosidade nos tratamentos T1 e T2 relacionados aos efeitos do pastejo intenso e maior participação da cultura do azevém nestes tratamentos. A redução de Ds e aumento da macroporosidade ao longo dos anos podem ser explicados pela regeneração do sistema radicular e que nessa área ocorre uma menor supressão do azevém pela aveia, garantindo a maior resiliência (capacidade de um solo recuperar sua integridade funcional e estrutural após um distúrbio ou estresse externo (antrópico) ao sistema (LAL, 1997; SEYBOLD et al., 1999). do solo nestes tratamentos.

Palavras-chaves: densidade do solo, macroporosidade, compactação.

SOIL COMPACTION MONITORING A OXISOL IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK FOR FIVE YEARS

ABSTRACT: In a system of crop-livestock integration (SCLI), the management should be conducted in a manner that is not detrimental to other activities. The trampling of the soil in the grazed area may decrease the physical quality in the surface layer. The aim of this study was to monitor the soil compaction during five years by Ds and macroporosity values in an Oxisol under SCLI. The experiment was conducted in an integrated crop-livestock system implemented in 2002 in an area of 8 ha in the Experimental Farm COAMO - Cooperativa Agroindustrial, in Campo Mourão, Paraná, conducted with the direct seeding of soybeans or corn in summer and oat plus ryegrass in winter. It was We used the

method of continuous grazing with the technique of "put and take. The treatments were determined by levels of grazing intensity: T0 - not grazed area prepared in total area of 0.08 ha; T1 - Forage maintained at 7 cm m height of grazing with stocking rate of 2.44 animal unit per hectare (ha AU^{-1}) in a total area of 1.02 ha, T2 - Forage maintained at 14 cm in height and grazing capacity of 2.61 AU ha^{-1} in an area of 1.6 ha T3 - Forage maintained at 21 cm height of grazing, stocking rate of 2.25 AU ha^{-1} and area of 2.16 ha, T4 - Forage maintained at 28 cm height of grazing, stocking rate of 1.82 AU ha^{-1} and area of 3.3 ha. The results indicate a gradual increase in mean Ds, indicating soil compaction in no-tillage system. Under grazing intensity (T1) showed higher density in the initial evaluation, due to increased soil compaction caused by cattle trampling increased. The variation of Ds was similar to T2, where there is a reduction and increase of Ds interspersed throughout the ages. In the treatment T0 values of Ds for the 7.5-15cm layer showed no statistical difference in the times except the period from March 2010 through October 2009 and 2009, possibly due to climate conditions and precipitation. The macroporosity was reduced with increasing Ds. The results show there is a temporal fluctuation in the values of macroporosity influenced by Ds. The data indicate a greater variability of Ds and macroporosity in T1 and T2 announced to the effects of intense grazing and greater involvement of the ryegrass crop in these treatments. The reduction of Ds and increased macroporosity over the years can be explained by regeneration of the root system and that this area is less suppression of ryegrass by oats, ensuring greater resilience (ability of a soil to recover its functional and structural integrity after a disturbance or external stress (anthropogenic) to the system (LAL 1997, Seybold et al., 1999).of the soil in these treatments.

Keywords: bulk density, macroporosity, soil compaction.

4.1. INTRODUÇÃO

Em um sistema de integração lavoura-pecuária (SILP), com a semeadura de culturas destinadas a produção de grãos no verão e de forragem para o pastejo do gado no inverno, o manejo deve ser realizado de forma adequada, para que uma atividade não prejudique a outra (CONTE et al., 2007). Os animais exercem efeitos diretos e indiretos tanto sobre a forragem quanto sobre o solo. Segundo Scholefield et al. (1985), as altas pressões aplicadas ao terreno pelos cascos dos animais em pastejo tendem a danificar a vegetação e deformar o solo sendo que a intensidade desses efeitos é determinada, principalmente, pela quantidade de pisoteio (número de animais e caminhar do rebanho), classe de solo e seu teor de água. Assim a área pastejada sofre compactação do solo, diminuindo a qualidade física na camada superficial e concorrendo para a redução da produtividade e longevidade da pastagem (IMHOFF et al., 2000) . A compactação ocorre quando há uma redução do volume de solo devido a aplicação de uma pressão externa ao solo (HAKANSSON e VOOHERS, 1998), que em área de pastagem pode ser agravada por uma intensidade maior de pastejo (BERTOL et al., 2000) umidade elevada e com baixa cobertura vegetal. Uma maior carga aplicada ao solo pode comprometer a qualidade física do mesmo (SILVA et al., 2003), principalmente na camada superficial do solo em razão do aumento da densidade dele (Ds) e da redução da porosidade (IMHOFF et al., 2000; GIAROLA et al., 2007). Assim, é importante controlar as taxas de lotação animal em relação à oferta de forragem garantindo uma cobertura vegetal adequada sobre os solos, e minimizar os efeitos do pisoteio sobre a qualidade física dos deles (SILVA et al., 2003).

No processo de compactação, o volume do solo é reduzido, principalmente, à custa do ar, que é expelido ou pode ser comprimido. A porosidade e a permeabilidade do solo diminuem, e a resistência à deformação

aumenta (SOANE e OUWERKERK, 1994). Com a redução no volume de macroporos resultante da compactação (KOOLEN, 1994), o solo compactado pode apresentar aeração insuficiente, prejudicando raízes em crescimento, causar a produção de compostos nocivos às plantas, como o etileno, ou gerar perda de nitrogênio por desnitrificação (STEPNIEWSKI et al., 1994)

Um dos indicadores de compactação mais usualmente utilizados e mais fáceis de serem avaliados é a densidade do solo (GREENWOOD e MCKENZIE, 2001), porém a D_s isoladamente não é um bom indicador da qualidade física do solo. Neste contexto um melhor indicador da qualidade física do solo e da real limitação ao crescimento imposto as plantas é o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) (TORMENA et al., 1998a). Com o aumento da D_s ocorre redução do IHO (TORMENA et al., 1999; IMHOFF et al., 2001) indicando que as condições físicas do solo vão se tornando limitantes às plantas. Um limite de D_s no solo pode ser estabelecido quando o $IHO = 0$ (SILVA et al., 1994), indicando condições físicas do solo severamente limitantes. O valor de densidade do solo em que o IHO se iguala à zero ($IHO=0$) é definido como densidade do solo crítica (D_{sc}) e indica que, a partir dessa densidade, as condições físicas são altamente restritivas para o crescimento radicular (WU et al. 2003). Petean et al. (2010) avaliando o IHO de um solo sob integração lavoura-pecuária determinou os valores de D_{sc} de 1,24, 1,27, 1,25, 1,25 e 1,26 $Mg\ m^{-3}$ na camada de 0-7,5 cm, respectivamente para os tratamentos com 7, 14, 21, 28 cm de altura pastejo da forragem e um tratamento sem pastejo, evidenciando a necessidade de monitoramento da densidade, neste sistema de manejo, de modo que a D_{sc} pode ser utilizada como referência para decisões nas condições de manejo a serem adotadas no solo. Como estratégia de avaliação da qualidade física do solo, o limite inferior e superior do IHO devem ser considerados, pois as condições de umidade ideais para o desenvolvimento e crescimento das plantas ocorrem entre limites do IHO. A hipótese desse trabalho é de que os tratamentos com maior intensidade de pastejo proporcionam maior frequência de $D_s > D_{sc}$ e que resultam em redução da macroporosidade do solo. Os objetivos foram avaliar a D_s e a macroporosidade num SILP avaliado por Petean et al. (2010) e utilizar a

Dsc e um valor de 10% de macroporos como referência para monitorar a qualidade física do solo.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em um sistema de integração lavoura-pecuária, implantado em 2002 em uma área de 8 ha na Fazenda Experimental da COAMO – Cooperativa Agroindustrial, no município de Campo Mourão, Paraná, situado a 24° 02' 38" de latitude Sul e 52° 22' 40" de longitude Oeste. A região apresenta, segundo a classificação de Köppen, tipo climático subtropical úmido mesotérmico, Cfa, sendo que as médias anuais de temperatura e precipitação são de 20°C e 1340 mm, respectivamente. Os valores médios mensais de precipitação no período do estudo estão apresentados na Figura 1. O solo da área do presente estudo é identificado como Latossolo Vermelho distroférico (Embrapa, 2006), apresentando valores médios de 870, 92 e 38 g kg⁻¹ de argila, silte e areia na camada de 0–0,20 m segundo análise granulométrica.

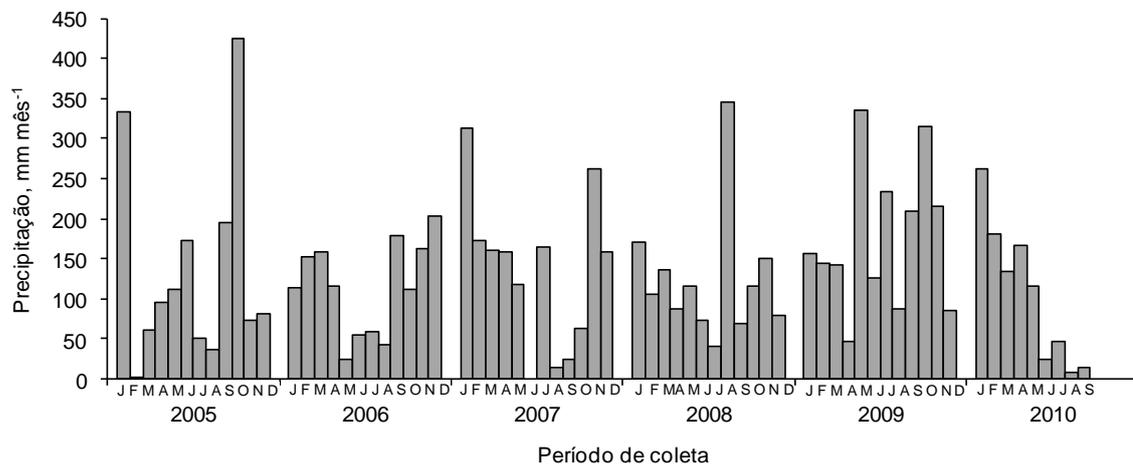


Figura 1 Valores médios mensais de precipitação pluviométrica durante o período do estudo.

O experimento foi conduzido com a semeadura direta de soja ou milho no verão e consórcio de aveia mais azevém no inverno. Foi utilizado o método de

pastejo contínuo com a técnica de “put and take” (MOOT e LUCAS, 1952). Em cada unidade experimental permaneceram dois animais “testers” e um número variável de animais reguladores, utilizados de forma a se manter as diferentes alturas da pastagem em cada nível de manejo.

Os tratamentos foram determinados de acordo com os níveis de pastejo de aveia mais azevém, sendo determinado por: T0 - área não pastejada disposta em área total de 0,08 ha; T1 - forragem mantida em 0,07 m de altura de pastejo, com taxa de lotação de 2,44 unidades animal por hectare (UA ha⁻¹) em uma área total de 1,02 ha; T2 - forragem mantida em 0,14 m de altura de pastejo e lotação de 2,61 UA ha⁻¹, em uma área de 1,6 ha; T3 - forragem mantida em 0,21 m de altura de pastejo, lotação de 2,25 UA ha⁻¹ e área de 2,16 ha; T4 - forragem mantida em 0,28 m de altura de pastejo, taxa de lotação de 1,82 UA ha⁻¹ e área de 3,3 ha. Os tratamentos foram delimitados com cerca elétrica e a altura da pastagem foi monitorada semanalmente durante o período de 120 dias em função dos níveis de pastejo adotados.

Para avaliação do efeito temporal na Ds e macroporosidade, nos tratamentos, foram realizadas coletas indeformadas de solo em cada tratamento, nas camadas de 0-7,5 e 7,5-15 cm de profundidade em oito épocas diferentes para a Ds e sete épocas para a macroporosidade, ao longo de cinco anos, onde em cada época retirou-se um número variável de amostras para monitoramento da Ds e macroporosidade. As amostras foram feitas em: novembro de 2005 (36 amostras por camada); março de 2006 (20 amostras por camada); março de 2007 (20 amostras por camada); novembro de 2007 (36 amostras por camada); outubro de 2008 (10 amostras por camada); março de 2009 (36 amostras por camada); outubro de 2009 (36 amostras por camada) e março de 2010 (20 amostras por camada). A macroporosidade não foi determinada para a época de março de 2009.

As amostras foram coletadas em cilindros de aço inox com cerca de 100 cm³ de volume, sendo estes introduzidos no solo com ajuda de um amostrador utilizando um macaco hidráulico para a introdução lenta do conjunto (amostrador e cilindro) no solo para evitar a deformação do solo durante a coleta das

amostras. Após a retirada do cilindro do solo, a amostra foi enrolada com papel alumínio para evitar evaporação. Para todas as épocas o procedimento de amostragem foi idêntico, afim de não ocorrer variações nos resultados decorrentes do método de amostragem.

Posteriormente, as amostras foram saturadas em bandejas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de dois terços da altura da amostra, durante 24 horas. Após a saturação, as amostras foram pesadas e submetidas a uma tensão de 60 hPa utilizando uma mesa de tensão (BALL e HUNTER, 1988). Ao atingir o equilíbrio hidráulico, as amostras tiveram os pesos novamente anotados e levadas a estufa por 24 horas a 105 °C, para determinação da densidade do solo (BLAKE e HARTGE, 1986). O teor de água do solo após equilíbrio na tensão de 60 hPa, foi considerado equivalente à microporosidade do solo e a macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e o teor de água na tensão de 60 hPa. A porosidade total foi determinada pela equação $P_t = 1 - D_s/D_p$, em que P_t = Porosidade total, em $m^3 m^{-3}$; D_s = Densidade do solo, em $Mg m^{-3}$; D_p = Densidade de partículas, em $Mg m^{-3}$, calculado pelo método do balão volumétrico conforme EMBRAPA (1997), foi obtido um valor médio de $2,85 Mg m^{-3}$.

A densidade de solo crítica (D_{sc}) foi a estabelecida a partir da obtenção do IHO por Petean et al. (2010), apresentadas no capítulo I.

Como critério estatístico para distinção dos efeitos dos tratamentos na D_s e macroporosidade foi utilizado o intervalo de confiança da média a 95% ($P < 0,05$). Quando houve sobreposição dos limites superior e inferior do intervalo de confiança considera-se que não há diferenças significativas entre os tratamentos conforme Payton et al. (2000).

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios \pm intervalo de confiança das densidades do solo nas camadas de 0-7,5 cm e 7,5-15 cm dos diferentes tratamentos de pastejo estão apresentados na Figura 2. Os tratamentos com pastejo apresentaram variação na

Ds, durante as coletas, na camada de 0-7,5 cm evidenciando o efeito do pisoteio animal quando comparado com a testemunha (T0), estando em acordo com Greenwood et al. (1997) e Bertol et al. (2000) . Na amostragem realizada em novembro de 2005, logo após o pastejo, verificou-se que com exceção da testemunha (T0) todos os tratamentos apresentaram Ds média acima do valor de Ds crítica. A compactação do solo, portanto, é verificada com a maior intensidade de pastejo ocorrida nos tratamentos com menor altura de forragem, uma vez que estes apresentam maior probabilidade de ocorrer pisoteio no mesmo local, promovendo um acréscimo na Ds (AZENEGASHE et al., 1997). As indicações são que o efeito do pisoteio concentra-se na camada superficial em acordo com (LANZANOVA et al., 2007). De acordo com Imhoff et al. (2000) esse incremento da densidade do solo é influenciado pelo tipo e idade da forragem, taxa de lotação utilizada, umidade e textura do solo ao longo do pastejo. Em estudos com períodos curtos e com lotação muito elevado Trein et. al. (1991) observou que o efeito da compactação pelo pisoteio animal concentrava-se em 7,5 cm superficiais do solo.

