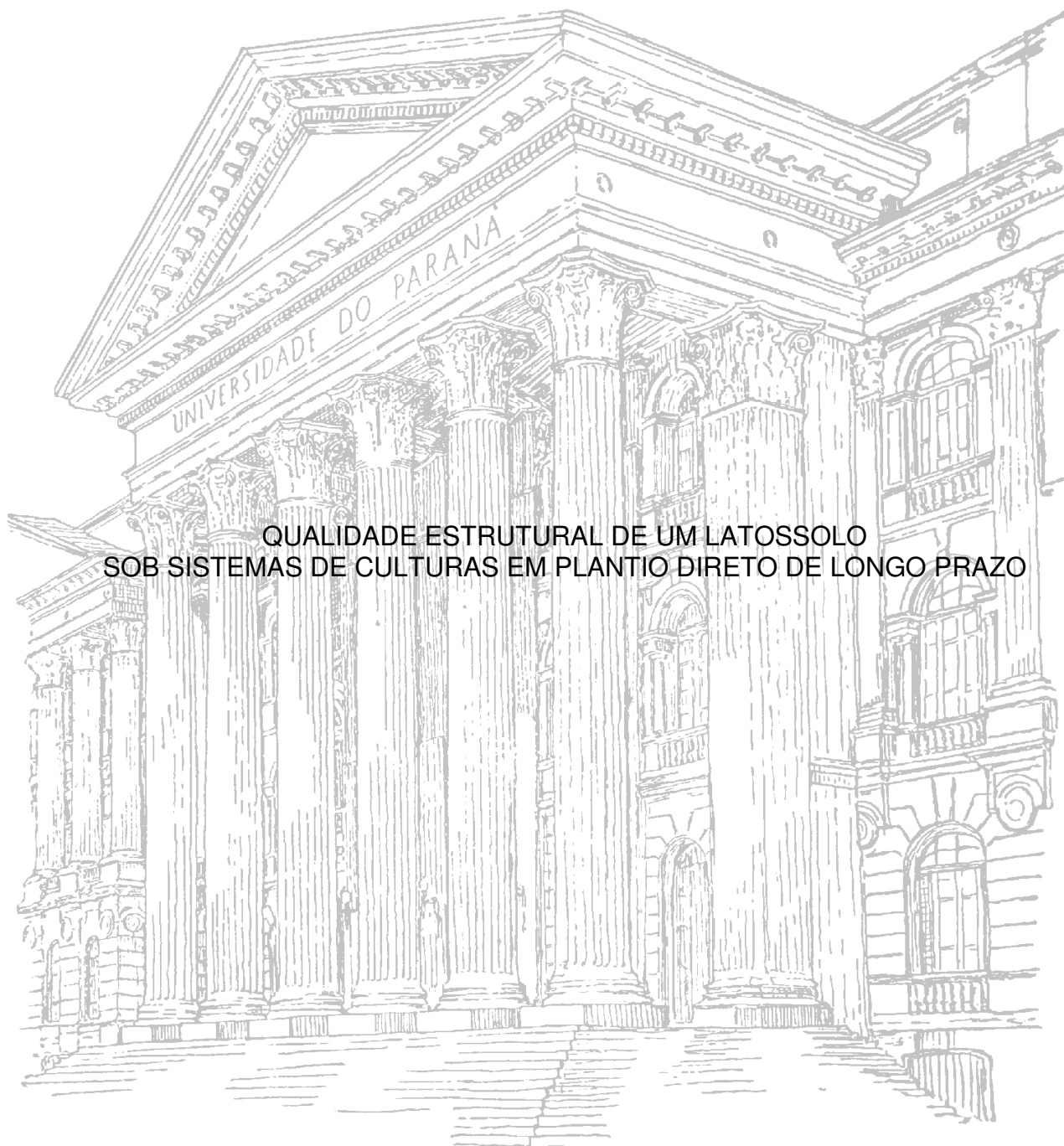


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VAGNER LOPES DA SILVA



QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO
SOB SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO DE LONGO PRAZO

CURITIBA
2009

VAGNER LOPES DA SILVA

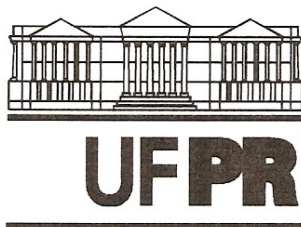
QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO
SOB SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO DE LONGO PRAZO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Pedologia e Manejo do Solo, Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná para a obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador:
Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Co-orientadora:
Prof^a. Dra. Nerilde Favaretto

CURITIBA
2009

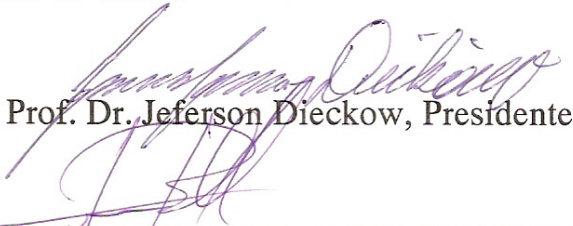


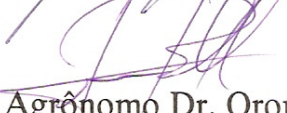
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO (MESTRADO)
Rua dos Funcionários, 1540-Curitiba/PR-80035-050-Fone/Fax 41-3350-5648
Página: www.pgcsolo.agrarias.ufpr.br/
E-mail: pgcsolo@ufpr.br

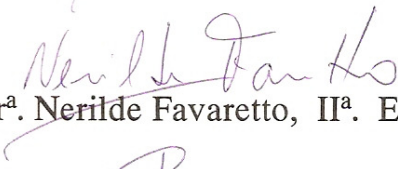
PARECER

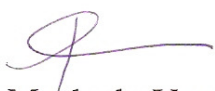
Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **VAGNER LOPES DA SILVA**, sob o título: "**Qualidade estrutural de um Latossolo sob sistemas de culturas em plantio direto de longo prazo**", requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo – Área de Pedologia e Manejo do Solo, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haverem analisado o referido trabalho e argüido o candidato, são de Parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração: "Pedologia e Manejo do Solo"**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 28 de agosto de 2009.


Prof. Dr. Jeferson Dieckow, Presidente


Engenheiro Agrônomo Dr. Oromar João Bertol, Iº. Examinador


Profª. Drª. Nerilde Favaretto, IIª. Examinadora


Profª. Drª. Fabiane Machado Vezzani, IIIª. Examinadora



Dedico este trabalho a todos os jovens que por vários motivos não concluíram seus estudos, mas principalmente àqueles que lutam por uma sociedade mais justa e que não se deixam abater pela força da “roda viva”.

Se as inquietudes fizessem parte da vida dos oprimidos, não teríamos mais oprimidos, teríamos sim nações soberanas.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná – UFPR.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo – PGCS – aos professores e colegas do curso.

À Fundação Araucária, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro.

À Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária, pelo apoio e aos seus técnicos, pelo auxílio nas coletas de amostras de solo.

Ao meu orientador Jeferson Dieckow pelos valiosos estímulos e orientações.

À Dona Elda Nazareth, pelo auxílio nas análises laboratoriais.

Aos meus colegas pelo convívio.