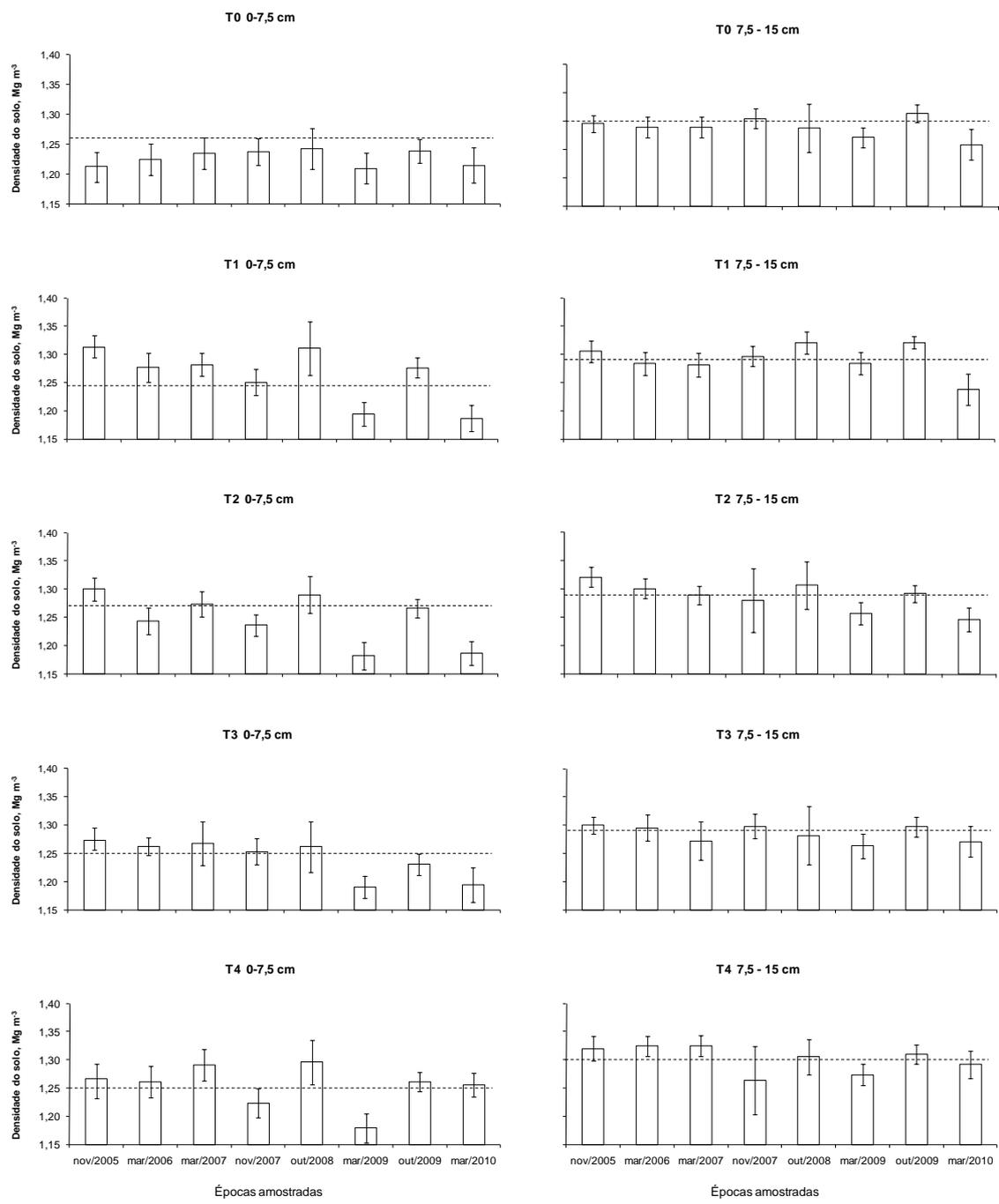


Figura 2 - Valores médios e intervalos de confiança da média para a densidade do solo nas camadas de 0-7,5cm e 7,5-15 cm de profundidade, para os tratamentos de níveis de pastejo T0, T1,T2,T3 e T4. A linha tracejada refere-se aos valores de densidade crítica para cada tratamento e profundidade.

Na camada de 7,5-15 cm, os valores médios de Ds são maiores do que na camada de 0-7,5 cm, sugerindo que estes valores decorrem de compactação pretérita do solo (TORMENA et al., 1998a), não havendo influência do pisoteio dos animais nesta camada. Isto pode ser evidenciado pelos valores de Ds no

tratamento sem pastejo que estão acima da Ds crítica, ao longo do período de coleta. No solo sem pastejo, as variações de Ds são pequenas entre as épocas amostradas, demonstrado pela ausência de diferença estatística entre as épocas analisadas, em ambas as camadas amostradas. A Ds em Outubro de 2009 na camada de 7,5-15 cm foi maior do que em Março de 2009 e Março de 2010, provavelmente pelo fato que o inverno foi mais chuvoso em 2009 (Figura 1).

O tratamento T1 apresenta menor altura de pastejo da forragem, de modo que neste tratamento verifica-se a maior densidade do solo na primeira amostragem, devido à maior compactação do solo causado por intenso pisoteio animal. No tratamento T2 a variação dos valores de Ds foi semelhante ao tratamento T1, observando-se uma redução e aumento da Ds intercalados ao longo das épocas, principalmente no final do período experimental. Tal fato pode ser dar a condição das forrageiras que nos tratamentos com maior intensidade de pastejo ocorre maior regeneração das plantas de azevém que contribuem para a resiliência do solo associado aos ciclos de secagem e umedecimento mais intensos devido a intensiva renovação foliar e perfilhamento. A maior capacidade de regeneração do azevém após o pastejo ocorre pelo fato de que se verificou a substituição completa da cultura da aveia pela do azevém ao final do período de pastejo, nestes tratamentos e ao fato de que se procedeu à retirada dos animais em pastejo cerca de 20-30 dias antes da dessecação. O efeito de descompactação do solo pela ação biológica das raízes da pastagem cultivada e pela atividade da mesofauna do solo também foi observado por Moraes e Lustosa (1997).

Na camada de 7,5-15 cm os valores de Ds são maiores que na primeira camada analisada para todos os tratamentos em todas as épocas. No tratamento T0 os valores de Ds para essa camada não apresentaram diferença estatística quanto às épocas exceto entre o período de março de 2009 e março 2010 com outubro de 2009, possivelmente pelas condições de clima e precipitação.

No período de outubro de 2008, na camada de 0,7,5 cm constata-se um dos maiores valores médios de Ds, o que pode ser explicado pela maior precipitação pluviométrica entre os períodos (Figura 1) , em que o gado pasteja

no solo com maior quantidade de água, promovendo com isso maior compactação do solo, em concordância com Trein et al. (1991) e Bertol et al. (2000). Vizzotto et al. (2000) também observou que o excesso de água em períodos prolongados de pastejo pode contribuir com a compactação do solo.

O tratamento T3, de forma geral, apresentou valores mais baixos de Ds na camada de 0-7,5 cm comparado ao tratamento T1 e T2, o que pode ser devido a maior altura de corte da forragem, ou maior massa residual de forragem o que proporciona um amortecimento do impacto do pisoteio animal. A variação temporal da Ds em T3 apresenta, menor variabilidade dos valores de Ds comparado com o tratamento T2, evidenciando o efeito de uma maior quantidade de forragem. Assim, entre as épocas amostradas analisadas não se verificaram diferenças estatisticamente significativa, exceto no período de 2009 que apresentou Ds superior a Março de 2009 e não diferindo apenas de março de 2010. Para esse tratamento, na amostragem de Outubro de 2009 houve um decréscimo do valor médio de Ds, o que também aconteceu para os tratamentos T0, T1, T2 e T4. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que esse período, de Outubro de 2008 à Março de 2009, houve maior disponibilidade hídrica (Figura 1), gerando uma melhor condição ao estabelecimento e crescimento das plantas, tanto na parte aérea quanto das raízes, proporcionando redução da compactação do solo, via regeneração das plantas no período entre o pastejo e a semeadura da soja.

O tratamento T4 também apresentou uma maior quantidade de forragem, sendo esta quase que equivalente ao tratamento T0, no qual não houve o pastejo das forragens e pisoteio pelos animais. Entretanto por apresentar uma maior altura das plantas e em sua totalidade de plantas de aveia, ocorreu a supressão das plantas de azevém. Esta condição afetou a reestruturação física do solo promovido pelo sistema radicular fino e agressivo do azevém. A supressão da aveia ao azevém ocorre devido ao estabelecimento das plantas de aveia antes do azevém e o fato de não serem pastejadas impede que o azevém receba uma melhor incidência de luz e, portanto, reduziu a sua quantidade neste tratamento. Apesar disso, O tratamento T4 apresentou um comportamento semelhante aos demais

tratamentos, em termos da de Ds ao longo dos períodos de amostragem. As épocas de amostragem de novembro de 2005 e março de 2006 diferem apenas da época de março de 2009. Em março de 2007 e outubro de 2008 o tratamento T4 apresentou um aumento da Ds, acima da Ds crítica. Esse acréscimo de Ds para o período de março de 2007 também foi observado nos demais tratamentos o que provavelmente aconteceu pelo efeito cumulativo do pisoteio animal e ainda pelo fato de menor precipitação em 2007 comparado à 2005, afetando assim o desenvolvimento da forragem, especialmente após o pastejo. Em novembro de 2007 a Ds voltou a diminuir, diferindo-se das épocas de março de 2007 e outubro de 2008, época a qual ocorre um acréscimo da Ds. Em outubro de 2009 ocorreu um acréscimo e posterior decréscimo nos valores de Ds, ainda que diferem apenas da época de março de 2009.

A densidade do solo em que as condições físicas são altamente restritivas para o crescimento radicular é definida como densidade crítica e dada pela densidade do solo em que o IHO é nulo. Assim, utilizando os valores de densidade crítica, obtidos por Petean et al. (2010), no mesmo solo, avaliando o IHO sob integração lavoura-pecuária podemos verificar se os valores da Ds estão acima ou iguais a Dsc na maior parte das épocas de amostragem. Os valores de Dsc obtidos por Petean et al. (2010) foram de 1,24, 1,27, 1,25, 1,25 e 1,26 Mg m⁻³ na camada de 0-7,5 cm, respectivamente para os tratamentos com 7, 14, 21, 28 cm de altura pastejo da forragem e tratamento sem pastejo; já na camada de 7,5-15 cm apresentou os valores de 1,29 Mg m⁻³ para os tratamentos de 7,14, e 21 cm e Dsc de 1,30 Mg M⁻³ para os tratamentos de 28 cm e testemunha sem pastejo. Esses valores indicam que o tratamento T0 não apresenta restrições ao crescimento das plantas na camada de 0-7,5 cm ao longo das épocas analisadas. Os valores de Ds para a camada de 7,5-15 cm apresentaram os maiores valores de Ds acima do limite crítico nas épocas de novembro de 2007 e outubro de 2009, dado provavelmente pelo manejo de máquinas e também pelo período mais chuvoso (úmido) comparado com as demais épocas. Somente as épocas de março de 2009 e março de 2010 apresentam valores abaixo da Ds crítica.

Na camada de 0-7,5 cm todos os demais tratamentos apresentam épocas com a Ds acima de Dsc (Figura 2) entretanto, essa proporção pode ser maior ou menor em função do tratamento. O tratamento T1 e T2 apresentam maior quantidade de épocas onde os limites de Dsc são superados, evidenciando os problemas de compactação causados pelo pisoteio animal. No entanto, no tratamento T2, verificou-se épocas em que houveram melhorias da condição do solo evidenciado pela redução da Ds abaixo do valor de Dsc estabelecidos por Petean et al. (2010). Esse tratamento apresentou melhor recuperação por ter obtido melhor estabelecimento do azevém em proporção à aveia dado pela não supressão do azevém e pelo rebrote do mesmo garantindo uma melhor reestruturação do solo. Já a camada de 7,5-15 cm não sofre influência do pisoteio animal, e dos efeitos das culturas, uma vez que apresenta quase que em sua totalidade valores de Ds maiores que a Dsc em todos os tratamentos e épocas analisadas, exceto março de 2010 em T0, T1, T2 e T3. Estes resultados indicam que há uma maior restrição, homogênea na área, para o crescimento radicular assim como disponibilidade de água e nutrientes as plantas, principalmente em períodos de estiagem ou menor distribuição de chuvas como o período de março de 2006 (Figura 1).

Os valores da proporção de amostras com Ds maior que Dsc é apresentado na Figura 3. Nesta condição, há uma maior possibilidade de concentração das raízes na camada de 0-7,5 cm, principalmente se ocorrer uma maior concentração de nutrientes nesta camada. Ressalta-se que as condições físicas são muito variáveis ao longo do tempo na camada de 0-7,5 cm, devido aos efeitos das raízes das plantas, mecanismos sulcadores das semeadoras, atividade biológica e maior intensidade dos ciclos de secagem e umedecimento nesta camada.

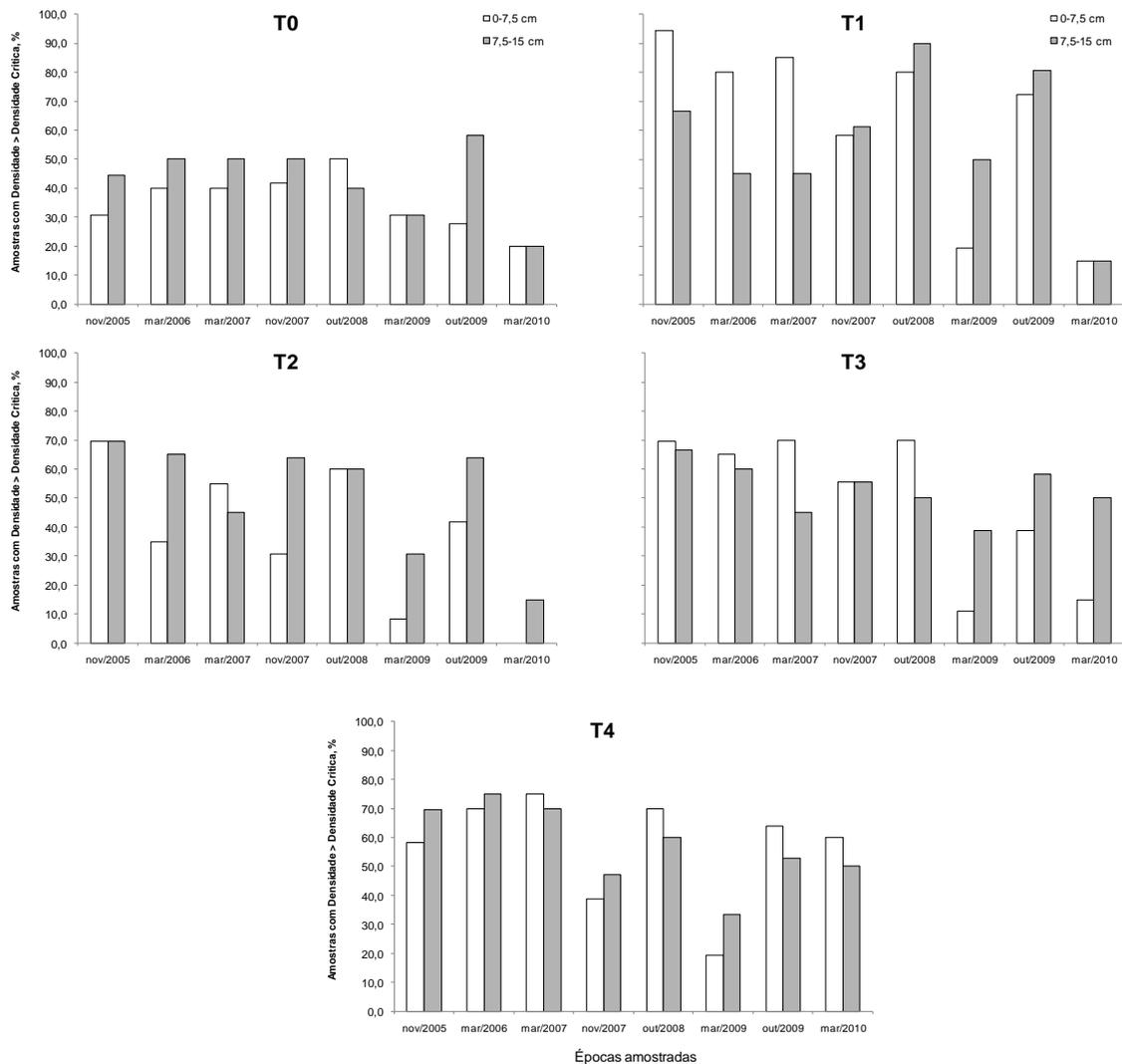


Figura 3 - Percentagem das amostras com densidade do solo maior do que a densidade do solo crítica nos tratamentos de T0,T1,T2,T3 e T4 para as camadas de 0-7,5 e 7,5-15 cm de profundidade , nas épocas analisadas.