Ao grande amigo Herlon Nadolny pelos grandes ensinamentos da vida e incentivo aos estudos.

À toda minha família, aos meus pais Zilmar, Erli e meus irmãos Leonardo e Bruno e a minha madrinha Gelsa pela confiança à mim destinada e a minha companheira Ana Paula pelos estímulos e apoio durante todos os dias de mais esta etapa da minha vida.

RESUMO

Plantio direto de qualidade depende, entre vários fatores, de um manejo adequado do solo que promova sua qualidade estrutural; e isso resulta, também entre vários fatores, de um adequado sistema de culturas baseado em rotação. O objetivo deste trabalho foi avaliar a contribuição de sistemas de culturas de longo-prazo (18 anos) na qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho sob plantio direto nos Campos Gerais do Paraná. Foram avaliados cinco sistemas de culturas: trigo-soja [Tr-So]; aveia-milho-trigo-soja [Av-Mi-Tr-So]; ervilhaca-milho-trigo-soja [Er-Mi-Tr-So]; azevém-milho-azevém-soja [Az-Mi-Az-So]; e alfafa-milho [Alf-Mi]. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, em anéis volumétricos (5,6-cm de diâmetro e 3,1-cm de altura) e em torrões (10 cm × 10 cm × espessura da camada). Na camada de 0-5 cm, as menores densidades de solo ocorreram nos sistemas Av-Mi-Tr-So ($0,96 \text{ Mg m}^{-3}$) e Er-Mi-Tr-So ($0,93 \text{ Mg m}^{-3}$). Nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, as menores densidades ocorreram no sistema Alf-Mi (1,14 e $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente). Tendência coerente foi observada para a macroporosidade, que na camada superficial foi maior nos sistemas Av-Mi-Tr-So ($0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e Er-Mi-Tr-So ($0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e nas camadas de 5-10 e 10-20 cm tendeu a ser maior no sistema Alf-Mi ($0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A microporosidade não apresentou tendência clara entre os sistemas. A condutividade hidráulica saturada teve relação direta com a macroporosidade, com Er-Mi-Tr-So apresentando o maior valor na camada de 0-5 cm (224 mm h^{-1}) e Alf-Mi nas camadas de 5-10 (170 mm h^{-1}) e 10-20 cm (147 mm h^{-1}). O sistema Er-Mi-Tr-So apresentou o menor diâmetro médio ponderado úmido de agregados na camada de 0-5 cm (2,39 mm) enquanto Tr-So o maior (3,04 mm). Os maiores valores de resistência à penetração foram observados no sistema Tr-So, superando 1,5 MPa na camada de 7,5 a 22,5 cm de profundidade. O sistema Alf-Mi apresentou o menor grau de compactação ($0,2 \text{ MPa cm}$). Os resultados para os atributos físicos são atribuídos principalmente à ação das raízes das espécies que constituem os sistemas de culturas, e a intensidade de tráfego de máquinas em cada sistema. Considerando-se a camada de 0-20 cm como um todo, o sistema semi-perene Alf-Mi possui maior capacidade em promover melhorias na qualidade estrutural do solo em relação aos sistemas baseados em cultivos de espécies anuais. Sistemas bi-anuais de rotação, baseados em plantas de cobertura como aveia preta ou ervilhaca possuem maior capacidade em promover melhorias na qualidade estrutural do solo em relação à sucessão trigo – soja.

Palavras-chave: plantas de cobertura, leguminosas, índice de cone, agregação do solo, Campos Gerais.

ABSTRACT

No-tillage quality depends, among several factors, on an adequate soil management that promotes structural quality; and this derives from, also among several factors, an adequate cropping system based on rotation. This study aimed at investigating the contribution of long-term cropping systems (18 years) to the structural quality of a no-tillage Ferralsol (Latossolo Vermelho) in Campos Gerais region, Paraná, Brazil. We assessed five cropping systems: wheat-soybean [Wt-So], black oat-maize-wheat-soybean [Ot-Mz-Wt-So], vetch-maize-wheat-soybean [Vt-Mz-Wt-So], ryegrass-maize-ryegrass-soybean [Rg-Mz-Rg-So]; and alfalfa-maize [Alf-Mz]. Soil samples were collected in 0-5, 5-10 and 10-20 cm layers, in cylinders (5.6-cm diameter and 3.1-cm height) and in blocks (10 cm × 10 cm × thickness of the layer). In 0-5 cm layer, the lowest bulk densities occurred in Ot-Mz-Wt-So (0.96 Mg m^{-3}) and Vt-Mz-Wt-So systems (0.93 Mg m^{-3}). In 5-10 and 10-20 cm layers, the lowest bulk densities occurred in Alf-Mz systems (1.14 and 1.17 Mg m^{-3} , respectively). Coherent trend was observed to macroporosity, which in the top layer was greater in Ot-Mz-Wt-So ($0.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) and Vt-Mz-Wt-So ($0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) and in 5-10 and 10-20 cm layers tended to be greater in Alf-Mz system ($0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Microporosity did not show a clear trend among systems. The saturated hydraulic conductivity had a direct relationship with macroporosity, with Vt-Mz-Wt-So showing the highest value in the 0-5 cm layer (224 mm h^{-1}) and Alf-Mz in 5-10 (170 mm h^{-1}) and 10-20 cm layers (147 mm h^{-1}). The Vt-Mz-Wt-So system showed the smaller mean weight diameter of aggregates in the 0-5 cm layer (2.39 mm) while Wt-So the greater (3.04 mm). The highest cone index values were observed in Wt-So system, surpassing 1.5 MPa in the 7.5 to 22.5 cm layer. The Alf-Mz system showed the lowest compaction degree (0.2 MPa). The results of physical attributes are attributed mainly to the roots action of species that constitute cropping systems, and to the intensity of machinery traffic on each system. Considering the 0-20 cm layer as a whole, the semi-perennial Alf-Mz system showed greater capacity to promote soil structural quality improvements compared to systems based on annual species. Bi-annual rotation systems, based on cover crops like black oat and vetch have greater capacity to promote soil structural quality improvements compared to the wheat – soybean succession.

Keywords: cover crops, legumes, cone index, soil aggregation, Campos Gerais.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Densidade do solo em função de sistemas de culturas em plantio direto, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Tr-So = trigo – soja; Av-Mi-Tr-So = aveia-milho-trigo-soja; Er-Mi-Tr-So = ervilhaca-milho-trigo-soja; Az-Mi-Az-So = azevém-milho-azevém-soja; Alf-Mi = alfafa-milho. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey $P<0,10$ (ns: não significativo; * significativo a 10 %).10

FIGURA 2 - Macroporosidade do solo em função de sistemas de culturas em plantio direto, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Tr-So = trigo – soja; Av-Mi-Tr-So = aveia-milho-trigo-soja; Er-Mi-Tr-So = ervilhaca-milho-trigo-soja; Az-Mi-Az-So = azevém-milho-azevém-soja; Alf-Mi = alfafa-milho. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey $P<0,10$ (ns: não significativo; * significativo a 10 %).12

FIGURA 3 - Microporosidade do solo em função de sistemas de culturas em plantio direto, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Tr-So = trigo – soja; Av-Mi-Tr-So = aveia-milho-trigo-soja; Er-Mi-Tr-So = ervilhaca-milho-trigo-soja; Az-Mi-Az-So = azevém-milho-azevém-soja; Alf-Mi = alfafa-milho. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey $P<0,10$ (ns: não significativo; * significativo a 10 %).13

FIGURA 4 - Condutividade hidráulica saturada do solo em função de sistemas de culturas em plantio direto, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Tr-So = trigo – soja; Av-Mi-Tr-So = aveia-milho-trigo-soja; Er-Mi-Tr-So = ervilhaca-milho-trigo-soja; Az-Mi-Az-So = azevém-milho-azevém-soja; Alf-Mi = alfafa-milho. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey $P<0,10$ (ns: não significativo; * significativo a 10 %).15

FIGURA 5 - Relação entre macroporosidade e condutividade hidráulica saturada do solo, em todas as profundidades avaliadas.16

FIGURA 6 - Diâmetro médio ponderado úmido (DMPu) de agregados do solo em função de sistemas de culturas em plantio direto, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Tr-So = trigo – soja; Av-Mi-Tr-So = aveia-milho-trigo-soja; Er-Mi-Tr-So = ervilhaca-milho-trigo-soja; Az-Mi-Az-So = azevém-milho-azevém-soja; Alf-Mi = alfafa-milho. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey $P<0,10$ (ns: não significativo; * significativo a 10 %).18

FIGURA 7 - Relação entre densidade do solo e diâmetro médio ponderado úmido (DMPu) de agregados, em todas as profundidades avaliadas.19

FIGURA 8 - Resistência à penetração (RP) e grau de compactação em função de sistemas de culturas em plantio direto. Tr-So = trigo – soja; Av-Mi-Tr-So = aveia-milho-trigo-soja; Er-Mi-Tr-So = ervilhaca-milho-trigo-soja; Az-Mi-Az-So = azevém-milho-azevém-soja; Alf-Mi = alfafa-milho. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey $P<0,10$ (ns: não significativo; * significativo a 10 %). O grau de compactação (MPa cm) é dado pela integração da área do gráfico que possui RP superior a 1,5 MPa, considerado como crítico.21

FIGURA 9 - Relação entre densidade do solo e resistência à penetração, em todas as profundidades avaliadas. Para adequar os dados de resistência à penetração nas camadas analisadas foi realizada uma média da seguinte forma: a) camada 0-5 cm foram utilizados os valores das camadas 0,0, 2,5 e 5,0 cm; b) camada 5-10 cm os valores foram das camadas 5,0, 7,5 e 10,0 cm e c) camada 10-20 cm os valores utilizados foram 10,0, 12,5, 15,0, 17,5 e 20,0 cm.23

FIGURA 10 - Relação entre macroporosidade e resistência à penetração, em todas as profundidades avaliadas. Para adequar os dados de resistência à penetração nas camadas analisadas foi realizada uma média da seguinte forma: a) camada 0-5 cm foram utilizados os valores das camadas 0,0, 2,5 e 5,0 cm; b) camada 5-10 cm os valores foram das camadas 5,0, 7,5 e 10,0 cm e c) camada 10-20 cm os valores utilizados foram 10,0, 12,5, 15,0, 17,5 e 20,0 cm.24

TABELA 1 - Operações moto mecanizadas realizadas em cada cultivo.6

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	5
2.1 Caracterização da área experimental.....	5
2.2 Coleta de amostras de solo.....	6
2.3 Condutividade hidráulica saturada, densidade, microporosidade e macroporosidade do solo.....	7
2.4 Diâmetro médio ponderado úmido (DMPu) de agregados.....	7
2.5 Resistência à penetração (RP).....	8
2.6 Análise estatística.....	8
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
3.1 Densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e condutividade hidráulica saturada.....	9
3.2 Agregação do solo.....	17
3.3 Resistência à penetração.....	20
4 CONCLUSÃO.....	25
REFERÊNCIAS.....	26

1 INTRODUÇÃO

O solo é o resultado da interação entre componentes abióticos e bióticos, ou seja, da interação entre uma camada de rocha intemperizada com organismos vivos e os produtos do metabolismo desses organismos; e por isso o solo é considerado o organizador dos ecossistemas terrestres (GLIESSMAN, 2005; NCA, 2007). Porém, com a intensificação do manejo, o solo perde algumas de suas principais características que irão influenciar na organização do agroecossistema, características como a estrutura, que se relaciona com a qualidade do solo (QS).

A QS está inserida no conceito mais amplo de qualidade ambiental, servindo como indicador desta, e por isso tem grande importância na sustentabilidade das atividades sociais e econômicas ligadas ao ambiente, como a agricultura (ODUM; BARRET, 2007; MIELNICZUCK, 2008). Neste contexto, define-se QS como a capacidade do solo em manter a qualidade biológica e ambiental; e favorecer e organizar de forma saudável e sustentável a vida vegetal e animal no planeta Terra (DORAN; PARKIN, 1994). A Soil Science Society of América (1994) complementa, incluindo à definição que o solo deve ter capacidade de suprir as necessidades humanas de saúde e habitação. Assim a QS pode ser considerada como um dos principais fatores que definem quanto um agroecossistema pode ser sustentável.

A QS é dividida em três eixos: química, biológica e física. A qualidade química do solo diz respeito à ciclagem de nutrientes e ausência de elementos tóxicos; a qualidade biológica refere-se à matéria orgânica (MO) do solo e a atividade e diversidade da biota do solo; e a qualidade física ou qualidade estrutural do solo (QES) considera a forma (densidade, porosidade, infiltração e aeração) e estabilidade (resistência de agregados) (REINERT; REICHERT, 2006).

A QES é de fundamental importância para o suprimento de água, nutrientes e oxigênio às raízes. A densidade do solo, a porosidade, a condutividade hidráulica, a resistência à penetração e a agregação são atributos-chaves para avaliar a QES, pois estes são influenciados pelo manejo, pelo teor de matéria orgânica do solo e pela ação de raízes (SILVA *et al.*, 2000). Para o solo apresentar esses parâmetros físicos condizentes, deve-se priorizar o manejo conservacionista, com qualidade. Portanto, o sistema plantio direto (SPD), a rotação e a consorciação de culturas podem ser alternativas para alcançar um solo com boa QES.

No Brasil, o SPD começa a ser experimentado por agricultores, pois não era reconhecido pelos pesquisadores dos órgãos de pesquisas oficiais, por se tratar de uma prática com lógica contrária à utilizada na época e por isso sua difusão no Brasil começa apenas no início dos anos 1990 (FAO, 2004; LLANILLO, 2007; MOLIN, 2008). O SPD começa a ganhar visibilidade quando, na Conferência da Organização das Nações Unidas (ONU), foi elaborado o documento “Agenda 21” na cidade do Rio de Janeiro, em 1992. Esse documento, junto com o “Relatório de Brundtland”, contribuíram para impulsionar a adoção de práticas conservacionistas, entre elas o SPD (FAO, 2004; LLANILLO, 2007).