De forma geral, o tratamento T0 apresentou uma menor percentagem de amostras com valores de $D_s > D_{sc}$ em relação aos outros tratamentos, tanto na camada de 0-7,5 cm como 7,5-15 cm até outubro de 2009. Mesmo não sofrendo influência do pisoteio animal ocorreu um aumento da D_s , provavelmente devido a influência de máquinas agrícolas. Com esse aumento de D_s , ocorreu também um aumento dos valores de D_s além do valor de D_{sc} , mas verificou-se que a partir de março de 2009 houve redução na proporção de $D_s > D_{sc}$. Observou-se que em outubro de 2009 houve uma condicional elevação na proporção de amostras com $D_s > D_{sc}$ na camada de 7,5-15 cm. Mesmo ocorrendo uma variação da proporção dos valores de $D_s > D_{sc}$, no tratamento T0 há uma

aparente estabilidade física do solo, devido a maior estabilidade do sistema, sem influência do pisoteio dos animais e da agressividade das raízes do azevém. Ainda assim, T0 representa o sistema de plantio direto tradicional e há variações de valores de Ds ao longo do tempo e relação dos valores de Dsc de referência estabelecido por Petean et al. (2010). Essa melhor estabilidade na proporção e variação dos valores de Ds maior que Dsc, não foi observado no tratamento T4, o qual apresenta condições de efeito de forragem que se assemelham ao tratamento T0, entretanto apresenta influência do pisoteio animal, mas com predominância da aveia na composição da pastagem de inverno.

Os tratamentos T1, T2, T3 e T4 apresentam ampla variação temporal das proporções de $Ds > Dsc$, o que se deve, provavelmente, a influência animal e à regeneração radicular da aveia e principalmente do azevém, por haver maior quantidade de azevém nestes tratamentos. Em todos os tratamentos analisados as menores percentagens de $Ds > Dsc$ ocorreram na época de amostragem de março de 2009, provavelmente devido às operações de semeadura da cultura de verão e especialmente as condições climáticas mais secas no verão de 2008. Também foi verificado elevado volume de precipitação em agosto de 2008 que conferiu maior disponibilidade hídrica para o crescimento do azevém até o final do pastejo e período de recuperação da cultura antecedendo a semeadura da soja.

Destaca-se, o efeito do T1 em promover elevadas proporções de $Ds > Dsc$, indicando que o pastejo intenso pode comprometer a qualidade física do solo comparado aos tratamentos T2, T3 e T4, a maior proporção de amostras com $Ds > Dsc$ pode estar ligado a menor resiliência do solo devido a reduzida proporção de azevém em relação à aveia e a persistência dos efeitos do pisoteio neste tratamento.

Os valores médios de macroporosidade do solo no período estudado são mostrados na Figura 4. Em conformidade com outros estudos há uma relação inversa com a Ds e os maiores valores de macroporosidade podem ser verificados nos tratamentos T0 e T4 enquanto que os tratamentos T1, T2 e T3 apresentam entre 5-6% de macroporosidade. Estes valores estão muito abaixo do valor de 10%, preconizado por Grable e Siemer (1968) como o mínimo

necessário para uma adequada difusão de oxigênio e outros gases no solo e utilizado como referência na Figura 4.

A macroporosidade em T0 difere do tratamento de T1, T2 e T3, os quais são similares ao tratamento T4. Na camada de 0-7,5 cm, os resultados são bastante heterogêneos, indicando comportamento dos dados que revele a interação entre o efeito sistemático do tráfego de máquinas do pisoteio animal e das culturas. No tratamento T1 a maior macroporosidade em relação ao tratamento T2 pode ser decorrente da maior quantidade de raízes de azevém no tratamento, que possibilita a criação de poros após a sua decomposição. Além disso, estudos comprovam que poros de origem biológica são mais estáveis ao estresse mecânico que poros formados pela matriz do solo.

Particularmente, no tratamento T0 ocorreu, inicialmente, uma homogeneidade nos valores de macroporosidade (Figura 4), porém nas épocas de outubro de 2008 e março de 2009 o valor de macroporosidade é reduzido, influenciado pelo aumento da Ds no período com posterior redução de Ds em março de 2009. O tratamento T0 reflete o manejo em área de plantio direto, pois não apresenta pastejo animal, mas apresenta a influência das máquinas agrícolas. Assim, um aumento da macroporosidade é fundamental para o manejo e conservação de solos em sistema de plantio direto (SPERA et al., 2009). Da mesma forma, Andreola et al. (2000), afirmam que com o aumento de volume nos macroporos resulta em melhoria na aeração e na infiltração de água no solo.

Nos tratamentos T1 e T2 há uma variabilidade da macroporosidade entre as amostras justificado pelo pisoteio animal que comprime o solo e pelo efeito das raízes, ciclos de secagem e umedecimento, atividade biológica que promove a recuperação da estrutura do solo. A maior quantidade de fezes dos animais nos tratamentos T1, T2 e também no T3 acentuam a complexidade deste SILP. A melhoria da macroporosidade ao longo dos anos pode ser explicada pela regeneração do sistema radicular e que nessa área ocorre uma menor supressão do azevém pela aveia, garantindo uma maior resiliência à estrutura do solo.

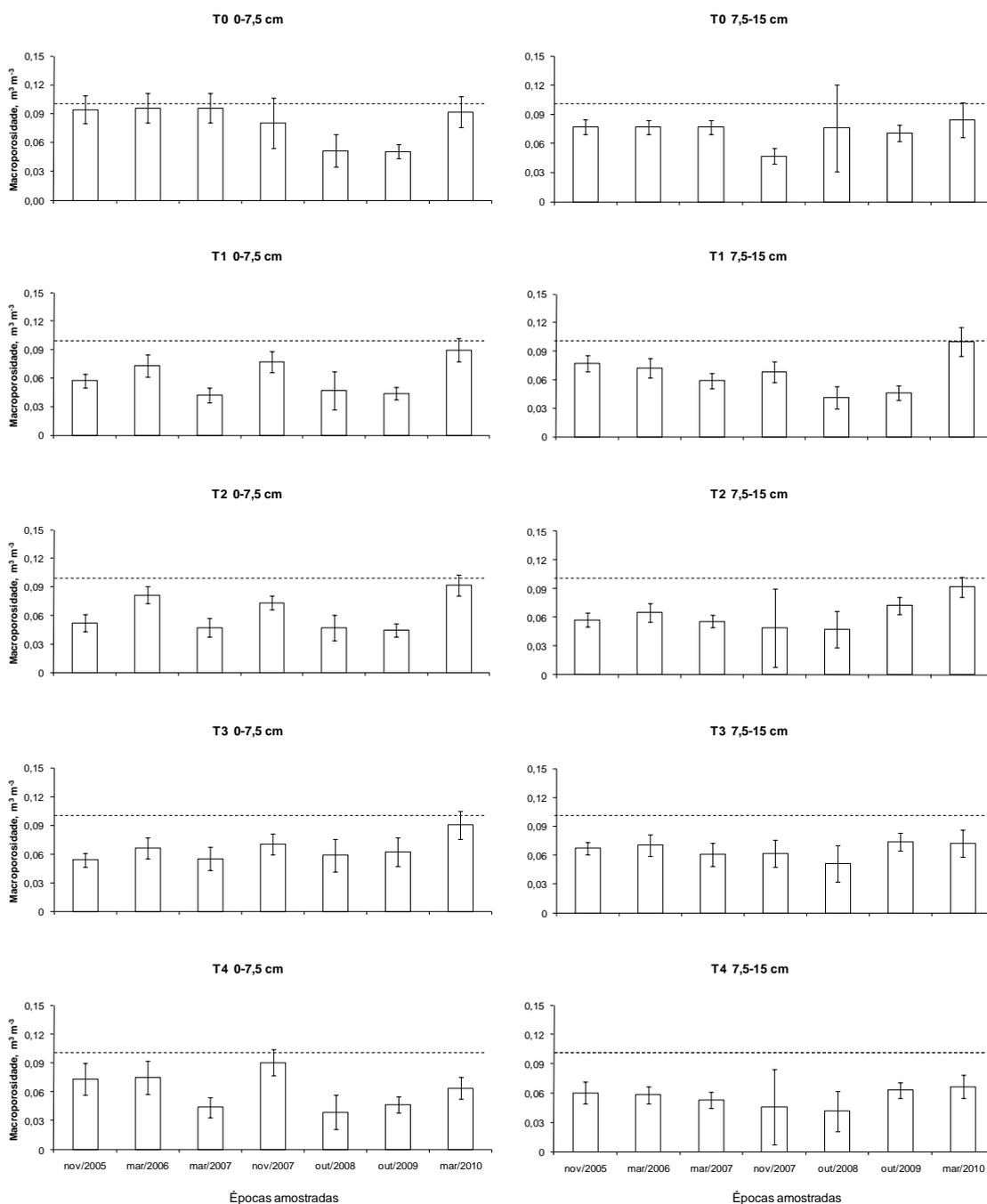


Figura 4 - Valores médios e intervalos de confiança da média para a macroporosidade do solo nas camadas de 0-7,5cm e 7,5-15 cm de profundidade, para os tratamentos de níveis de pastejo T0, T1,T2,T3 e T4 nas diferentes épocas de amostragem.

Os tratamentos que apresentam uma maior quantidade de forragem residual, T3 e T4, apresentaram menor variabilidade da macroporosidade do solo, possivelmente pelo fato de haver um menor pisoteio animal e suficiente efeito de recuperação física do solo causada pela forragem ao sistema e forças naturais.

Nestes tratamentos verificou-se uma melhora gradativa e continua nas últimas três épocas analisadas, mesmo que ainda o tratamento T3 tenha sido verificado um desempenho melhor por haver uma maior relação aveia, azevém e possivelmente porque nessas épocas haverem uma maior quantidade de chuva garantindo maior crescimento da forragem, reduzindo o impacto do pisoteio animal na área dos tratamentos.

4.4. CONCLUSÕES

a) Densidade do solo e macroporosidade foram dependentes dos manejos utilizados.

b) As flutuações temporais de densidade e macroporosidade no sistema de Integração Lavoura-Pecuária, implicam num sistema em que não há aparente estabilidade física do solo. A qualidade física do solo varia com o tempo.

c) Os tratamentos T1 e T2 apresentaram na qualidade física do solo sendo mais deteriorada em relação aos demais tratamentos.

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLA, F.; COSTA, L.M. & OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e ou mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.4, p.857-865, 2000.

AZENEGASHE, O.A.; ALLEN, V.; FONTENOT, J. Grazing sheep and cattle together or separately: effects on soil and plants. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, n.2, p.380-386, 1997

BALL, B.C.; HUNTER, R. The determination of water release characteristics of soil cores at low suctions. **Geoderma**, Amsterdam, v.43, n.1, p.95-212, 1988.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. de; ALMEIDA, E.X. de; KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim-elefante-anão cv. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35 n.5, p.1047-54, 2000.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Madison: **American Society of Agronomy**, 1986. p.363-375.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; CEPIK, C.T.C.; DEBIASI, H. Demanda de tração em haste sulcadora na integração lavourapecuária com diferentes pressões de pastejo e sua relação com o estado de compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.220-8, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA -EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A.; DUTRA, A.C. Degradação física de um Latossolo Vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.863-873, 2007.

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 American Journal**, Madison, v.32, n.1, p.180-186, 1968.

GREENWOOD and MCKENZIE, K.L. Greenwood and B.M. McKenzie, Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review, **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 4, p.1231-1250, 2001

GREENWOOD, K.L.; MACLEOD, D.A.; HUTCHINSON, K.J. Long-term stocking rate effects on soil physical properties. **Australian Journal of Experimental Agriculture.**, Collingwood, v. 37, n. 4, p. 413-419, 1997.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In. LAL, R.; BLUM, W.H., VALENTINE, C.; STEWART. B.A (Ed). **Methods for assessment of soil degradation**. Roca. Raton: CRC, 1998. p 167-179

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. da; TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa. Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.7, p.1493-1500, 2000.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação das pressões crítica para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. (Eds.). Soil compaction in crop production. Amsterdam: **Elsevier Science**, 1994. p.23-44.

LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R. da S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.1131-1140, 2007.

MOOT, G.O.; LUCAS, H.L. **The design conducted and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pasture**. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 6., 1952, Pensilvânia. Proceedings... Pensilvânia: State College Press, 1952. p.1380-1395.

MORAES, A. & LUSTOSA, S.B.C. **Efeito do animal sobre as características do solo e a produção da pastagem**. In: SIMPÓSIO SOBRE AVALIAÇÃO DE

PASTAGENS COM ANIMAIS, Maringá, 1997. Anais. Maringá, 1997. p.129-149.

PAYTON, M. E; MILLER, A. E.; RAUN, W. R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 31, n. 5, p. 547-552, 2000.

PETEAN, L. P., TORMENA, C.A., & ALVES, S.J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.5, p.1515-1526, 2010.

SCHOLEFIELD, D.; PATTO, P.M.; HALL, D.M. Laboratory research on the compressibility of four topsoils from grassland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.6 n.1., p.1-16, 1985.

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

SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van. **Soil compaction problems in world agriculture**. In: SOANE B.D.; OUWERKERK, C.van, (eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 1994. p.1-22.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B.C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D., VAN OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Elsevier Science, Amsterdam, 1994. p.167-190.

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, 1998b.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P; LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, 52n. 3-4, p.223-232, 1999.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARD, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998a.

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

VZZOTTO, V. R.; MARCHEZAN, E.; SEGABINAZZI, T. Efeito do pisoteio bovino em algumas propriedades físicas do solo de várzea. **Ciência. Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 965- 969, 2000.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the no limiting water range. **Geoderma**, Amsterdam, v.114, n.3, p.401-414, 2003.

5. CAPÍTULO 3

DETERMINAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO SOB PLANTIO DIRETO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA UTILIZANDO DUAS ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS.

RESUMO- O objetivo deste trabalho foi testar duas estratégias metodológicas para quantificar o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) em um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura e pecuária e utilizar a densidade do solo crítica (D_s em que o $IHO=0$) para fins de monitoramento da qualidade física do solo. A pesquisa propôs quantificar aqueles indicadores de qualidade física utilizando as seguintes abordagens metodológicas: obter o IHO utilizando a metodologia tradicional proposta por Silva et al. (1994) - utilizando mesa de tensão e membranas de pressão, os quais são amplamente utilizada nos estudos de quantificação do IHO, e uma proposta metodológica alternativa para estimativa mais rápida e mais barata em que a Curva de Retenção de Água (CRA) foi feita utilizando o secamento das amostras em estufa e medindo os potenciais com minitensiômetros e psicrometria. Esta proposta “alternativa” teve como objetivo evitar o uso de instrumentos caros para estimar a curva de retenção e os gradientes de teores de água para estimar a curva de resistência do solo, sendo alternativamente confeccionada utilizando o secamento de amostras em estufa e medindo o potencial da água do solo por meio de minitensiômetros e o equipamento WP4-T. Foram obtidas amostras em duas camadas (0-7,5 cm e 7,5 -15 cm) num experimento de longo prazo estabelecido para investigar os efeitos de diferentes pressões de pastejo das forrageiras de inverno na qualidade física do solo em sistema de integração lavoura-pecuária. A hipótese testada foi de que o aumento da pressão de pastejo resulta em compactação superficial e perda da qualidade física e estrutural do solo, a qual poderia ser avaliada pelos indicadores e metodologias propostas. O

elevado valor de r^2 obtido no ajuste dos modelos aos dados de $\theta(\psi)$ obtidos indicou que a utilização da metodologia “alternativa” para obter a CRA foi precisa e adequada para a quantificação do IHO. O IHO é reduzido com o aumento da densidade em função da necessidade do maior teor de água necessário para manter a $RP=2,5$ MPa, indicando que a resistência à penetração é uma variável de grande importância no controle da qualidade física do solo neste experimento. A camada de 7,5-15 cm apresentou as maiores restrições físicas ao crescimento das plantas associadas ao aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração. Os limites de densidade do solo crítica estabelecidos pelo IHO não foram influenciados pela estratégia de obtenção da curva de retenção de água no solo, evidenciado pelos valores similares de densidade do solo crítica. A metodologia proposta de elaborar a curva de retenção por secamento e medir o potencial com minitensiômetros e psicrometria mostrou-se adequada para estimar o IHO, capturando os efeitos da estrutura entre as camadas amostradas. Os valores de densidade do solo crítica obtidos com estes índices mostraram-se adequadas para monitorar a qualidade física do solo por meio de amostragens periódicas para quantificar a densidade do solo. No tratamento 7 e 14 cm, a degradação física do solo é mais elevada e certamente predispõe as culturas a estresses de resistência sob secamento do solo e de aeração sob condições prolongadas de elevada umidade do solo. Os resultados indicaram que a qualidade física do solo estudado sob integração lavoura-pecuária pode ser mantida em condições favoráveis ao crescimento das plantas adotando um sistema de pastejo das forrageiras de inverno que mantenha acima de 21 cm de massa residual destas forrageiras.