No início de sua experimentação o objetivo foi o controle da erosão hídrica ocorrente nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul e hoje o SPD abrange uma área de mais de 25 milhões de hectares no Brasil e de mais de 95 milhões de hectares no mundo, tendo o Brasil a segunda maior área de cultivos em SPD (MOLIN, 2008; FEBRAPDP, 2009). Assim o SPD é promissor, pois seu manejo representa proteção contra o processo erosivo, com isso menor contaminação de rios e lagos; aproximadamente 50% de redução no consumo de combustíveis e consequentemente redução na emissão de gases do efeito estufa; incremento de matéria orgânica e cobertura do solo; redução no índice de desmatamento, por proporcionar a recuperação das qualidades produtivas em áreas deterioradas pelo manejo, reduzindo assim a pressão por novas áreas para cultivo; aumento da biodiversidade do solo, desta forma ele se relaciona harmonicamente com a natureza (CIVIDANES; BARBOSA, 2001; FAO, 2004).

Porém, apenas a utilização do SPD não basta sem haver uma boa cobertura vegetal ou adubação verde e conseqüentemente palhada, surgindo então à necessidade da realização de sistemas de culturas ou rotação de culturas mais eficientes como ferramenta fundamental na melhoria da QS. O planejamento dos sistemas de culturas (cobertura vegetal ou adubação verde) tem origem nos anos 1880 na Alemanha, é um método onde se planeja a escolha das espécies vegetais ao longo do tempo. Assim, para uma espécie ser introduzida nos sistemas de culturas depende basicamente da adaptação das mesmas às condições edafoclimáticas de cada região e do interesse do agricultor (KHATOUNIAN, 2001; PRIMAVESI, 2002; HOWARD, 2007).

Esses sistemas são utilizados para aumentar a diversidade de espécies favorecendo a QS por proporcionar uma melhor estruturação do solo e ciclagem de

nutrientes, isto ocorrerá pelo efeito físico das raízes que proporcionará um aumento nos bioporos, consequentemente na porosidade total e pelo efeito de suas excreções que irão favorecer a biota do solo, favorecendo assim a MO do solo (CIVIDANES, 2002; PRIMAVESI, 2002). Além disso, tem-se o controle da erosão, pelo efeito da cobertura do solo; porém esse controle irá depender da quantidade de palha produzida e da região climática (SÁ *et al.*, 2004; AMADO, 2009), pois os resíduos de gramíneas e leguminosas permanecem por um período maior na região Sul quando comparado com outras regiões. Desta forma, ocorre o predomínio de espécies gramíneas, por favorecer uma palhada de cobertura por um período maior, pois o resíduo de leguminosas decompõe-se mais rapidamente por ter uma relação C/N menor (GIACOMINI, 2003; SÁ *et al.*, 2004).

Sistemas de culturas que combinam espécies perenes de gramíneas e leguminosas com culturas anuais reduzem o efeito negativo dos cultivos sobre a estrutura do solo (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990). Isto ocorre devido aos sistemas de culturas diversificados que favorecem a biota do solo (KLEIN; LIBARDI, 2002) e o teor de matéria orgânica, que são fundamentais para que o solo tenha uma estrutura grumosa que favoreça os cultivos (PRIMAVESI, 2002; AMADO, 2009).

TORMENA *et al.* (2002), trabalhando em um Latossolo Vermelho distrófico com monocultivo de aveia, verificaram que a densidade do solo na camada de 0-20 cm foi superior em SPD ($1,65 \text{ Mg m}^{-3}$) quando comparado com sistema de preparo convencional (SPC) ($1,60 \text{ Mg m}^{-3}$). O SPD favorece o aumento da densidade do solo, pela menor movimentação do solo e pelo tráfego de máquinas (BERTOL *et al.*, 2004; SECCO *et al.*, 2005). Porém com a evolução do SPD e sua consolidação, com o planejamento do tráfego de máquinas, aumento da MO, palhada na superfície e favorecimento da atividade biológica haverá uma redução dos efeitos deletérios do tráfego de máquinas sobre as propriedades físicas, incluindo a densidade do solo (TORMENA *et al.*, 2002; REINERT; REICHERT, 2006).

Outros atributos estudados na avaliação da QES são a porosidade total, macroporosidade e microporosidade, por afetarem a aeração do solo e a retenção e infiltração de água (DEXTER, 1988; PRIMAVESI, 2002). TORMENA *et al.* (2002), ao avaliarem a porosidade total, macroporosidade e microporosidade, verificaram que a macroporosidade foi o atributo mais afetado pelo manejo, sendo que no SPD obteve a maior redução enquanto a microporosidade aumentou nesse sistema.

CORSINI (1974) relata que em um solo cultivado há 50 anos quando comparado com um solo de campo nativo a condutividade hidráulica reduziu em média 37%. Ainda seguindo este raciocínio, ao aplicar uma tensão de 10 kPa em um Latossolo, a condutividade hidráulica poderá ser reduzida a tal ponto a perder-se toda a água por deflúvio (MANTOVANI, 1987; KLEIN; LIBARDI, 2002). KLEIN e LIBARDI (2002) verificaram que a condutividade hidráulica é afetada por alterações na estrutura do solo e pela resistência à penetração, sendo esta última estudada por TORMENA *et al.* (2002) que observou no SPD a ocorrência de valores elevados de resistência a penetração em sistema de monocultivo hiberna. Estes resultados demonstram que há necessidade da utilização das adubações verdes consorciadas e que esses efeitos podem causar prejuízos ambientais graves, como assoreamento e eutrofização de rios, assim verifica-se que apenas com cultivo solteiro de plantas de cobertura não há uma melhoria dos atributos físicos (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990; LIMA *et al.*, 2002).

Além desses atributos, a agregação tem fundamental importância quando se trata de QES, ela influencia todos os outros atributos, pois um solo bem agregado ou com uma boa estrutura grumosa é fundamental para uma produção sustentável, porém o manejo influencia negativamente esta estrutura (SEYBOLD *et al.*, 1999; GLIESSMAN, 2005). Assim, segundo SILVA e MIELNICZUK (1997), o sistema radicular de culturas perenes, em especial gramíneas, favorecem a formação de uma estrutura grumosa no solo, isso pelo fato dessas espécies apresentarem um sistema radicular agressivo e promoverem um aumento de bioporos.

O objetivo deste estudo foi avaliar a contribuição de sistemas de culturas em SPD de longa-duração (18 anos), alguns incluindo a produção de forragem (feno) ou plantas de cobertura hibernais, à melhoria de atributos físicos de um Latossolo Vermelho dos Campos Gerais do Paraná e, a partir disso, inferir sobre o potencial de tais sistemas em promover qualidade estrutural do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

A área experimental, situada no município de Ponta Grossa (PR), na Unidade Experimental da Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária, é conduzida desde 1989 (18 anos). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, A moderado, textura média (MOLIN, 2008). O clima da região é subtropical com verões amenos, segundo Köppen classificado como Cfb.

O experimento foi constituído de sete sistemas de culturas em plantio direto, distribuídos no delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições, em parcelas de 7,0 × 10,5 m. Para o presente estudo, no entanto, foram avaliados cinco sistemas de culturas, com três repetições:

(i) sucessão trigo (*Triticum aestivum* L.) – soja (*Glycine Max* L.) [Tr-So], representando o sistema referência;

(ii) aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) – milho (*Zea mays* L.) – trigo – soja [Av-Mi-Tr-So]. A aveia preta foi cultivada como planta de cobertura sendo dessecada com herbicida e rolada antes da semeadura do milho;

(iii) ervilhaca (*Vicia sativa* L.) – milho – trigo – soja [Er-Mi-Tr-So]. A ervilhaca cultivada como planta leguminosa de cobertura sendo dessecada com herbicida e rolada antes da semeadura do milho;

(iv) azevém (*Lolium multiflorum* L.) – milho – azevém – soja [Az-Mi-Az-So], sendo o azevém cultivado para a produção de feno, uma prática comum na região de abrangência da Fundação ABC;

(v) alfafa (*Medicago sativa* L.) para a produção de feno, com um cultivo de milho a cada três anos [Alf-Mi].

Detalhes sobre a condução e o histórico deste experimento foram descritos por MOLIN (2008). O conjunto de operações mecânicas realizadas em cada cultivo estão apresentadas na TABELA 1.

TABELA 1 – OPERAÇÕES MOTO MECANIZADAS REALIZADAS EM CADA CULTIVO.

TABELA 1 - OPERAÇÕES MOTO MECANIZADAS REALIZADAS EM CADA CULTIVO.						
Cultivo	Semeadura	Pulverização			Rolagem	Colheita
		Herbicida	Fungicida	Inseticida		
----- Número de operações -----						
Trigo	1	2	3 a 4	1	-	1
Soja	1	2	2	1	-	1
Milho	1	2	-	3	-	1
Aveia preta	1	1	1	-	1	-
Ervilhaca	1	1	-	-	1	-
Azevém	1	1	-	-	-	1*
Alfafa	1	-	-	-	-	7-8*

* Corte realizado com roçadeira manual, sendo a massa verde retirada da parcela.

2.2 Coleta de amostras de solo

Amostras de solo foram coletadas em setembro de 2007, em duas trincheiras dispostas diagonalmente em cada parcela, e transversais às linhas de semeadura. As dimensões aproximadas de cada trincheira foram de 90 cm de comprimento, 40 cm de largura e 30 cm de profundidade. Em cada trincheira, dois tipos de amostras do solo foram coletadas nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Amostras em anéis volumétricos de 5,6 cm de diâmetro e 3,1 cm de altura foram coletadas para as avaliações de condutividade hidráulica, densidade do solo, microporosidade e macroporosidade. Essas amostras em anéis foram retiradas no centro de cada camada, com o auxílio de um batedor e espátulas, e foram posteriormente envoltas em filme plástico e acomodada num recipiente rígido para evitar deformações durante o transporte ao laboratório, onde, então, passaram por uma toalete. Amostras em torrões de 10 cm de largura por 15 cm de comprimento, com a altura correspondente a espessura da camada amostrada, foram coletadas com espátulas para a avaliação do diâmetro médio ponderado úmido dos agregados. Tais amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas ao laboratório em caixas com divisórias para evitar deformações.

Por ocasião da coleta de amostras de solo, as parcelas apresentavam os seguintes cultivos: trigo, no sistema Tr-So; aveia preta, no sistema Av-Mi-Tr-So; ervilhaca, no sistema Er-Mi-Tr-So; azevém, no sistema Az-Mi-Az-So; e alfafa, no sistema Alf-Mi.

2.3 Condutividade hidráulica saturada, densidade, microporosidade e macroporosidade do solo

As amostras de solo contidas nos anéis volumétricos, após o trabalho de toalete, foram saturadas com água por um período de 12 horas e, posteriormente, colocadas em permeâmetro de carga constante, construído no próprio laboratório (EMBRAPA, 1997). A altura da lâmina de água sobre o topo do anel contendo a amostra foi ajustada em 20 mm. As leituras de volume de água passante através da amostra de solo foram medidas a cada hora, até a estabilização, que, geralmente, ocorreu em torno de 8 horas após o início da avaliação. A condutividade hidráulica saturada foi calculada através da equação de Darcy, considerando-se os dois ou três últimos pontos estáveis de avaliação de volume de água passante pela amostra (EMBRAPA, 1997).

Após a avaliação da condutividade hidráulica saturada, as amostras foram submetidas a uma tensão de 6 kPa (60 cm), em mesa de tensão (OLIVEIRA, 1968), por um período de 12 horas e, posteriormente, pesadas e postas para secar a 105° C. Após a secagem, determinou-se a densidade do solo (EMBRAPA, 1997) e com a informação de densidade média de partículas ($2,56 \text{ Mg m}^{-3}$) determinada em 30 amostras compostas entre todos os tratamentos e camadas, calculou-se a porosidade total do solo. Considerou-se como volume de microporos a diferença entre o peso da amostra após a retirada da mesa de tensão (capacidade de campo) e o peso seco, que dividido pelo volume do anel corresponde à microporosidade. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 1997).

2.4 Diâmetro médio ponderado úmido (DMPu) de agregados

As amostras em torrões foram fragmentadas cuidadosamente de forma manual, em agregados com tamanho inferior a 8 mm, os quais foram secos ao ar e na sombra. A peneiração úmida foi feita segundo TISDALL *et al.* (1978). Aproximadamente 25 g de agregados foram umedecidos por capilaridade, em filtros de café, por um período de 12 horas e transferidos para o topo de um conjunto de peneiras de 4,00 mm, 2,00 mm, 1,00 mm, 0,50 mm e 0,25 mm. Os agregados foram

separados em seis classes de tamanho ($> 4,00$, $4,00 - 2,00$, $2,00 - 1,00$, $1,00 - 0,50$, $0,50 - 0,25$ e $< 0,25$ mm) através de movimentos oscilatórios verticais desse conjunto de peneiras, dentro de um recipiente contendo água (amplitude de 3 cm, 42 oscilações por minutos, durante 15 minutos). Os agregados retidos em cada peneira foram transferidos para copos plásticos, secos a 55°C e pesados, para o posterior cálculo do DMPu (KEMPER; ROSENAU, 1986).

2.5 Resistência do solo à penetração (RP)

A avaliação da resistência do solo à penetração foi realizada a campo em 10 de maio de 2008, em dez pontos por parcela. Foi utilizado um penetrômetro digital de cone (Spectrum Technologies, Inc.), com a haste introduzida até a profundidade de 40 cm e leituras de índice de cone em intervalos de 2,5 cm. Considerando-se como valor crítico restritivo a resistência a penetração de 1,5 MPa, calculou-se o grau de compactação, dado pela integração da área do gráfico da resistência a penetração $\times$ profundidade para as camadas cujos valores de resistência a penetração foram superiores a 1,5 MPa.