Palavras-chave: densidade do solo, estrutura do solo, sistemas de manejo, compactação.

DETERMINATION OF LEAST LIMITING WATER RANGE AN OXISOL UNDER NO-TILLAGE IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK USING TWO METHODOLOGICAL STRATEGIES

ABSTRACT. The aim of this study was to test two methodological strategies to quantify the Least Limite Water Range (LLWR) in an Oxisol under no-tillage system on crop and livestock production using the critical soil bulk density - Bd (Bd in which the LLWR = 0) for monitoring the soil physical quality. The research intends to quantify those physical quality indicators using the following methodological approaches: Determines the LLWR using the traditional methodology proposed by Silva et al. (1994) - using tension table and pressure membrane, which is widely used in studies to quantify the LLWR, and an alternative methodological proposal to estimate quicker and cheaper the WRC that was done through drying of the samples in an oven and measuring the potential with minitensiometers and psychrometric. This proposed "alternative" is meant to avoid the use of expensive instruments to estimate the WRC and the gradients of water content to estimate the soil penetration resistance curve. Samples were obtained in two layers (0 to 7.5 cm and 7.5 -15 cm) in long-term experiment established to investigate the effects of different grazing pressures of winter forage in the soil physical quality in integrated crop and livestock. The hypothesis was that increased grazing pressure resulted in surface compaction and loss of physical quality and soil structure, which could be assessed by indicators and methods proposed. The high value of r^2 obtained after fitting the models to the data $\theta(\psi)$ obtained indicated that the use of the methodology "alternative" to get the WRC was accurate and adequate for the quantification of the LLWR. The LLWR was reduced with increasing density due to the need of higher water content needed to keep the PR = 2.5 MPa, indicating that the penetration resistance is a variable of great importance in controlling the physical quality of this soil . The 7.5-15 cm layer showed the greatest physical constraints to plant growth associated with increased soil bulk density and soil resistance to penetration. The density limits established by the LLWR critical soil were not

influenced by the strategy of obtaining the curve of water retention in soil, as evidenced by similar values of critical bulk density. The proposed methodology to establish the retention curve for drying and measuring the potential with psychrometric and minitensiometers proved to be adequate to estimate the LLWR, capturing the effects of structure between the layers of samples. The values of critical bulk density obtained with these indices proved to be adequate to monitor the soil physical quality through regular sampling to quantify the density of the soil. In the treatments 7 and 14 cm, the soil physical degradation is higher and certainly predisposes the crop to stress resistance under soil drying and aeration stress under conditions of prolonged high soil moisture. The results indicate that soil physical quality under crop-livestock integration can be maintained under conditions favorable for plant growth by adopting a system of grazing of winter forage to maintain above 21 cm of residual masses of these forages.

Keywords: bulk density, soil structure, management systems, compaction.

5.1. INTRODUÇÃO

Recentemente, tem crescido a utilização de uma alternativa muito eficiente, ainda que mais complexa, de manter a produtividade agrícola e o fluxo de caixa dos produtores que é a integração entre lavoura e pecuária e por isso vem atraindo grande interesse dos agricultores nas regiões produtoras de grãos. No sul do Brasil, esta integração se baseia na semeadura de forrageiras anuais de inverno para o pastejo do gado em rotação com culturas de verão, e as culturas da aveia e azevém são as principais culturas que podem ser cultivadas isoladas ou em misturas no inverno, servindo de cobertura do solo e alimento para o gado (FONTANELI et al., 2000). O sistema intensivo de Integração Lavoura-Pecuária é mais complexo e requer maior preparo de produtores e técnicos em nível de conhecimento. Uma melhor compreensão sobre o efeito da entrada dos animais

em áreas de lavouras e das interações entre solo, planta e animais, pode ser determinante na obtenção de resultados satisfatórios.

Sistemas produtivos com rotações entre culturas graníferas e forrageiras têm contribuído para manter a qualidade física e química do solo e, por consequência, conservar a fertilidade e a produtividade das culturas (STUDDERT et al., 1997). Incluir forrageiras em programas de rotação de culturas ajuda a restaurar propriedades do solo afetadas pelo cultivo (HAYNES et al., 1991) devido o aumento do teor de matéria orgânica do solo em resposta à maior produção de biomassa vegetal aérea e radicular (TISDALL e OADES, 1982; HAYNES et al., 1991). Igualmente às pastagens permanentes, as forrageiras anuais requerem manejo cuidadoso para que produzam o suficiente para alimentar o gado e proteger o solo da ação da erosão e conservar a água no solo. Na integração lavoura-pecuária, evitar o pisoteio excessivo do gado é fundamental para que o solo não sofra compactação adicional, principalmente no sistema de manejo em plantio direto. Alguns estudos mostram que o pisoteio do gado compacta o solo, enquanto outros demonstram que com carga animal adequada, suspensão do pastejo em condições de solo úmido e manutenção de biomassa residual adequada não há influência negativa na produtividade das culturas de verão.

No sistema intensivo de Integração Lavoura Pecuária e que vem sendo estudado em diferentes regiões do estado do Paraná, sugere-se ter cultivos de grãos em rotação com forrageiras implantadas no outono – inverno na maior parte da propriedade, intensificar a produção de forragem em uma pequena parte da propriedade, visando alimentar os animais na primavera – verão e ainda ter forragem conservada. A proposta deste sistema é ter uma alternativa econômica para o período de inverno (aveia + azevém ou braquiária) em rotação com cultivos agrícolas, uma melhor utilização das áreas de pastagens perenes no período quente do ano e uma quantidade restrita de forragem conservada e que em conjunto possibilite ter alto desempenho animal e agrícola, com baixo custo em nível de propriedade. Independentemente da espécie ou forma de estabelecimento, a entrada de animais em pastejo nas áreas agrícolas é um fator

de grande preocupação. Potencialmente, os animais em pastejo podem compactar os solos devido ao pisoteio, consumir biomassa e dificultar a manutenção do plantio direto e exportar nutrientes na carne e leite produzidos ou concentrar nutrientes em determinadas áreas pela deposição desuniforme das excreções. Uma melhor compreensão sobre o efeito da entrada dos animais em áreas de lavouras e das interações entre solo, planta e animais é fundamental para a sustentabilidade deste sistema de produção. O pastejo remove partes da planta e estimula a rebrota, ampliando os efeitos dos sistemas radiculares na estrutura do solo. Em pressões de pastejo (alturas) adequadas, observa-se um aumento da produção de biomassa, um desempenho animal satisfatório e quantidades de palha adequadas à manutenção do plantio direto.

Vários estudos demonstram a compactação superficial do solo em plantio direto (DERPSCH et al., 1991; TORMENA e ROLOFF, 1996; TORMENA et al., 1998a) e sugerem a redução na qualidade física do solo para o crescimento das raízes. Os resultados obtidos por Derpsch et al. (1991) indicam problemas de crescimento radicular somente com $D_s > 1,25 \text{ Mg m}^3$. Todavia, Tormena et al. (1998b) e Tormena et al. (1999) demonstram que limitações físicas severas ocorrem com D_s ainda menores nos solos argilosos. A introdução da pecuária nos solos utilizados para a produção de grãos adiciona o pisoteio dos animais como uma nova variável, uma vez que o pisoteio dos animais reconhecidamente promove a compactação superficial do solo e promove modificações mais severas nas propriedades físicas das camadas superficiais do solo.

A presença do rebanho nas áreas de lavoura tem efeitos diretos e indiretos tanto sobre a forragem quanto sobre o solo. Os cascos dos animais causam injúrias ou perda de vegetação, bem como provocam compactação da superfície do solo pela pressão que exercem (LEWIS, 1980; BALPH e MALECHECK, 1985). Segundo Scholefield et al. (1985), as altas pressões aplicadas ao terreno pelos cascos dos animais em pastejo tendem a danificar a vegetação e deformar o solo, sendo que a intensidade desses efeitos é determinada pela quantidade de pisoteio, classe de solo e seu teor de água. Além disso, de acordo com Mulholland & Fullen (1991), a deformação do solo

depende, também, da densidade inicial do solo e do seu teor de matéria orgânica.

Quanto à pressão que um animal exerce sobre o solo, Busby e Gifford (1981) usaram carga estática de $13,6 \text{ Kg cm}^{-2}$ em estudos de pisoteio artificial. Frame (1971) citado por Abdel-Magid et al. (1987), usou carga estática de $2,8-4,2 \text{ kg cm}^{-2}$, com superfície de contato do casco variando de $60-90 \text{ cm}^2$. Apesar das discrepâncias, Abdel-Magid et al. (1987) descrevem que a carga estática pode ser calculada dividindo-se o peso do animal pela superfície total de contato dos cascos. Um animal de 400 kg de peso vivo, com área média de 80 cm^2 por casco, exerceria uma carga estática (4 cascos em contato com o solo) de $1,25 \text{ kg cm}^{-2}$. Quando em deslocamento (2 cascos tocando o solo), este valor aumentaria para $2,5-5,0 \text{ kg cm}^{-2}$, já que a carga pode variar com a fração da área total de casco efetivamente em contato com o terreno.

Para se ter uma idéia do potencial de compactação de um animal como o do exemplo acima, um trator comum de pneus com cerca de 5 Mg de peso exerce pressão de contato de 1 a 2 bar sobre o solo (KUIPERS e VAN DE ZANDE, 1994), aproximadamente $1 \text{ a } 2 \text{ kg cm}^{-2}$. Se comparados esses números aos $2,5-5,0 \text{ kg cm}^{-2}$ do animal em movimento, é possível dizer que o animal tem um elevado potencial de compactação do solo. Considerando-se os valores de carga com os animais em movimento, de 2 a 4 vezes maiores que na condição estática, o caminhar dos animais, como argumentam Scholefield et al. (1985), é um fator de alto potencial de compactação e indicam que a quantidade de pisoteio é determinante na compactação do solo, e que qualquer prática que reduza o caminhar dos animais (localização de água, sal e forragem, duração de pastejo) deve diminuir os danos provocados à pastagem e ao solo. Assim, além do peso individual dos animais e da densidade animal, o manejo dos animais nas áreas pastejadas é de grande importância, em especial a pressão de pastejo. Embora a compactação produzida pelo pisoteio apresente a tendência de ocorrer apenas superficialmente, ela provoca drásticas modificações no comportamento físico do solo (MULHOLLAND e FULLEN, 1991).

A avaliação da qualidade física do solo tem sido feita por diferentes propriedades físicas. Bons indicadores de qualidade do solo são aqueles que

determinam a capacidade do solo para sustentar a produtividade física e econômica em longo prazo (CARTER et al., 1999) e que estão relacionados com processos biológicos ligados ao crescimento das plantas. Neste sentido, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é uma inovação como parâmetro da qualidade física do solo por integrar os efeitos da disponibilidade de água, da resistência à penetração e da capacidade de difusão gasosa do solo como fatores limitantes às plantas. Neste sentido, o IHO é uma faixa de umidade do solo em que são mínimas as limitações ao crescimento das plantas por fatores físicos. O IHO está sendo cada vez mais avaliado no Brasil, com distintos grupos de pesquisa trabalhando na sua avaliação, quantificação e evolução como parâmetro da qualidade estrutural do solo em diferentes solos e sistemas de manejo. As práticas de manejo do solo que propiciam maiores valores do IHO podem ser consideradas como adequadas para a condução do sistema com o mínimo de restrições físicas às culturas. Isto se justifica pelo fato de que nesta condição, as plantas são menos frequentemente expostas a condições físicas adequadas, uma vez que a redução da densidade do solo e/ou a conservação da água no solo favorece uma maior frequência de ocorrência de umidade dentro dos limites do IHO.

Outros parâmetros indicadores podem ser derivados do IHO com a finalidade de avaliação e monitoramento da qualidade física do solo. Entre eles, a densidade do solo crítica às plantas, que é definida como sendo aquela em que o $IHO=0$, ou seja, na qual reconhecidamente as condições físicas do solo são altamente impeditivas às plantas. Também o menor valor de densidade do solo em que inicia o processo de degradação física do solo pode ser derivado do IHO, considerando o valor de densidade em que a disponibilidade de água é reduzida seja pela excessiva resistência do solo ou pela reduzida aeração do solo. Assim, quanto mais a densidade do solo se distribui em direção ao $IHO=0$, mais degradado é o solo do ponto de vista físico. Neste contexto, a avaliação temporal da densidade pode ser utilizada para estabelecer a evolução da qualidade física do solo com base no IHO.

A determinação do IHO envolve a necessidade de elaborar a Curva de Retenção de Água no solo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999, entre outros autores). A determinação da CRA em laboratório envolve a utilização de equipamentos de elevado custo como as membranas de pressão, placas porosas e compressores sendo que a metodologia tradicional necessita de muito tempo o equilíbrio das amostras. Segundo (KLUTE, 1986), o tempo para uma amostra apresentar equilíbrio, usualmente, demora em torno de um a sete dias, dependendo da natureza do solo, da altura da amostra e da tensão aplicada. Tormena et al. (1998) submetendo amostras indeformadas de solos aos potenciais de: -0,006 e -0,008 MPa em mesa de tensão e -0,01, -0,03, -0,05, -0,07, -0,1, -0,5 e -1,5 MPa, mediante pressões aplicadas em placas porosas, verificou que o tempo para as amostras estarem em equilíbrio variou desde 48 horas para o maior potencial até trinta dias para o menor potencial aplicado às amostras. Bittelli e Flury (2009) observaram que os tempos para as amostras apresentarem equilíbrio, nas tensões de 0,1, 1, 5, 10, 30, 50, 100, and 150 m de coluna de água foram de 7, 7, 7, 13, 27, 26, 41, e 75 dias respectivamente, sendo semelhante a Moraes et al. (1993) em que amostras submetidas à pressão de 3×10^5 Pa apresentou equilíbrio em quinze dias. Collares et al. (2002) utilizando amostras de solo submetidas aos potenciais de -6, -34, -102, -306 e -1530 kPa, com pressões aplicadas em placas porosas, indicaram tempos de equilíbrio variando de 36 horas, 60 horas, 10 dias, 15 dias e 35 dias, respectivamente para os potenciais acima especificados. O tempo para determinar a curva de retenção de água no solo é altamente dependente das condições de equilíbrio ligadas ao tamanho da amostra, da textura e estrutura e da disponibilidade de equipamentos em laboratório. Estas limitações dificultam a determinação do IHO bem como implicam em demora para obtenção dos resultados, especialmente com elevado número de amostras, como no caso do presente estudo. Metodologias que possibilitem redução nos custos de obtenção da CRA, redução do tempo de confecção da CRA e precisão das estimativas são de fundamental importância para facilitar a quantificação da qualidade física do solo, a exemplo do IHO.

O objetivo deste trabalho foi testar duas estratégias metodológicas para quantificar o IHO em um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura e pecuária e utilizar a densidade do solo crítica (D_s em que o $IHO=0$) para fins de monitoramento da qualidade física do solo.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1. Caracterização da área experimental

As amostragens foram realizadas num experimento implantado no ano agrícola de 2002/2003 na fazenda experimental da Cooperativa Agropecuária Mourãoense – COAMO, localizada no município de Campo Mourão - PR, situado a 24°02'38" de latitude Sul e 52°22'40" de longitude a Oeste. A área apresenta relevo praticamente plano ou suave ondulado com altitudes variando de 600 a 650 m e com médias anuais de temperatura e precipitação de 20°C e 1340 mm, respectivamente. Nesta região o tipo climático dominante segundo a classificação de Köppen é o Cfa (subtropical úmido mesotérmico). O solo utilizado neste estudo é identificado como Latossolo Vermelho distroférico, com teor de argila de 85%.