2.6 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância e teste de médias Tukey ($P < 0,10$). Para a realização da análise estatísticas utilizou-se o software SASM-Agri versão 3.2.4 (ALTHAUS *et al.*, 2001) e o pacote estatístico do Microsoft Office 2007 (Excel 2007).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e condutividade hidráulica saturada

A densidade do solo na camada superficial de 0-5 cm tendeu a ser menor nos sistemas com plantas hibernais de cobertura Av-Mi-Tr-So ($0,96 \text{ Mg m}^{-3}$) e Er-Mi-Tr-So ($0,93 \text{ Mg m}^{-3}$), embora não tenha variado significativamente (FIGURA 1). A ação mecânica das raízes de aveia preta e ervilhaca, espécies presentes por ocasião da coleta das amostras de solo, é uma possível causa da tendência de menor densidade do solo, pois por ocasião da coleta e preparo das respectivas amostras de solo, a maior abundância de raízes para essas espécies na camada superficial foi constatada visualmente. Nas camadas inferiores de 5-10 e 10-20 cm, foi o sistema semi-perene de Alf-Mi que apresentou os menores valores de densidade do solo ($1,14$ e $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente), sendo significativamente menor em relação à maioria dos demais sistemas (FIGURA 1). Assim, como para a camada superficial, o menor valor de densidade do solo nas camadas mais profundas foi atribuído à ação do sistema radicular; no caso, da alfafa. Isso não significa, porém, que raízes desta espécie tiveram papel menos importante nos resultados de densidade do solo no sistema Alf-Mi na camada superficial de 0-5 cm. Cabe destacar que, enquanto nos demais sistemas ocorreram um aporte significativo de resíduo cultural na superfície do solo a cada ano com efeitos sobre a densidade do solo, no sistema Alf-Mi isso não ocorre em função da colheita da parte aérea da alfafa para a produção de feno.

Em profundidade, houve uma tendência geral de aumento da densidade do solo, porém menos evidente no sistema Alf-Mi. Essa menor variação no sistema Alf-Mi pode ser devido ao menor gradiente na concentração de raízes de alfafa em profundidade, associado à menor deposição de resíduos culturais na superfície do solo, como discutido anteriormente. Outro ponto a ser destacado é o tráfego menos intenso de máquinas no sistema Alf-Mi (TABELA 1) comparado aos demais onde a ação de cargas de rodados tenham possivelmente contribuído para o aumento da densidade do solo nas duas camadas mais profundas.

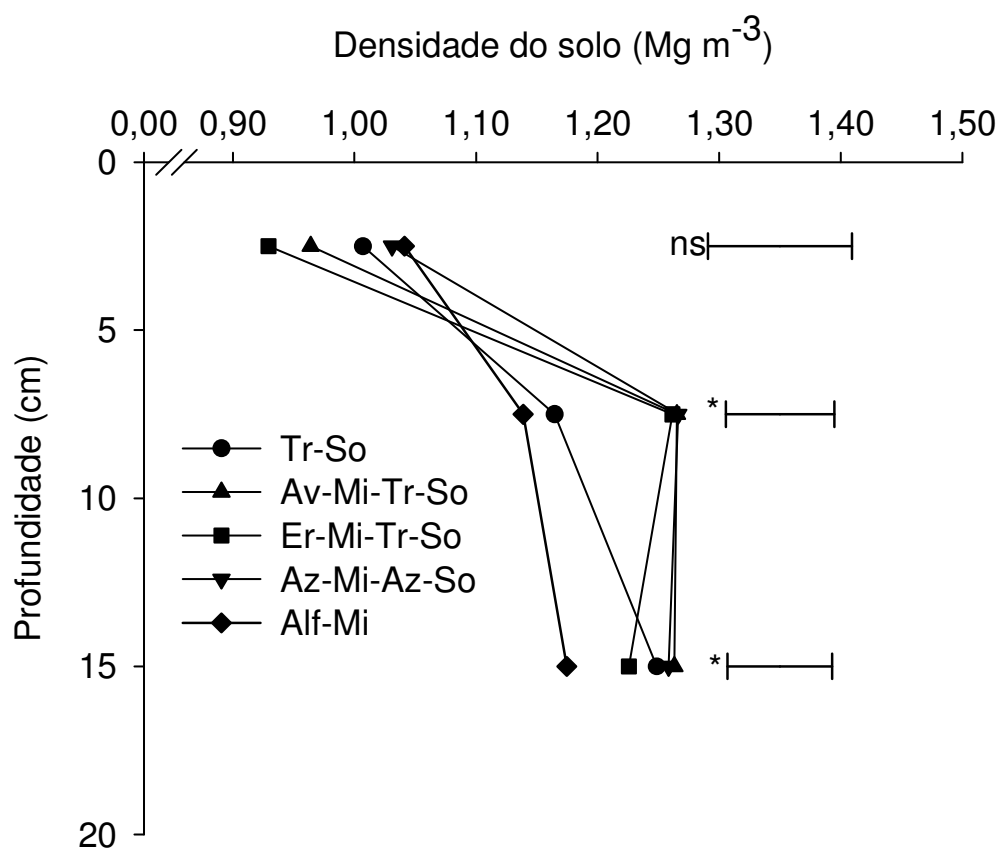


FIGURA 1 – DENSIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO, NAS CAMADAS DE 0-5, 5-10 E 10-20 CM. TR-SO = TRIGO – SOJA; AV-MI-TR-SO = AVEIA-MILHO-TRIGO-SOJA; ER-MI-TR-SO = ERVILHACA-MILHO-TRIGO-SOJA; AZ-MI-AZ-SO = AZEVÉM-MILHO-AZEVÉM-SOJA; ALF-MI = ALFAFA-MILHO. BARRAS HORIZONTAIS REPRESENTAM A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICATIVA PELO TESTE DE TUKEY $P < 0,10$ (NS: NÃO SIGNIFICATIVO; * SIGNIFICATIVO A 10 %).

Esses dados confirmam os encontrados por BERTOL *et al.* (2001) onde em SPD ocorre um aumento dos valores da densidade do solo, porém com a consolidação esses efeitos negativos são minimizados, ainda para D'ANDRÉA *et al.* (2002) a consolidação favorecerá a QS, porém esses valores encontrados não ultrapassaram os valores críticos descritos por REINERT e REICHERT (2001) que indicam para solo de textura média uma densidade crítica de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$.

Assim, a densidade do solo em sistema de plantio direto ocasionado por um maior tráfego de máquinas, necessita de sistemas de culturas que favoreçam menor número de operações no seu manejo, pois desta forma podem promover a QES, reduzindo assim a intensificação de uso dos solos (TORMENA *et al.*, 2002; ARAÚJO *et al.*, 2007).

A macroporosidade do solo apresentou, como esperado, uma tendência inversa daquela observada para a densidade do solo, com maiores valores na camada de 0-5 cm para os sistemas Av-Mi-Tr-So ($0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e Er-Mi-Tr-So ($0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (FIGURA 2). Nas duas camadas mais profundas, o sistema Alf-Mi tendeu a apresentar os maiores valores de macroporosidade, embora não tenha havido diferenças significativas na camada de 10-20 cm. Como discutido para a densidade do solo, o sistema radicular das espécies e sua distribuição ao longo do perfil exercem grande influencia na definição da macroporosidade, pois a ação mecânica de crescimento tanto radial como longitudinal das raízes favorece a formação de poros e canais no solo, além disso, a macroporosidade também depende da atividade da biota do solo (DEXTER, 1988; PRIMAVESI, 2002).

Em profundidade ocorreu uma tendência de redução da macroporosidade, especialmente nos sistemas com culturas anuais e, como discutido anteriormente para a densidade, isso pode ser decorrente da ação do sistema radicular no perfil; da deposição de resíduos na superfície, e; do adensamento causado por rodado de máquinas. No entanto, nenhum valor de macroporosidade foi inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerado como crítico abaixo do qual ocorrem restrições em termos de difusão de oxigênio para as raízes (VOMOCIL; FLOCKER, 1961; GRABLE; SIEMER, 1968; DEXTER, 1988).

A microporosidade na camada 0-5 cm foi maior nos sistemas Tr-So ($0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e Alf-Mi ($0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e menor nos sistemas Er-Mi-Tr-So ($0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e Av-Mi-Tr-So ($0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (FIGURA 3), evidenciando tendência aproximadamente inversa

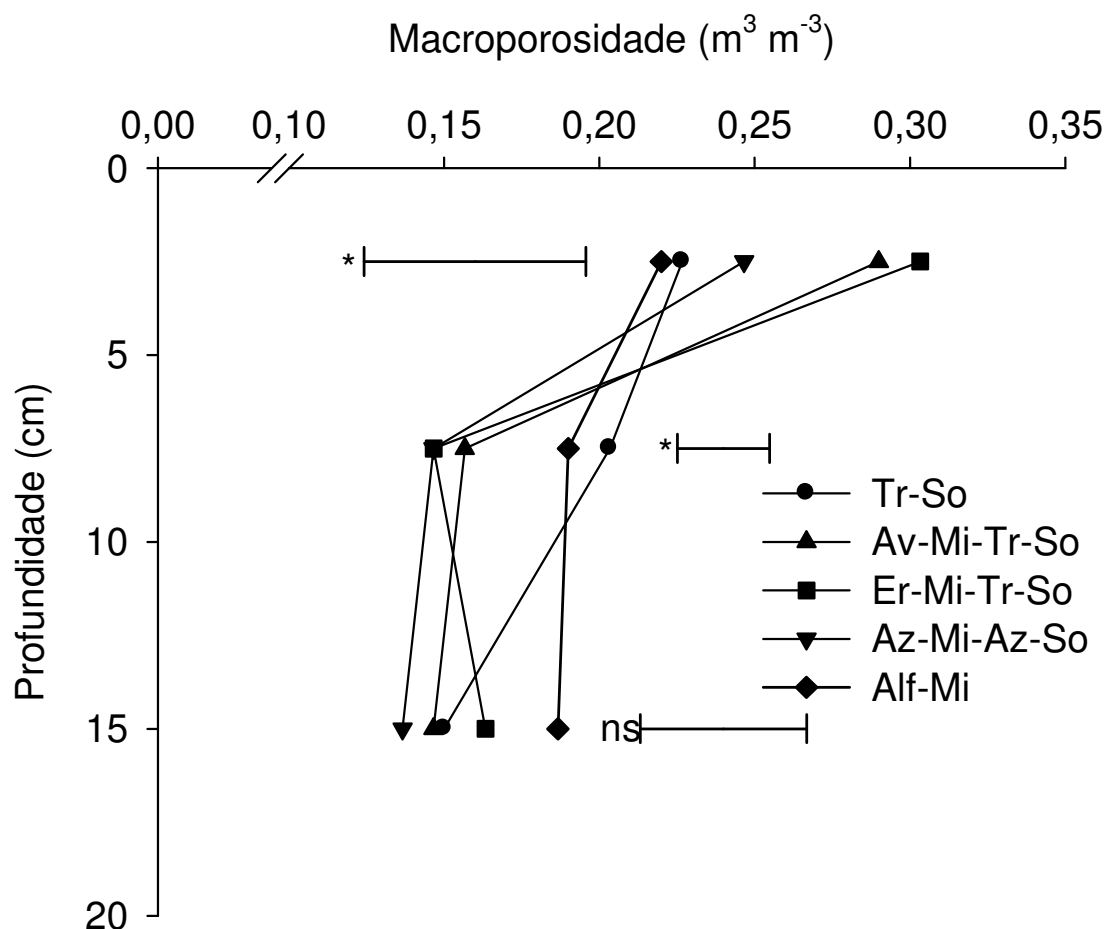


FIGURA 2 – MACROPOROSIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO, NAS CAMADAS DE 0-5, 5-10 E 10-20 CM. TR-SO = TRIGO – SOJA; AV-MI-TR-SO = AVEIA-MILHO-TRIGO-SOJA; ER-MI-TR-SO = ERVILHACA-MILHO-TRIGO-SOJA; AZ-MI-AZ-SO = AZEVÉM-MILHO-AZEVÉM-SOJA; ALF-MI = ALFAFA-MILHO. BARRAS HORIZONTAIS REPRESENTAM A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICATIVA PELO TESTE DE TUKEY $P < 0,10$ (NS: NÃO SIGNIFICATIVO; * SIGNIFICATIVO A 10 %).

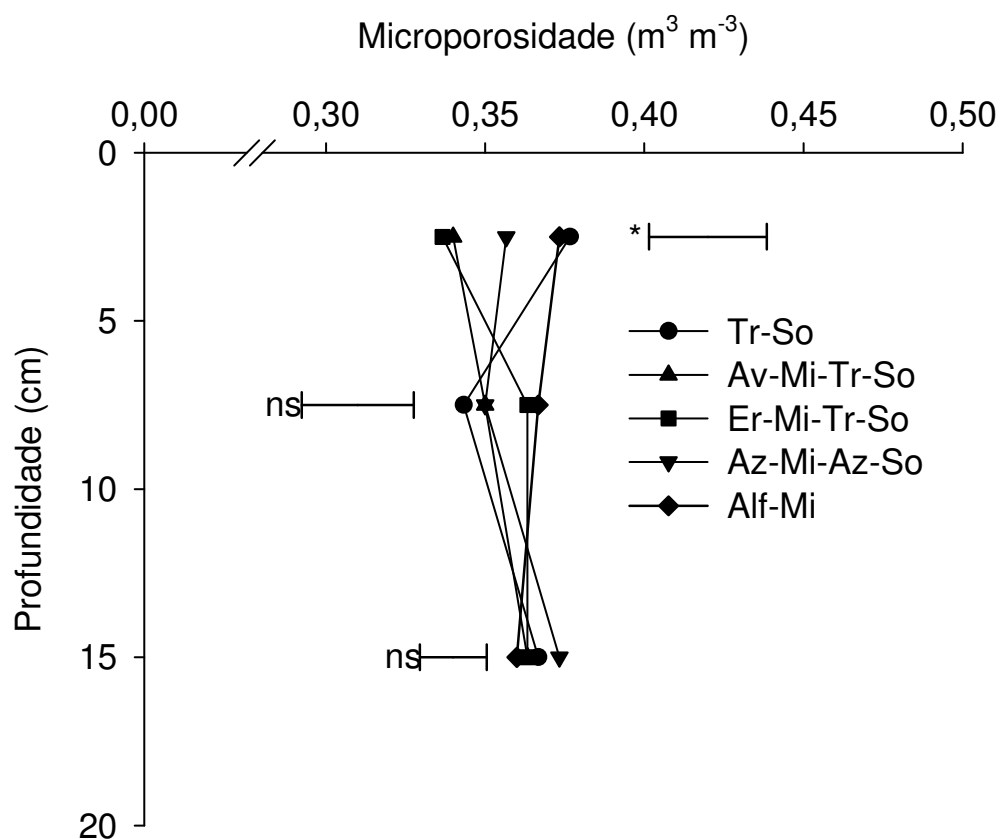


FIGURA 3 – MICROPOROSIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO, NAS CAMADAS DE 0-5, 5-10 E 10-20 CM. TR-SO = TRIGO – SOJA; AV-MI-TR-SO = AVEIA-MILHO-TRIGO-SOJA; ER-MI-TR-SO = ERVILHACA-MILHO-TRIGO-SOJA; AZ-MI-AZ-SO = AZEVÉM-MILHO-AZEVÉM-SOJA; ALF-MI = ALFAFA-MILHO. BARRAS HORIZONTAIS REPRESENTAM A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICATIVA PELO TESTE DE TUKEY $P < 0,10$ (NS: NÃO SIGNIFICATIVO; * SIGNIFICATIVO A 10 %).