5.2.2. Tratamentos

O experimento vem sendo conduzido num sistema de rotação de culturas que consiste das culturas comerciais de soja e milho no verão e as culturas de aveia e azevém no inverno. As culturas da aveia e do azevém são plantados em mistura, as quais são utilizadas como forrageiras pelos animais. Todo o sistema é conduzido em plantio direto e o controle de pragas, doenças e ervas daninhas, é realizado utilizando as recomendações técnicas para as culturas. O plantio das culturas de aveia e azevém foi feito em abril de cada ano e as culturas de soja ou milho entre outubro e novembro, de acordo com a época de plantio recomendada para as cultivares. Para o plantio das forrageiras de inverno são utilizados cerca

de 60 kg ha⁻¹ de aveia preta comum e 30 kg ha⁻¹ de azevém. A adubação das forrageiras de inverno consiste da aplicação de 150 kg ha⁻¹ da fórmula comercial 8-30-20 por ocasião do plantio e 75 kg N ha⁻¹ em cobertura. Os animais utilizados são machos com cerca de 180-200 kg de peso vivo. A entrada dos animais ocorreu desde o final de maio até início de junho de cada ano, com o período de pastejo estendendo-se até a segunda quinzena de setembro. Os tratamentos foram constituídos de 4 pressões de pastejo para que a altura das forrageiras de inverno fosse mantida durante o pastejo nas seguintes alturas: I) 0,07 m; II) 0,14 m; III) 0,21 m e IV) 0,28 m e um tratamento testemunha em que os animais não tiveram acesso à forrageira de inverno. Semanalmente foi feito o monitoramento da altura da pastagem para manter as diferentes alturas planejadas durante todo o período do ensaio. Quando houve indicação de modificação da altura estabelecida, o número de animais nas unidades experimentais foi modificado. Diminuindo a altura planejada das plantas, o número de animais era reduzido, e em caso de aumento da altura, o número de animais foi incrementado. Apesar de não haver uma taxa fixa de lotação, houve sempre um mínimo de 2 animais por unidade experimental. Os animais excedentes a estes 2 são chamados de flutuantes ou reguladores, pois sua presença ou ausência é que regulará a altura da pastagem.

Como unidades experimentais, foram considerados piquetes delimitados por cerca elétrica na área cultivada, os quais possuem áreas de diferentes tamanhos, de acordo com a altura remanescente de resíduo estabelecida para a forragem. Quanto maior a altura a ser mantida, maior será a área do piquete, a fim de utilizar um número mínimo de animais por piquete (três), possibilitando que, nos piquetes em que a altura da forragem for maior, houvesse um nível mínimo de pisoteio. A área experimental totalizou cerca de 8 ha.

5.2.3. Determinações das propriedades físicas do solo

a) Amostras para determinação da densidade do solo e do IHO

Foram retiradas amostras com estrutura indeformada por meio de amostrador e anéis com volume de 100 cm^3 nas camadas de 0,0-0,07 e 0,075-0,15 m de profundidade em cada tratamento, as amostras utilizadas na metodologia tradicional foram coletadas em março de 2009, após a colheita da soja e para a metodologia alternativa as amostras foram coletadas em novembro de 2009, após a retirada do gado. Os anéis foram introduzidos no solo por meio de um macaco hidráulico utilizando um trator como contrapeso. Foram coletadas 36 amostras em cada tratamento e camada para a metodologia tradicional e alternativa, totalizando 144 amostras por tratamento e um total de 720 amostras para confecção do IHO. Imediatamente à coleta, as amostras foram acondicionadas em papel alumínio para evitar a perda de água e em seguida encaminhadas para o laboratório sob refrigeração ($\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$), para inibir eventos que modificam a estrutura do solo, como a germinação de sementes ou a atividade de insetos e microorganismos até a sua preparação para análise.

b) Determinação da curva de retenção de água no solo e de resistência do solo à penetração

Após devidamente preparadas, as amostras com estrutura não deformada foram saturadas por meio de elevação gradual de uma lâmina de água em uma bandeja. Para a metodologia tradicional, a determinação da curva de retenção foi feita adotando o procedimento descrito em Silva et al. (1994): as amostras foram divididas em 12 grupos de potenciais, sendo três amostras por tratamento e camada amostrada. Foram utilizados os seguintes potenciais: -0,002, -0,004, -0,006, e -0,008 MPa numa mesa de tensão adaptada de Kiehl (1979) e, -0,01, -0,02, -0,030, -0,05, -0,07, -0,1, -0,40 e -1,5 MPa, utilizando pressões aplicadas em câmaras com placas porosas (KLUTE, 1986).

Nesta proposta, o objetivo foi estabelecer uma estratégia alternativa para obtenção da CRA em substituição à metodologia tradicional que se utiliza de células de pressão equipadas com membranas porosas. A dessaturação das amostras foi feita por meio de secagem das amostras em estufa sob baixa temperatura e circulação forçada de ar, utilizando 12 diferentes tempos de secagem (em cada tempo de secagem foram utilizadas 3 amostras), previamente definidos em laboratório (12 tempos de secagem). Em cada tempo de secagem, o teor de água das amostras foi obtido por pesagens enquanto que a obtenção do potencial foi feita utilizando minitensiômetros até o potencial de - 850 hPa e um equipamento WP4 (psicrometria) para potenciais menores. Desta forma, a curva de retenção foi obtida em cerca de 72 horas após o início dos procedimentos. Para a metodologia alternativa de determinação da CRA, 12 grupos de 3 amostras foram selecionados para secagem em estufa a 60°C por tempos crescentes. Primeiramente, todas as amostras foram equilibradas no potencial de -0,002 MPa numa mesa de tensão, gerando uma uniformidade no potencial inicial da amostra a ser dessaturada. Posteriormente, as amostras foram levadas para a estufa, onde permaneceram secando a 60 °C de acordo com o tempo estabelecido para cada potencial esperado. Para os tempos de secagem, previamente estabelecidos, procurou-se determinar os mesmos potenciais utilizados na metodologia tradicional, onde tivemos os tempos de secagem de 0 minutos (potencial de -0,002 MPa), 20 minutos, 40 minutos, 60 minutos, 1 hora e 20 minutos, 1 hora e 40 minutos, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 5 horas, 6 horas e 7 horas respectivamente para os potenciais (potenciais esperados) de -0,002, -0,004, -0,006, -0,008 -0,01, -0,02, -0,030, -0,05, -0,07, -0,1, -0,40 e -1,5 MPa. Em seguida, as amostras foram resfriadas e envolvidas em filme plástica e armazenadas em recipiente hermeticamente fechado por 24 horas para redistribuição da água na amostra. Para o processo de secagem foi confeccionado um dispositivo de tela metálica para que a secagem das amostras em estufa com circulação forçada de ar ocorresse nos dois extremos da mesma, conforme figura 1 abaixo.



Figura 1. Visão frontal do sistema de secagem das amostras e dispositivo em tela metálica para acondicionamento das amostras em estufa com circulação forçada de ar.

Em seguida ao equilíbrio das amostras, as mesmas foram pesadas e determinadas o potencial da água no solo utilizando minitensiômetros até o potencial de -850 hPa e por psicrometria utilizando o equipamento WP4-T, conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 2. Ilustração da determinação do potencial da água no solo utilizando um minitensiômetro (em primeiro plano) e psicrometria (WP4-T) em segundo plano.

A determinação da resistência do solo à penetração foi feita da seguinte maneira: Para a sistemática tradicional, a resistência foi medida após atingir o equilíbrio hídrico em cada potencial: as amostras foram pesadas e, em seguida, realizada a determinação da resistência do solo à penetração utilizando o penetrômetro eletrônico e a metodologia descritas por Tormena et al. (1998b). Após a determinação da resistência, as amostras foram secas em estufa a ± 105 °C, por 24 h, para a determinação da umidade e da densidade do solo. Para a metodologia alternativa, após o procedimento de secagem e tempo para redistribuição da água nas amostras, a resistência foi determinada conforme Tormena et al. (1988b) e em seguida foi feita a determinação do potencial.

Na determinação da resistência e do potencial de água, as amostras foram retiradas da manta plástica, após a redistribuição da água no interior da amostra, tendo sua massa de água determinada. Em seguida, a resistência a penetração foi determinada em um penetrômetro eletrônico controlado por computador, com as seguintes características: haste de penetração com ponta cônica de 4 milímetros de diâmetro e semi-ângulo de 30°; deslocamento da haste em velocidade constante de 0,01 m por minuto; e frequência de leitura de resistência de um valor a cada 0,75 segundo Tormena et al. (2008b). As

amostras foram posicionadas no penetrômetro de forma que a ponta cônica se desloque ao longo do eixo longitudinal no centro dos cilindros, e o valor médio de resistência para cada amostra foi calculado somente com valores relativos aos 0,03 m centrais das amostras, ou seja, foram descartados 0,01 m de cada extremidade da amostra.

Após a aquisição dos dados de resistência a penetração foi determinado o potencial de água introduzindo um minitensiômetro no centro das amostras a qual apresentava um orifício resultante da haste do penetrômetro eletrônico e a profundidade igual à metade do comprimento da amostra, ou seja, no centro da amostra. A determinação do potencial de água no solo foi realizado com minitensiômetro até o potencial de -850 hPa dado, o que pode ser feito para o tempo de secagem de 4 horas, estimado para um potencial de - 0,01 MPa. Os potenciais de água no solo com maior valor onde a capacidade de leitura com os minitensiômetros foi ultrapassada foram determinados por psicrometria no equipamento WP4-T, onde o procedimento realizado de forma semelhante. Após a aquisição dos valores de RP, foi retirada uma pequena parte do centro da amostras. Essa amostra foi colocada na cápsula do aparelho WP4-T e determinado o potencial, para as amostras que tiveram os maiores tempo de secagem. Após a determinação dos potenciais, as amostras foram secas em estufa a ± 105 °C, por 24 h, para a determinação da umidade e da densidade do solo.

Para a determinação do IHO é necessário descrever matematicamente as curvas de retenção de água e de resistência do solo. A curva de retenção de água no solo (CRA), expressa pela relação entre o potencial mátrico (ψ) e o conteúdo de água (θ) foi estimada utilizando a função descrita na equação 1:

$$\theta = a \psi^b \quad (1)$$

Para a quantificação do IHO, foi incorporada a densidade do solo na descrição matemática da CRA, de maneira que a equação 1 tomou a forma da equação 2, similar à utilizada por Silva et al. (1994) e Leão et al. (2005).

$$\ln(\theta) = \ln(a + b * D_s) + c \ln(\Psi) \quad (2)$$

Onde θ = conteúdo volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$), ψ = potencial matricial (MPa), D_s = densidade do solo ($Mg m^{-3}$); a , b e c são coeficientes obtidos no

ajuste do modelo. Os efeitos dos tratamentos e profundidades foram testados conforme Tormena et al. (1999).

A resistência do solo à penetração (RP) varia com o conteúdo de água (θ) e com a densidade do solo (Ds), e desta relação funcional entre a RP (Ds, θ) pode-se determinar a curva de resistência do solo (CRS). A CRS foi ajustada através de um modelo não linear utilizado por Busscher (1990) e Silva et al. (1994). O modelo utilizado é descrito na equação 3.

$$RP = d \theta^e Ds^f \quad (3)$$

ou, com a transformação logarítmica do mesmo, resulta na equação 4:

$$\ln RP = \ln d + e \ln \theta + f \ln Ds \quad (4)$$

onde RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ é a umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) e Ds é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$), e d , e , e f são os coeficientes de ajuste do modelo. Os efeitos dos tratamentos e profundidades foram testados conforme Tormena et al. (1999).

Os ajustes dos modelos das curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração foram feitos utilizando-se métodos de regressão linear através da rotina PROC REG (SAS, 1999).

c) Determinação da densidade do solo (Ds)

A densidade do solo foi determinada de acordo com Blake e Hartge (1986).

d) Determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

O IHO foi determinado adotando os procedimentos descritos em Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998b). Os valores críticos de umidade associados com o potencial mátrico, resistência do solo à penetração e porosidade de aeração são respectivamente: a capacidade de campo (θ_{CC}) ou conteúdo de água estimado no potencial de -0,01 MPa (Reichardt, 1988); o ponto de murchamento permanente (θ_{PMP}) ou conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa (SAVAGE et al., 1996); o conteúdo de água no solo em que a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) atinge 2,5 MPa (TAYLOR et al., 1966) e o conteúdo de

água do solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE e SIEMER, 1968). Os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} foram obtidos nos potenciais de $-0,01$ e $-1,5$ MPa, utilizando a CRA, e os valores de θ_{RP} em que ocorre resistência à penetração é de $2,50$ MPa foram obtidos por meio da CRP. O valor de θ_{PA} , em que a porosidade de aeração é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, foi obtido por $[(1-D_s/D_p)-0,1]$. Foi utilizado o valor de $2,85 \text{ Mg m}^{-3}$ como sendo a densidade de partículas (D_p) do solo, já previamente determinada nesta área experimental.

5.2.4. Monitoramento da qualidade física do solo

Para quantificar a evolução da qualidade física do solo foram feitas avaliações periódicas, num total de quatro épocas (após a cultura da safra de verão e após a saída dos animais). Em outubro de 2008, foram retiradas 10 amostras indeformadas em anéis volumétricos para a determinação da densidade do solo em cada tratamento e camada, nas épocas de março e outubro de 2009 foram retiradas 36 amostras por tratamento e camada em um total de 72 amostras por tratamento e na época de março de 2010, 20 amostras indeformadas de solo por camada em um total de 40 amostras por tratamento, totalizando 100 amostras em outubro de 2008, 360 amostras em março 2009, 360 amostras em outubro e 200 amostras na época de 2010. A partir do IHO foi estimada a densidade do solo quando o limite superior e inferior do IHO forem iguais ou $IHO=0$, obtendo-se um valor de densidade que foi referenciada como densidade do solo crítica. A proporção de amostras acima destes limites define o impacto dos tratamentos na qualidade física do solo e foi utilizado como parâmetro para avaliar temporalmente as modificações na qualidade física do solo pelos sistemas de manejo.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os indicadores estatísticos destes parâmetros físicos determinados nas amostras para cada tratamento e profundidade são apresentados nas Tabelas 1 e 2. As variáveis D_s , θ e RP apresentaram ampla faixa de valores, o que é desejável para a modelagem da CRA e CRS e em especial para determinar o IHO. Constatou-se a ocorrência de elevados valores do coeficiente de variação (CV) para a RP, os quais estão associados ao gradiente de conteúdo de água do solo obtido em função dos diferentes potenciais aplicados bem como associado à variação da D_s . Resultados semelhantes são encontrados em diversas pesquisas (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998b, 1999; IMHOFF et al., 2001; LEÃO et al., 2004; LEÃO et al., 2005; CAVALIERI et al., 2006). As variáveis RP, D_s e θ apresentaram valores e variação similar entre os tratamentos; os maiores valores de D_s e RP foram verificados na camada de 7,5-15 cm de profundidade em relação à camada de 0-7,5 cm.

Os dois conjuntos de amostras, 720 no total, mostraram serem similares em relação aos valores das variáveis bem como da amplitude e variação das mesmas. Ressalta-se que o conjunto de amostras utilizadas na abordagem metodológica alternativa (Tabela 2) apresentou valores de D_s superiores na camada de 0-7,5 cm em comparação com os mesmos tratamentos no conjunto das amostras utilizados para a metodologia tradicional, o que resultou em pequenas variações para maiores valores de RP. Os teores de água entre as amostras foi bastante uniforme, com variações associadas ao processo de secamento similar ao de drenagem das amostras nos equipamentos de Richards e mesa de tensão. Estas informações indicam que o processo de secamento, previamente planejado para este solo, foi eficaz em traduzir as variações obtidas no processo tradicional.

Tabela 1 – Parâmetros físicos do solo determinados para cada tratamento, nas amostras com estrutura não deformada para avaliação do IHO pela metodologia tradicional.

Variável	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
Tratamento 7 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,19	0,062	1,06	1,32	5,18
θ (m ³ m ⁻³)	0,40	0,074	0,29	0,54	18,13
RP (MPa)	2,84	1,675	0,79	9,55	58,89
Tratamento 7 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,28	0,057	1,16	1,39	4,44
θ (m ³ m ⁻³)	0,40	0,066	0,29	0,52	16,38
RP (MPa)	4,10	2,132	1,10	9,87	51,90
Tratamento 14 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,18	0,072	1,01	1,33	6,14
θ (m ³ m ⁻³)	0,43	1,501	0,31	1,21	34,73
RP (MPa)	2,65	1,854	0,52	7,63	70,02
Tratamento 14 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,26	0,058	1,07	1,37	4,59
θ (m ³ m ⁻³)	0,40	0,069	0,30	0,51	17,23
RP (MPa)	3,33	1,857	1,15	7,95	55,70
Tratamento 21 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,19	0,058	1,07	1,30	4,89
θ (m ³ m ⁻³)	0,41	0,074	0,31	0,55	18,21
RP (MPa)	2,51	1,921	0,54	8,18	76,43
Tratamento 21 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,26	0,064	1,08	1,38	5,08
θ (m ³ m ⁻³)	0,41	0,067	0,32	0,52	16,39
RP (MPa)	3,41	2,105	0,56	9,15	61,78
Tratamento 28 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,18	0,076	1,04	1,32	6,52
θ (m ³ m ⁻³)	0,41	0,076	0,29	0,56	18,56
RP (MPa)	2,63	1,806	0,37	7,04	68,68
Tratamento 28 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,27	0,055	1,04	1,35	4,35
θ (m ³ m ⁻³)	0,40	0,064	0,32	0,51	15,99
RP (MPa)	3,68	2,186	0,87	9,44	59,35
Testemunha – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,21	0,076	1,01	1,35	6,26
θ (m ³ m ⁻³)	0,40	0,066	0,29	0,53	16,13
RP (MPa)	2,71	1,688	0,30	6,27	62,29
Testemunha – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,27	0,052	1,14	1,36	4,14
θ (m ³ m ⁻³)	0,40	0,068	0,31	0,56	16,69
RP (MPa)	3,64	1,982	1,15	8,53	54,48

Tabela 2 – Parâmetros físicos do solo determinados para cada tratamento, nas amostras com estrutura não deformada para avaliação do IHO pela metodologia alternativa.

Variável	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
Tratamento 7 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,28	0,055	1,14	1,39	4,28
θ (m ³ m ⁻³)	0,43	0,060	0,33	0,53	13,95
RP (MPa)	3,43	1,117	1,34	5,92	32,52
Tratamento 7 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,32	0,032	1,23	1,41	2,41
θ (m ³ m ⁻³)	0,43	0,065	0,29	0,55	15,21
RP (MPa)	3,59	1,676	1,76	9,20	46,56
Tratamento 14 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,26	0,049	1,13	1,37	3,87
θ (m ³ m ⁻³)	0,43	0,066	0,31	0,55	15,38
RP (MPa)	3,69	2,518	1,35	12,15	68,09
Tratamento 14 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,29	0,044	1,11	1,35	3,42
θ (m ³ m ⁻³)	0,42	0,058	0,32	0,53	13,93
RP (MPa)	3,15	1,735	0,73	9,94	54,96
Tratamento 21 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,23	0,055	1,12	1,33	4,54
θ (m ³ m ⁻³)	0,44	0,064	0,32	0,55	14,53
RP (MPa)	2,79	1,341	0,89	6,11	48,07
Tratamento 21 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,30	0,053	1,13	1,39	4,10
θ (m ³ m ⁻³)	0,42	0,065	0,27	0,52	15,49
RP (MPa)	3,52	2,007	1,62	11,01	57,07
Tratamento 28 cm – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,26	0,051	1,13	1,35	4,08
θ (m ³ m ⁻³)	0,44	0,065	0,31	0,54	14,83
RP (MPa)	3,16	1,803	1,09	8,41	57,08
Tratamento 28 cm – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,31	0,051	1,22	1,41	3,88
θ (m ³ m ⁻³)	0,41	0,071	0,24	0,51	17,06
RP (MPa)	3,71	2,257	0,92	9,79	60,81
Testemunha – 0-7,5 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,24	0,057	1,05	1,36	4,63
θ (m ³ m ⁻³)	0,45	0,055	0,34	0,54	12,28
RP (MPa)	2,49	1,19	0,96	6,46	48,12
Testemunha – 7,5-15 cm					
Ds (Mg m ⁻³)	1,31	0,044	1,20	1,41	3,41
θ (m ³ m ⁻³)	0,42	0,057	0,29	0,51	13,63
RP (MPa)	3,27	1,678	1,44	8,39	51,29

Os modelos da curva de resistência do solo à penetração e da curva de retenção de água são apresentados na Tabela 3. Não foram constatados efeitos significativos dos tratamentos nos modelos utilizados para ajustar a CRA e a CRS, identificando-se apenas efeito estatisticamente significativo da camada amostrada (0-7,5 cm e 7,5-15 cm) em ambas as metodologias para CRA bem como para a CRS. Estes resultados corroboram os dados mostrados na Tabela 2 que indicam uma homogeneidade na distribuição dos valores das variáveis resistência do solo à penetração, teor de água e densidade do solo. Apesar do menor coeficiente de determinação do modelo ajustado à CRP à penetração para os dados utilizados para a metodologia alternativa, os valores de F são altamente significativos ($p < 0,001$). Para a CRA, o modelo matemático ajustado aos dados explicou acima de 80% da variabilidade do conteúdo de água em ambas as camadas e metodologias, indicando o sucesso do uso da metodologia alternativa para determinação da CRA. No ajuste da CRA, a densidade mostrou uma influência positiva na variação do conteúdo de água no solo (θ). Os resultados ajustados para a RP apresentaram uma variação positiva para a Ds e negativa para θ , também obtidos por outros autores (TORMENA et al., 1998; ARAUJO et al., 2004; TORMENA et al., 2007).

Os resultados indicam que os dados explicaram melhor o fenômeno de retenção de água do que de RP, como identificado pelos maiores valores de r^2 dos modelos ajustados em todas as camadas. A maior RP na camada de 7,5-15 cm pode ser atribuída ao efeito de máquinas no aumento da Ds, o que implica em maior fricção e coesão entre as partículas e/ou agregados com o secamento do solo. De forma geral, os coeficientes de determinação dos modelos de resistência foram menores na camada subsuperficial, em razão, provavelmente, da maior variabilidade estrutural imposta pelo pisoteio animal, pelo crescimento das raízes das forrageiras e de atividade de mesofauna. Já em superfície, os coeficientes de determinação foram maiores que 65%, similares àqueles obtidos por outros autores em diferentes solos (TORMENA et al., 1998, 1999; LEÃO et al., 2004; CAVALIERI et al., 2006).

Tabela 3 – Ajuste das equações da curva de resistência do solo à penetração e da curva de retenção de água no solo nos diferentes tratamentos e camadas estudadas.

Profundidade	Curva de Resistência do Solo	Curva de Retenção de Água
Modelos ajustados a CRA confeccionada com a metodologia tradicional e CRS		
0-7,5 cm	RP= 0,0659 Ds ^{7,4349} θ ^{-2,4554}	θ = exp ^(-1,0509 + 0,5433 Ds) ψ ^(-0,0846)
	F = 325,21; P< 0,0001; r ² = 0,78	F = 273,77; P< 0,0001; r ² = 0,76
7,5-,15 cm	RP = 0,0597 Ds ^{6,3598} θ ^{-2,6675}	θ = exp ^(-1,1047 + 0,5092 Ds) ψ ^(-0,0785)
	F = 236,62; P< 0,0001; r ² = 0,73	F = 927,08; P< 0,0001; r ² = 0,91
Modelos ajustados a CRA confeccionada com a metodologia alternativa e CRS		
0-7,5 cm	RP = 0,1527 Ds ^{6,1534} θ ^{-1,8018}	θ = exp ^(-0,8612 + 0,4092 Ds) ψ ^(-0,0889)
	F = 165,77; P< 0,0001; r ² = 0,65	F = 1041,59; P< 0,0001; r ² = 0,92
7,5-,15 cm	RP = 0,1222 Ds ^{5,4949} θ ^{-1,9918}	θ = exp ^(-1,0732 + 0,4716 Ds) ψ ^(-0,07805)
	F = 123,84; P< 0,0001; r ² = 0,65	F = 927,08; P< 0,0001; r ² = 0,81

Para a CRA, não se verificou efeito estatisticamente significativo dos tratamentos (p>0,05), indicando que a retenção de água é diferente apenas nas camadas do perfil amostrado de cada tratamento e que a Ds capturou os possíveis efeitos estruturais associados aos tratamentos.

Os coeficientes estimados do modelo da CRS indicam que a resistência variou positivamente com a Ds e negativamente com θ, estando em concordância com os resultados obtidos por vários autores (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999; IMHOFF et al., 2000; LEÃO et al., 2004; CAVALIERI et al., 2006). O aumento da RP com o decréscimo da umidade é um processo bem conhecido relacionado com o aumento na coesão entre as partículas do solo, especialmente com o aumento da Ds. A partir da estimativa dos coeficientes apresentados na Tabela 2, foram obtidos os conteúdos de água em que a resistência à penetração

atingiu 2,5 MPa (θ_{RP}), valor tomado como impeditivo para o crescimento das raízes. Para a CRA, o sinal positivo do coeficiente relacionado com a Ds indica que a retenção de água aumenta com a Ds, corroborando os resultados obtidos por Tormena et al. (2007) e Araújo et al., (2004) neste mesmo solo. O efeito da Ds na retenção de água ocorre por causa da sua influência na porosidade total e na distribuição dos tamanhos de poros (RICHARD et al., 2001).

A variação do conteúdo de água nos limites críticos do IHO para as camadas de 0-7,5 cm e 7,5-15 cm para a metodologia tradicional e alternativa é apresentada nas Figuras 3 e 4. Constatou-se que com o aumento da Ds, ocorreu também aumento do teor de água para manter a resistência a penetração (θ_{RP}) bem como decréscimo do teor de água para manter a porosidade de aeração (θ_{PA}), corroborando com os resultados obtidos por Silva et al., 1994, Tormena et al., 2007, Imhoff et al., 2001, Araújo et al., 2004 e Leão et al., 2004.

Constata-se que o θ_{RP} determinou limite inferior do IHO, indicando que a resistência à penetração é uma variável de maior importância no controle da qualidade física desse solo. O efeito da RP na redução do IHO foi maior na camada de 7,5-15 cm, associado à maior densidade do solo nesta camada, conforme pode ser verificado nas Tabelas 1 e 2 e nos coeficientes dos modelos descritos na Tabela 3.

Estes resultados indicam que, neste solo, o limite inferior de água disponível associado com o potencial de água de 15000 hPa pode ser desconsiderado quando da avaliação da disponibilidade de água no solo e que o mesmo pode ser substituído pelo teor de água em que a RP atinge um valor crítico, especialmente na camada de 7,5-15 cm.

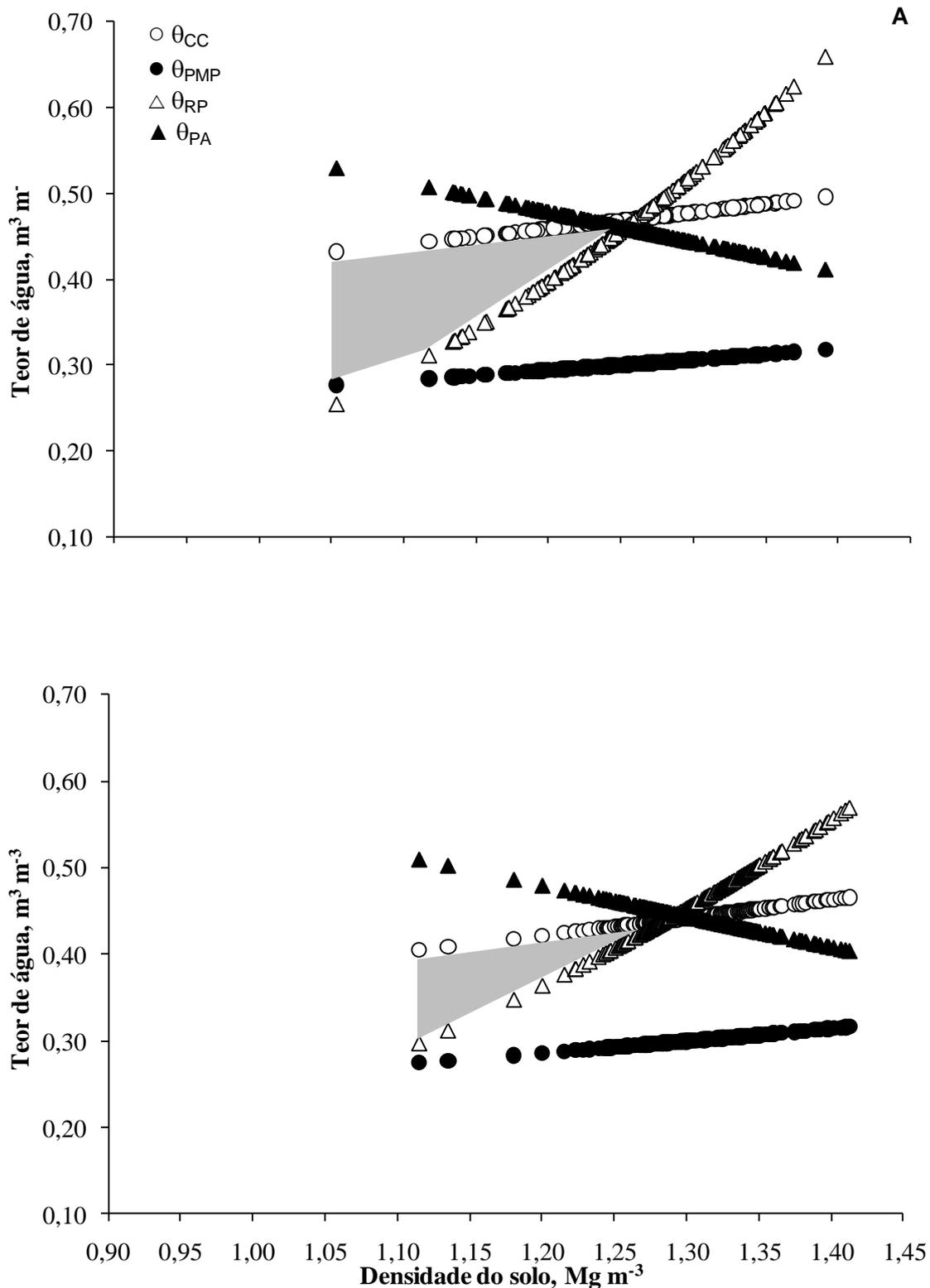


Figura 3 – Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), resistência à penetração (θ_{RP}) e porosidade de aeração (θ_{PA}) nas profundidades de 0-7,5 cm (A) e 7,5-15 cm (B) com uso da metodologia alternativa.

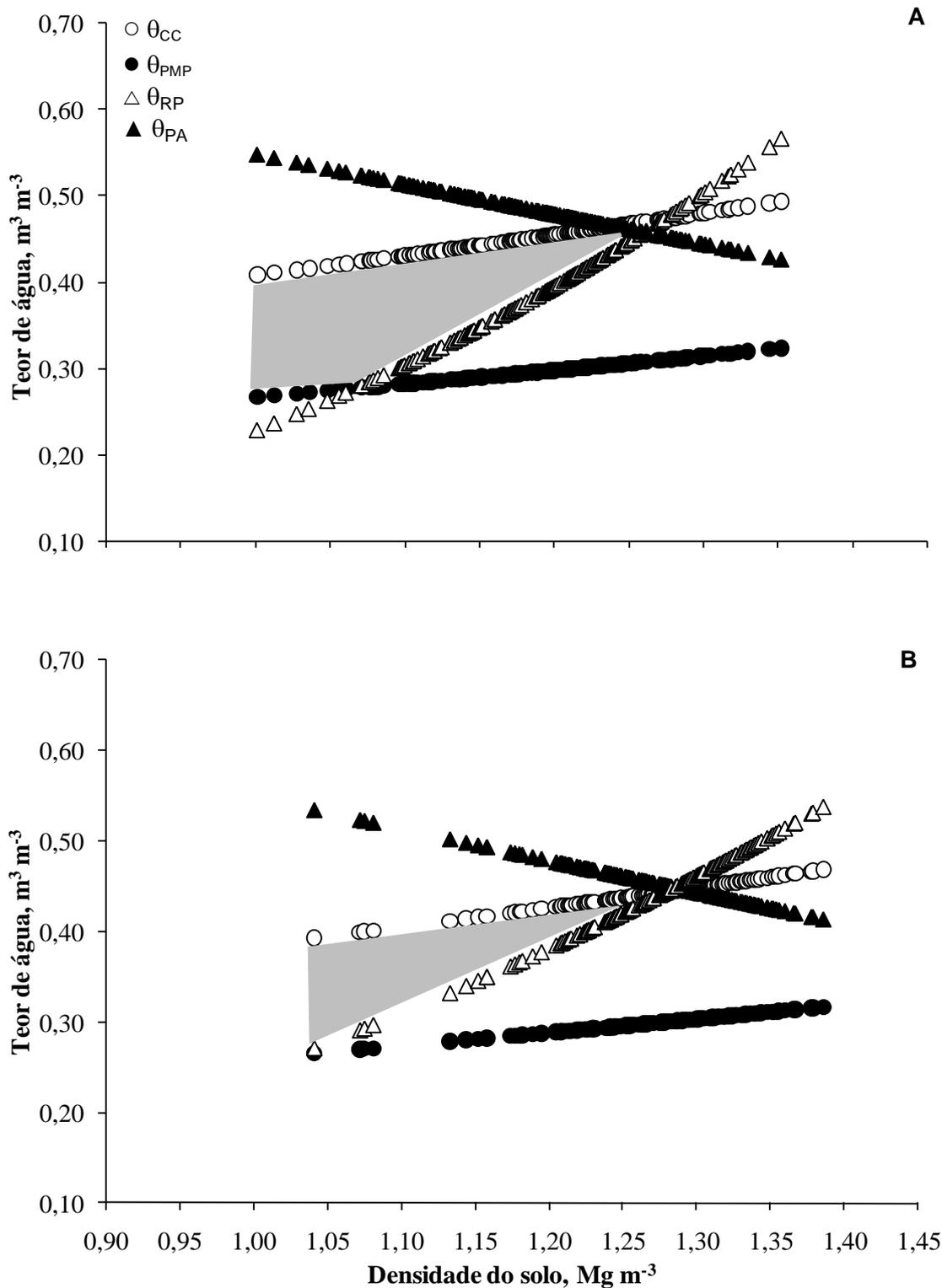


Figura 4 – Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), resistência à penetração (θ_{RP}) e porosidade de aeração (θ_{PA}) nas profundidades de 0-7,5 cm (A) e 7,5-15 cm (B) com uso da metodologia tradicional.

No entanto, deve-se considerar que o valor crítico de resistência pode ser maior em sistema de plantio direto, em função da maior disponibilidade temporal de água associado com a cobertura do solo, especialmente se há formação de uma rede de bioporos contínuos e estáveis associado ao sistema radicular das culturas envolvidas no sistema de rotação adotado. O período de regeneração da vegetação após a saída dos animais e antes do plantio da cultura de verão é de suma importância para a renovação radicular e regeneração dos bioporos eliminados pelo tráfego de máquinas e animais. A θ_{PA} determinou o limite superior do IHO a partir de diferentes valores de densidade nas camadas estudadas, indicando que o aumento na densidade implica em maior perda de água do solo para que se tenham poros sem água em quantidade suficientes para que o fluxo de gases no solo não limite o crescimento das raízes.

Na camada de 0-7,5 cm, os resultados indicam que o IHO foi menos fortemente reduzido devido ao menor impacto da resistência do solo à penetração motivada pela capacidade de regeneração das plantas de aveia+avevém e pela ação dos mecanismos de corte do solo por ocasião da semeadura das culturas. O limite superior do IHO se constitui na θ_{CC} para maior parte dos valores de D_s e para D_s entre 1,25 e 1,27 Mg m⁻³ a θ_{PA} substitui a θ_{CC} como limite superior do IHO nas camadas de 0-7,5 cm e 7,5-15 cm. A análise das Figuras 3 e 4 mostra uma redução gradativa do IHO da camada de 0-7,5 cm para a camada de 7,5-15 cm. Estes resultados mostram que o pastejo excessivo e o pisoteio dos animais não resultou em perda da qualidade física do solo.

A redução do IHO na camada de 7,5-15 cm certamente predispõe as culturas a estresses de resistência sob secamento do solo e de aeração sob condições prolongadas de elevada umidade do solo. Ressalta-se que a disponibilidade de água entre a CC e PMP não sofre variação entre as camadas, mas os tratamentos com reduzida altura de corte das forrageiras podem impor restrições de aeração e resistência dentro dos limites de disponibilidade de água. A degradação física e estrutural do solo observada pela redução do IHO implica em estabelecer limite de oferta de forragem de inverno sob pastejo em sistema de integração lavoura-pecuária. Além disso, é possível que o sistema radicular fino e

abundante da cultura do azevém esteja contribuindo para a manutenção e recuperação da qualidade estrutural do solo que eventualmente sofreu alguma degradação pelo tráfego dos animais.

Na camada de 7,5-15 cm, tanto θ_{CC} como θ_{PA} determinaram o limite superior do IHO, obviamente que com o aumento da D_s a θ_{PA} substitui a θ_{CC} como limite superior do IHO. Os valores de D_s , em que θ_{PA} substitui a θ_{CC} como limite superior, variam entre 1,25-1,27 Mg m⁻³. Por outro, o limite inferior do IHO é determinado pela θ_{RP} em todos os tratamentos, reafirmando que nesse solo, a RP desempenha papel importante na qualidade física do solo. Nessa camada, é provável que os efeitos do pisoteio animal não tenham contribuído diretamente para alterar as propriedades físicas do solo, uma vez que a faixa de valores de D_s é similar entre os tratamentos. A forte redução do IHO nesta profundidade pode estar relacionada com a menor resiliência do solo devido o menor crescimento radicular das forrageiras de inverno e da menor área foliar estabelecida pelo frequente consumo das mesmas pelos animais. As razões para comportamento físico do solo diferenciado, entre as camadas, podem estar relacionadas a uma melhoria da atividade biológica via maior atividade e crescimento das raízes da cultura da aveia e posteriormente do azevém em superfície, em função das diferenças de ciclo vegetativo entre as duas culturas. É possível que outros efeitos relacionados com a deposição de fezes e urina dos animais possam ter contribuído para a melhoria das condições físicas e químicas importantes para maior atividade de microrganismos e da mesofauna do solo, com efeitos na estrutura do solo da camada de 0-7,5 cm.

A maior amplitude do IHO na camada de 0-7,5 cm indica que a integração lavoura-pecuária cria um ambiente físico positivo no solo desde que a carga animal seja adequada. Alturas de pastejo que permitam manter altas taxas de fotossíntese parecem ser importantes para a renovação de tecidos e consequente manutenção e desenvolvimento do sistema radicular. Nessa camada, o maior valor do IHO no perfil amostrado, possibilita menores riscos de estresses de natureza física nesse solo em função das variações na disponibilidade de água em virtude do clima.

O IHO corresponde ao intervalo de umidade na qual as plantas possuem mínimas restrições ao seu crescimento e desenvolvimento. O valor de densidade, no qual ocorre interseção das linhas referentes aos limites superior e inferior do IHO, ou seja, em que o IHO é igual a zero, foi denominado por Imhoff et al. (2001) como densidade do solo crítica (Dsc). A Dsc serve para avaliar quantitativamente o impacto do manejo adotado numa determinada área em relação ao grau de limitação física do solo para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Os valores de Dsc obtidos da relação entre o IHO e a Ds para as camadas amostradas e metodologias empregadas são mostrados na Figura 5. Na camada de 0-7,5 cm de profundidade, os valores de Dsc foram de 1,25 e 1,26 Mg m⁻³ utilizando ambas metodologias, indicando que a metodologia de determinação da CRA utilizando o secamento das amostras em estufa produziu resultados similares à metodologia tradicional que emprega equipamentos de alto custo e prolongado tempo de determinação da CRA, a qual é necessária para estimar o IHO e por consequência a Dsc. Para a camada de 7,5-15 cm, os valores de Dsc foram exatamente de 1,28 Mg m⁻³, corroborando que a metodologia alternativa é precisa e adequada para estimar a CRA e o IHO.

Estes resultados consolidam o esforço na busca de alternativas metodológicas para o estudo da qualidade física do solo em sistemas agrícolas, notadamente em sistemas de integração lavoura-pecuária. Quanto menor o valor de Dsc aumenta-se as chances em que a densidade do solo atinge valores maiores que Dsc, indicando uma maior frequência de condições físicas impeditivas às plantas. Neste sentido, na camada de 0-7,5 cm verificou-se uma redução no valor da Dsc, indicando os impactos estruturais decorrentes do pisoteio dos animais e do manejo que podem resultar em plantas com menor capacidade de recuperação da massa da parte aérea e do sistema radicular.

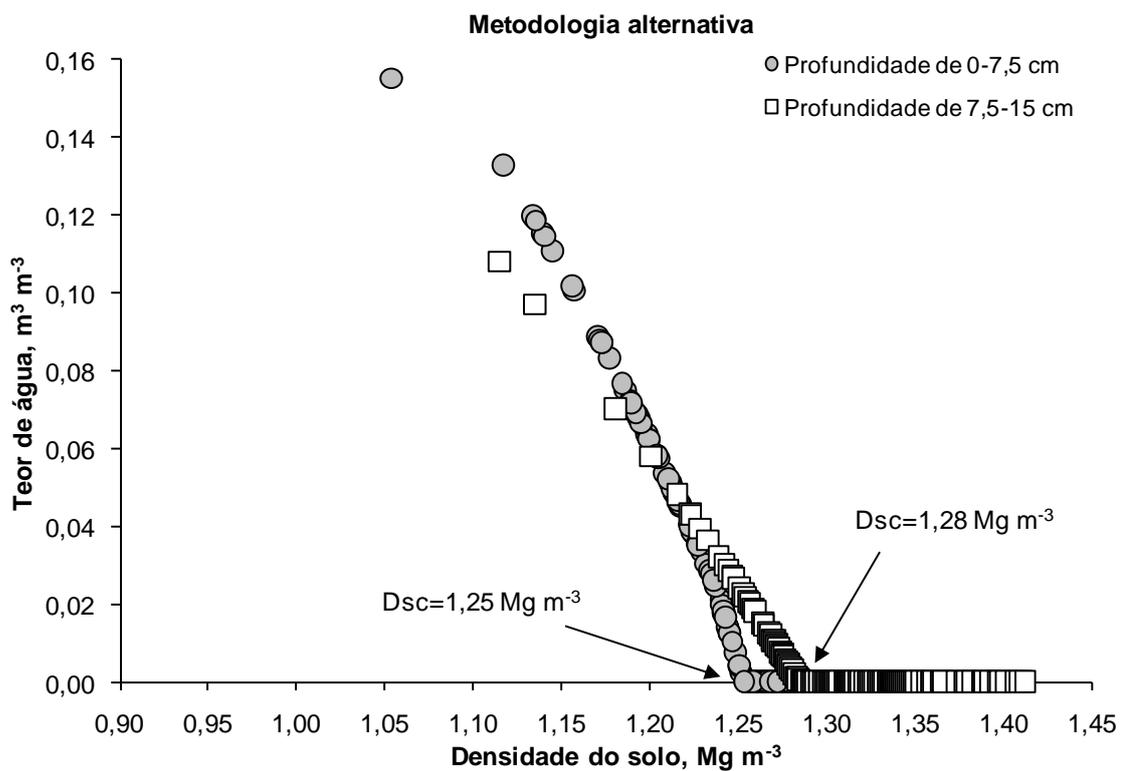
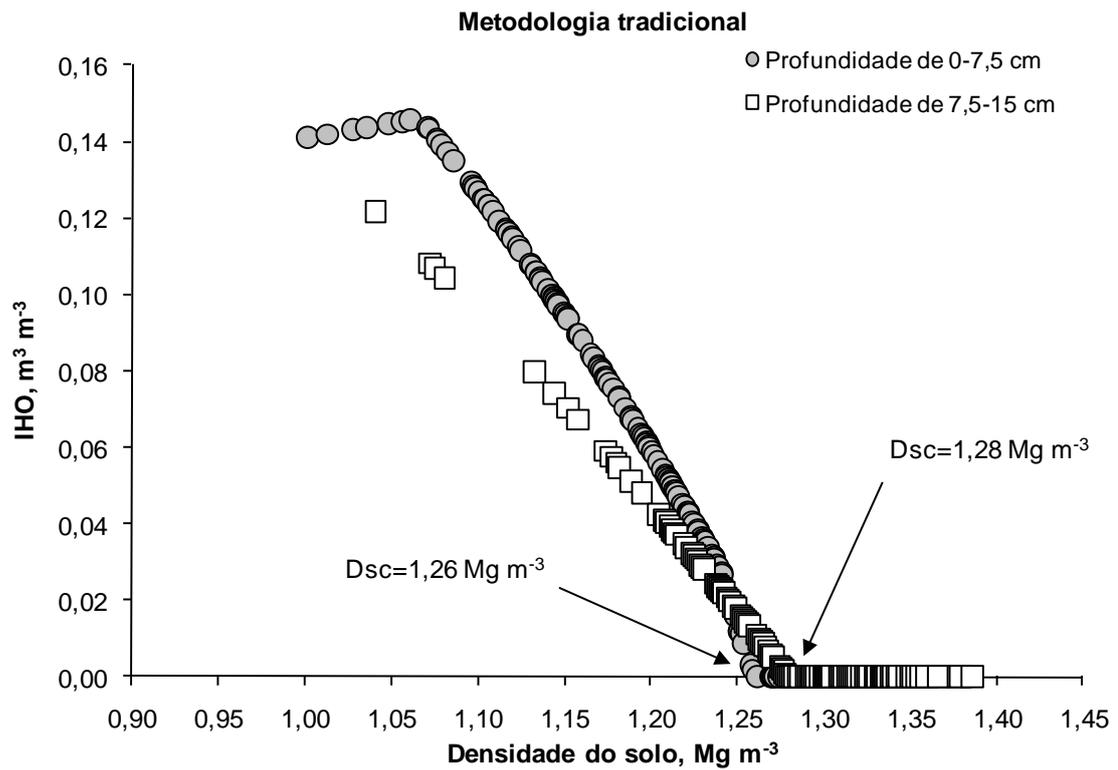


Figura 5 – Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e densidade do solo para as metodologias empregadas na pesquisa e respectivos valores de densidade do solo crítica do solo (Dsc).

Os valores médios de densidade do solo e respectivos intervalos de confiança da média obtidos nos diferentes tratamentos e profundidades em outubro/2008, março/2009, outubro/2009 e março de 2010 são apresentados na Figura 6. A obtenção dos valores críticos de D_s por meio do IHO permite um critério quantitativo para ser utilizado no monitoramento da qualidade física do solo. A variabilidade da densidade do solo pode ser verificada na Figura 6, indicando que fisicamente o solo, mesmo em plantio direto, não é estável ou consolidado como geralmente tem sido indicado na literatura. Na camada de 0-7,5 cm verifica-se que houve variações importantes de D_s tanto entre os tratamentos como entre as épocas de coleta. Os tratamentos de 7 e 14 cm de altura de corte da pastagem (maior intensidade de pastejo) apresentaram-se com os valores médios de densidade acima do valor crítico apenas em outubro/2008 e abaixo do valor crítico nas outras épocas de coleta. Já o tratamento 21 cm, apresentou-se com valores médios de D_s , em geral, abaixo do valor crítico, indicando a elevada qualidade física do solo neste tratamento, resultante da combinação de intensidade intermediária de pastejo e elevada proporção de azevém na pastagem, contribuindo para a resiliência do solo após o tráfego dos animais. Este comportamento foi similar à testemunha, indicando que é possível manter um sistema relativamente intenso de pastejo e qualidade física do solo. Para o tratamento 28 cm, a variabilidade da qualidade física devido a densidade média se posicionar acima ou abaixo da D_{sc} pode ser devido a reduzida massa de azevém e reduzido ciclo da cultura da aveia, interferindo no potencial de recuperação após o tráfego dos animais. Estes dados indicam que para manter a qualidade física do solo, uma altura de pastejo em torno de 20 cm seria mais adequada, pois estimularia a permanência de maiores quantidades de plantas de azevém, devido ao menor efeito competitivo da aveia no início do período de pastejo. Para os outros tratamentos, a maior quantidade de plantas de aveia devido a germinação mais rápida das suas sementes, resulta numa menor quantidade de plantas de azevém, o que interfere na resiliência natural do solo. O efeito do crescimento radicular e a dessecação do solo intensificam os ciclos de secagem e umedecimento e a agregação do solo.

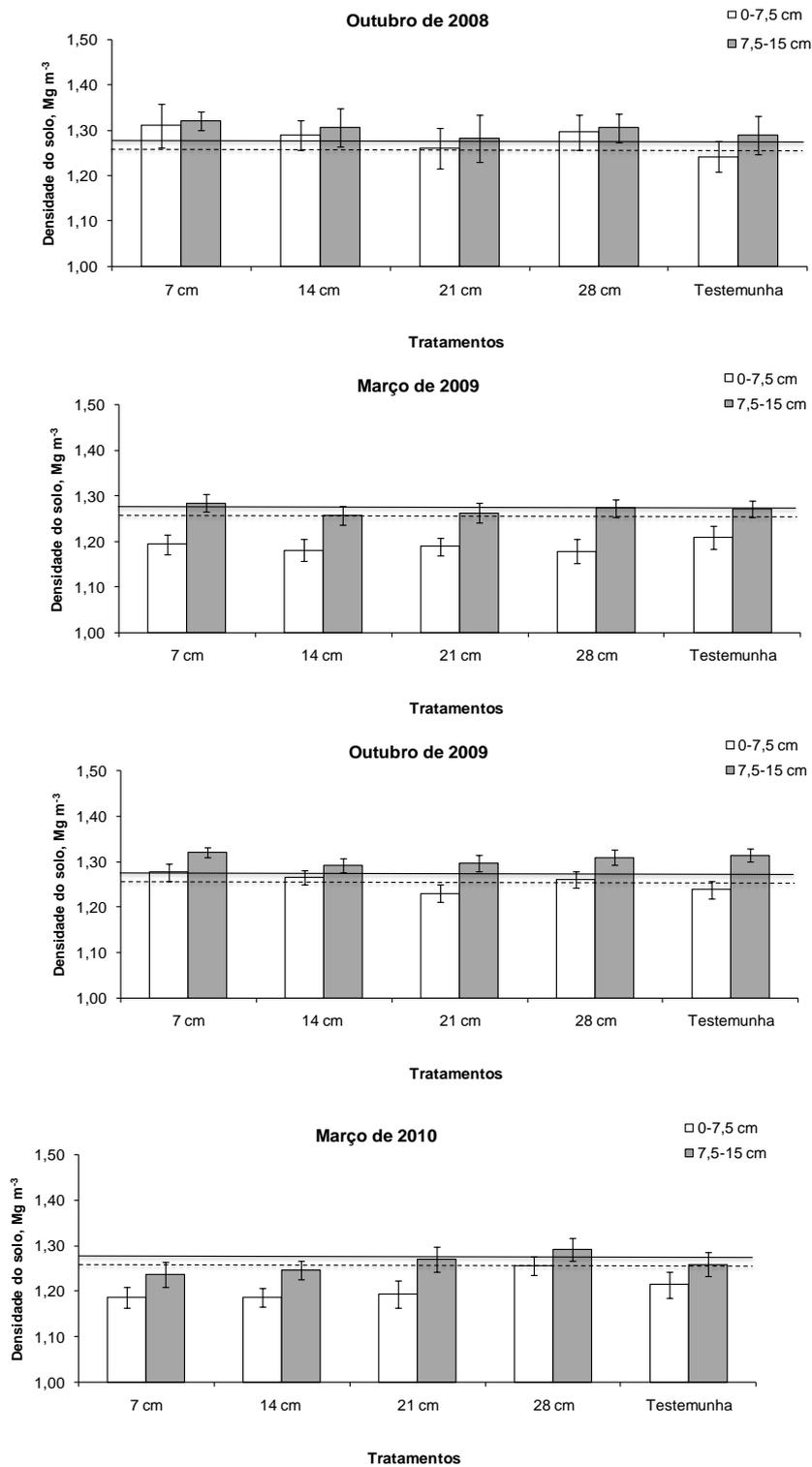


Figura 6. Variação da densidade do solo média nos diferentes tratamentos e épocas de amostragem para fins de monitoramento da qualidade física do solo a partir da Dsc. Linha pontilhada indica Dsc referente à camada de 0-7,5 cm e linha cheia refere-se a Dsc da camada de 7,5-15 cm. As barras indicam o intervalo de confiança da média.

Na camada de 7,5-15 cm, de forma geral, os valores médios de Ds estão próximos ou acima da Dsc para todos os tratamentos (Figura 6). Estes resultados sugerem que a elevada população de plantas de azevém nos tratamentos 7, 14 e 21 cm não propiciaram o crescimento de raízes em profundidade que promovesse o alívio da compactação do solo. Ressalta que os maiores valores de Ds na camada de 7,5-15 cm tem sido verificados em outros estudos realizados neste experimento (PETEAN et al., 2009 e PETEAN et al., 2010), a qual está associada aos efeitos do tráfego de máquinas durante as operações de manejo das culturas de verão. Uma maior compactação do solo em sistema de plantio direto tem sido verificada nesta camada, o que corrobora para a ausência de transferência de cargas do tráfego de animais abaixo desta camada, concentrando-se na camada de 0-7,5 cm.

Nesse estudo, a resistência do solo à penetração foi o fator que assumiu maior importância na redução do IHO. O estabelecimento de níveis críticos das propriedades físicas do solo para o crescimento das plantas é bastante complexo e de certa forma até subjetivo, pois envolve a integração de variáveis relacionadas com o solo, clima e planta. Os valores para os limites críticos utilizados no cálculo do IHO foram obtidos da literatura, como indicado em Silva et al. (1994), Topp et al. (1994) e Tormena et al. (1998, 1999). Leão et al. (2005) argumentam que, para a definição dos limites críticos do IHO, é recomendado que se mudem os valores dos limites críticos conforme as condições experimentais e o conhecimento dos processos ou fenômeno envolvidos nos limites críticos. Nesse sentido, a utilização do valor de resistência do solo à penetração de 2,5 MPa como valor crítico ainda pode ser ampliado visto às excelentes produtividades obtidas nesses solos, em especial na área experimental. Provavelmente, a rede de poros estabelecidos pelas raízes das forrageiras influencia significativamente a produção de bioporos no solo, os quais estabelecem o funcionamento físico apesar da maior densidade do solo, a exemplo dos resultados de Ehlers et al. (1983) e Willians e Weil (2004).

De forma geral, tendo em conta os resultados obtidos com IHO apontam para a necessidade de controle rigoroso de entrada de animais na área sob

pastejo, especialmente quando sob condições de elevados teores de água no solo, o que favorece a compactação do solo pelos cascos dos animais. Há necessidade de um acompanhamento criterioso da qualidade física dos solos sob integração lavoura-pecuária, o que pode ser viabilizado empregando os indicadores de qualidade física como o IHO bem como as metodologias empregadas para fazer o monitoramento físico do solo. Na camada de 7,5-15 cm, a distribuição das proporções de amostras com $D_s > D_{sc}$ IHO=0 não mostra um comportamento sistemático ligado ao tráfego e compactação pelo pisoteio animal, ainda que a testemunha apresente a menor percentagem de amostras com $D_s > D_{sc}$. Esses resultados dão suporte à afirmação de que a compactação pelo tráfego dos animais bovinos ocorre concentrada na camada superficial, e nesse estudo, na camada de 0-7,5 cm, os efeitos dos sistemas pretéritos de manejo anterior a introdução do sistema de integração lavoura-pecuária ainda influenciam a qualidade física do solo.

5.4. CONCLUSÕES

a) A metodologia “alternativa” para obter a CRA foi precisa e adequada para a quantificação do IHO.

b) A camada de 7,5-15 cm apresentou as maiores restrições física ao crescimento das plantas associadas ao aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração;

c) Os limites de densidade do solo crítica estabelecidos pelo IHO não foram influenciados pela estratégia de obtenção da curva de retenção de água no solo.

d) A metodologia proposta de elaborar a curva de retenção por secamento e medir o potencial com minitensiômetros e psicrometria mostrou-se adequada para estimar o IHO, capturando os efeitos da estrutura entre as camadas amostras.

e) Nos tratamentos 7 e 14 cm, a degradação física do solo é mais elevada e certamente predispõe as culturas a estresses de resistência sob secamento do solo e de aeração sob condições prolongadas de elevada umidade do solo.

f) Os resultados indicaram que a qualidade física do solo estudado sob integração lavoura-pecuária pode ser mantida em condições favoráveis ao crescimento das plantas adotando um sistema de pastejo das forrageiras de inverno que mantenha acima de 21 cm de massa residual destas forrageiras.

5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-MAGID, A.H.; TRLICA, M.J.; HART, R.H. Soil and vegetation responses to simulated trampling. **Journal of Range Management**, v.40, n.4, p.303-306, 1987.

ALVIM, J.M. **Produção e utilização de forrageiras de inverno: aveia e azevém**. Coronel Pacheco: EMBRAPA Gado Leiteiro, 1989. 28p. (Embrapa Gado Leiteiro. Documentos, 42)

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-34, 2004.

BALPH, D.F.; MALECHECK, J.C. Cattle trampling of crested wheat-grass under short-duration grazing. **Journal of Range Management**, Arizona, v. 38, n. 3, p. 226-227, 1985

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; McKENNA, S.J.; ROBERTS, T. & VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v.57, n.4 , p.437-443, 2006

BENJAMIN, J.G.; NIELSON, D.C.; VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, n.1,p.137-148, 2003.

BETZ, D.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.62, n.5, p.1384-1393, 1998.

BITTELLI M.e M. FLURY.. Errors in water retention curves determined with pressure plates and their effect on soil hydraulic functions. **Soil Science Society of America Journal**., Madison, v.73, n.5 ,p.1453-1460, 2009

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison:**America Society of Agronomy**, 1986. cap.13, p.363-375.

BOONE, F.R. Wheater and other enviromental factors influencing crop responses to tillage and traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3, p.283-324, 1988.

BUSBY, F.E., GIFFORD, G.F. Effects of livestock grazing on infiltration and erosion rates measured on chained and unchained pinyon-juniper sites in southeastern Utah. **Journal of Range Management.**, Lakewood, v.34,n.4, p.400-405, 1981.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transaction of American Society Agricultural Engineering**. St Joseph, V. 3, n.2, p.519-524, 1990.

CARTER, M. R.; ANGERS, D. A. & TOPP, G. C. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. **Soil Science.**, Madison v.164, n.2, p.101-110, 1999.

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.

COLLARES, G. L. ; REINERT, D. J. ; REICHERT, J. M. ; SANTI, G. R. ; PAULETTO, E. A. ; PINTO, L. F. S. . **Retenção de Água Medida pelo Método de Placas Porosas de Richards e pelo Psicrômetro de Termopar**. In: XIV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 2002, Cuiabá - MT. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002.

DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N.; KOPKE, U. **Controle de erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo**. GTZ/IAPAR, 1991. 271p.

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

DEXTER, A.R. & BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research.**, Amsterdam, v.57, n.2, p.203-212, 2001.

EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in the tilled an untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.3, n.3, p.261-275, 1983

FONTANELI, R.S.; FREIRE JR, N. Avaliação de consorciações de aveia e azevém-anual com leguminosas de estação fria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.5, p.623-630,1991.

FONTANELI, R.S.; SANTOS, H.P.; REIS, E.M.; AMBROSI, I. Efeito da rotação de culturas com pastagens anuais de inverno no rendimento de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.10, p.1581-1586, 1998.

FONTANELI, R.S., SANTOS, H.P., VOSS, M., AMBROSI, I. Rendimento e nocolação de soja em diferentes rotações de espécies anuais de inverno sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n2. p.349-55, 2000.

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

GLINSKI, J. & LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton: CRC Press, 1990. 250p.

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, n. 1, p. 180-186, 1968.

GUÉRIF, J. Effects of compaction on soil strength parameters. In: SOANE, B.D., van OUWERKERK, C. (Eds.) *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: **Elsevier Science**, 1994. p.191-214.

HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.95-158, 1985.

HAYNES, R.J., SWIFT, R.S. & STEPHEN, R.C. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. **Soil and Tillage Research.**, Amsterdam, v.19, n.1 ,p.77-87, 1991.

HORN, R., LEBERT, M. Compactability and compressibility. In: SOANE, B.D., van OUWERKERK, C. (Eds.) *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: **Elsevier Science**, 1994. p.45-70.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A. P.; FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of American Journal.**, Madison, v.68, n.1 ,p.17-24, 2004.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; DIAS JR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

KAY, B.D. **Assessing the suitability of different soils for new cropping systems in terms of rates of change in soil structure.** In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R. et al. (Ed.). *Mechanics and related processes in structured agricultural soils.* Dordrecht: Elsevier, 1989. cap.17, p.223-232. (NATO Series Applied Sciences).

KAY, B.D.; SILVA, A.P. & BALDOCK, J.A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: Predictions using pedotransfer functions. **Canadian Journal of Soil Science.**, Ottawa, V.77, n.4 ,p.655-667, 1997.

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

KLUTE, A. Water retention: Laboratory Methods. In A. KLUTE (ed). *Methods of Soil Analysis - Physical and Mineralogical Methods.* **America Society of Agronomy.** Madison, cap.26, p. 635-660. 1986.

KUIPERS, H. & van de ZANDE, J.C. Quantification of traffic systems in crop production. In: SOANE, B.D., van OUWERKERK, C. (Eds.) *Soil compaction in crop production.* Amsterdam: **Elsevier Science**, 1994. p.417-46.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.1, p.151-170, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, n.4, p.1210-1215, 2005.

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

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

LEWIS, C.E. Simulated cattle injury to planted slash pine: combination of defoliation, browsing and trampling. **Journal of Range Management**, Lakewood, v.33, n.1 p.340-345, 1980.

MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; DOURADO NETO, D.. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção da água pelo solo. **Scientia Agricola**. Piracicaba, v.50, n.3 ,:383-392, 1993 .

MULHOLLAND, B.; FULLEN, M.A. Cattle trampling and soil compaction on loamy sands. **Soil Use and Management**, v.7 n.1, p.189-193, 1991.

PETEAN, L.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ALVES, S.J. Altura de pastejo de aveia e azevém e qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico sob integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.30, suplemento n.1:1009-1016, 2009.

PETEAN, L. P., TORMENA, C.A., & ALVES, S.J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.5, p.1515-1526, 2010.

POSTIGLIONI, S.R. Comportamento da aveia, azevém e centeio na região dos Campos Gerais, PR. Londrina: IAPAR, 1982. 18p. (Iapar. Boletim Técnico, 14)

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.12, n2. P.211-16, 1988.

RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J. F.; BRUAND, A.; GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**, Oxônia, v.52, n.1,p.49-58, 2001.

SALTON, J.C., HERNANI, L.C. & FONTES, C.Z. Sistema plantio direto. O produtor pergunta a Embrapa responde. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação, 1998. 248p. (Coleção 500 perguntas 500 respostas)

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soilwater availability. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.4, p.644-651, 1996.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREDJA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Science*, v. 164, n. 4, p. 224-234, 1999.

SCHOLEFIELD, D.; PATTO, P.M.; HALL, D.M. Laboratory research on the compressibility of four topsoils from grassland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v.6 n.1., p.1-16, 1985.

SIEGEL-ISSEM, C.M.; BURGER, J.A.; POWERS, R.F.; PONDER, F. & PATERSON, S.C. Seedling root growth as a function of soil density and water content. **Soil Science Society of American Journal**. Madison, v.69, n.2, p.215-226, 2005.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant Soil**, Dordrecht, v.184, n.2 p.323-329, 1996.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.877-883, 1997a.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775 -1781, 1994.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.3, p.884-888, 1997b.

SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. Soil compaction problems in world agriculture. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. (Eds.) *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p.1-22.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. *SAS/STAT Procedure guide for personal computers*. Version 5, SAS Inst. Cary, NC. 1999.

STEPNIEWSKI, W., GLINSKI, J. & BALL, B.C. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. (Eds.) *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p.167-190.

STIRZAKER, R.J. Processing tomato response to soil compaction and fumigation. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v.37, n.2 , p.477-483, 1997.

STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; CASANOVAS, E.M. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a typic Argiudoll. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.4, 1466-1472, 1997.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction: Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.30, n.2/4, p.217-243, 1994.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JR, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.102, n.1, p.18-22, 1966.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure. Soil Quality Evaluation Program. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36p. (Technical report, 2).

TORMENA, C.A. & ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n. 2, p.301-309, 1996.

TORMENA, C.A. & SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.2, p.305-314, 2002.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

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, 1998a.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.4, p.573-581, 1998b.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a brazilian oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research.**, v.52, n.3-4, p.223-232, 1999.

VEREecken, H.; MAES, H.; FEYEN, J.; DARIUS, P. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*, v.148, n.6, p.389-403, 1989.

WEAICH, K.; CASS, A. & BRISTOW, K.L. Pre-emergent shoot growth of maize (*Zea mays*, L.) as a function of soil strength. **Soil and Tillage Research.**, v.40, n1/2, p. 3-23, 1996.

WILLIAMS, S.M. & WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science. Society of American Journal**, Madison, V.68, n4 , p.1403-1409, 2004.