à observada na macroporosidade (FIGURA 2) e direta à observada para a densidade (FIGURA 1). Nas camadas de 5-10 cm e 10-20 cm, não houve diferenças significativas entre os sistemas, ficando os valores médios de microporosidade em $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. LANZANOVA *et al.* (2007), em trabalho realizado em um Argissolo Vermelho, verificando a microporosidade em um sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto não encontraram diferenças significativas para este atributo, porém houve diferença nos atributos porosidade total e macroporosidade, relatando que parte desta diferença pode ter influencia do sistema radicular da cultura da soja.

A condutividade hidráulica saturada na camada superficial não diferiu significativamente, apesar do sistema Er-Mi-Tr-So apresentar maior valor (224 mm h^{-1}) (FIGURA 4). O sistema Alf-Mi foi o que possibilitou maior condutividade hidráulica nas camadas de 5-10 (170 mm h^{-1}) e 10-20 cm (147 mm h^{-1}), com possíveis efeitos benéficos em termos de infiltração de água no solo e redução de escoamento superficial.

Os resultados de condutividade hidráulica apresentaram uma estreita correlação com a macroporosidade (FIGURA 5), o que é entendido como coerente, pois o mesmo sistema de poros e canais que constituem a macroporosidade também é responsável pela permeabilidade de água em condições saturadas (VOMOCIL; FLOCKER, 1961; PRIMAVESI, 2002).

Esses resultados concordam com os encontrados por ELLIES *et al.* (1997), os quais relatam que o sistema convencional de manejo do solo influenciou negativamente a macroporosidade e consequentemente a condutividade hidráulica, pois estes dois atributos tem grande relação.

Assim, os maiores valores de condutividade em profundidade são reflexos do manejo realizado, no caso o manejo de preparo e o sistema cultural, pois quando se proporciona sistemas de culturas perenes estes irão favorecer os bioporos e consequentemente aumentar a condutividade hidráulica em profundidade, desta forma a rotação de cultura é fundamental (COSTA *et al.*, 2003; ARAÚJO, 2007), percebendo-se que há uma tendência de melhoria deste atributo com a evolução do manejo conservacionista (SILVA *et al.*, 2005).

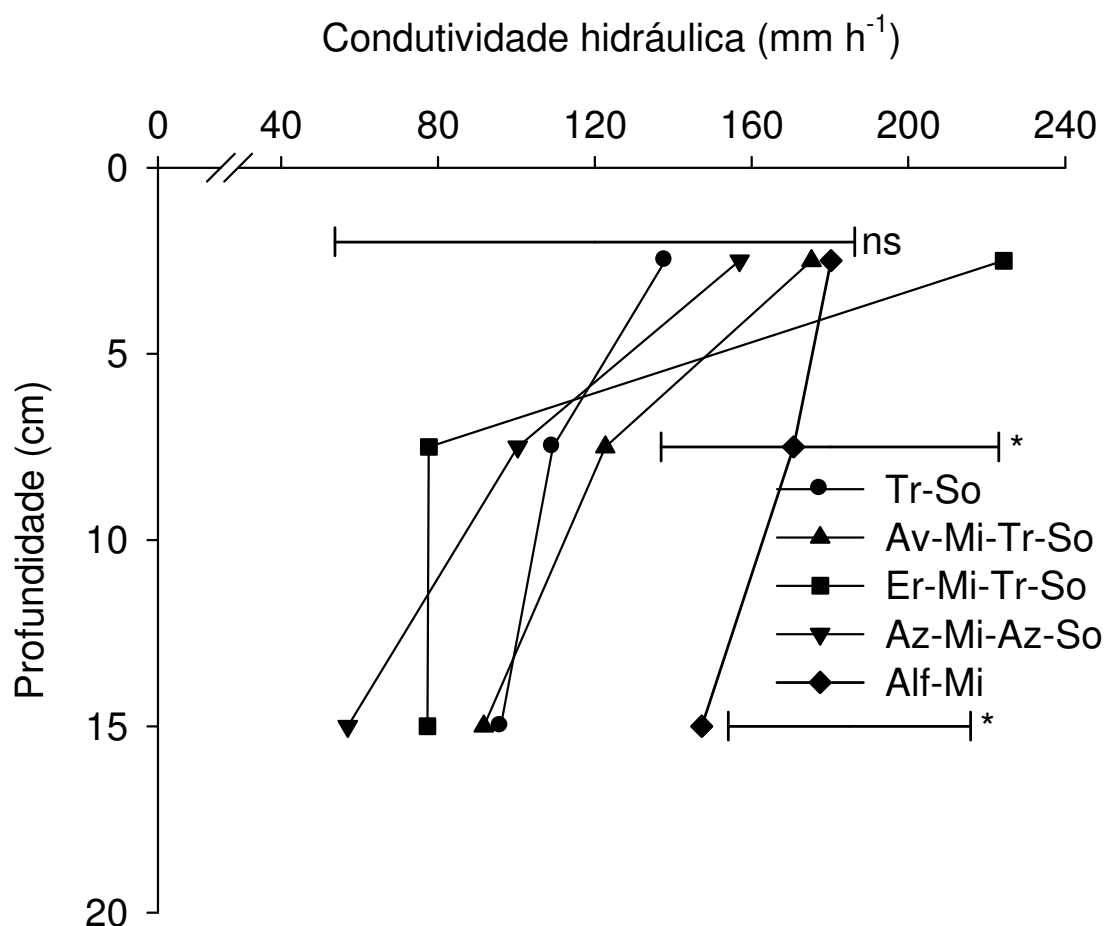


FIGURA 4 – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO, NAS CAMADAS DE 0-5, 5-10 E 10-20 CM. TR-SO = TRIGO – SOJA; AV-MI-TR-SO = AVEIA-MILHO-TRIGO-SOJA; ER-MI-TR-SO = ERVILHACA-MILHO-TRIGO-SOJA; AZ-MI-AZ-SO = AZEVÉM-MILHO-AZEVÉM-SOJA; ALF-MI = ALFAFA-MILHO. BARRAS HORIZONTAIS REPRESENTAM A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICATIVA PELO TESTE DE TUKEY $P < 0,10$ (NS: NÃO SIGNIFICATIVO; * SIGNIFICATIVO A 10 %).

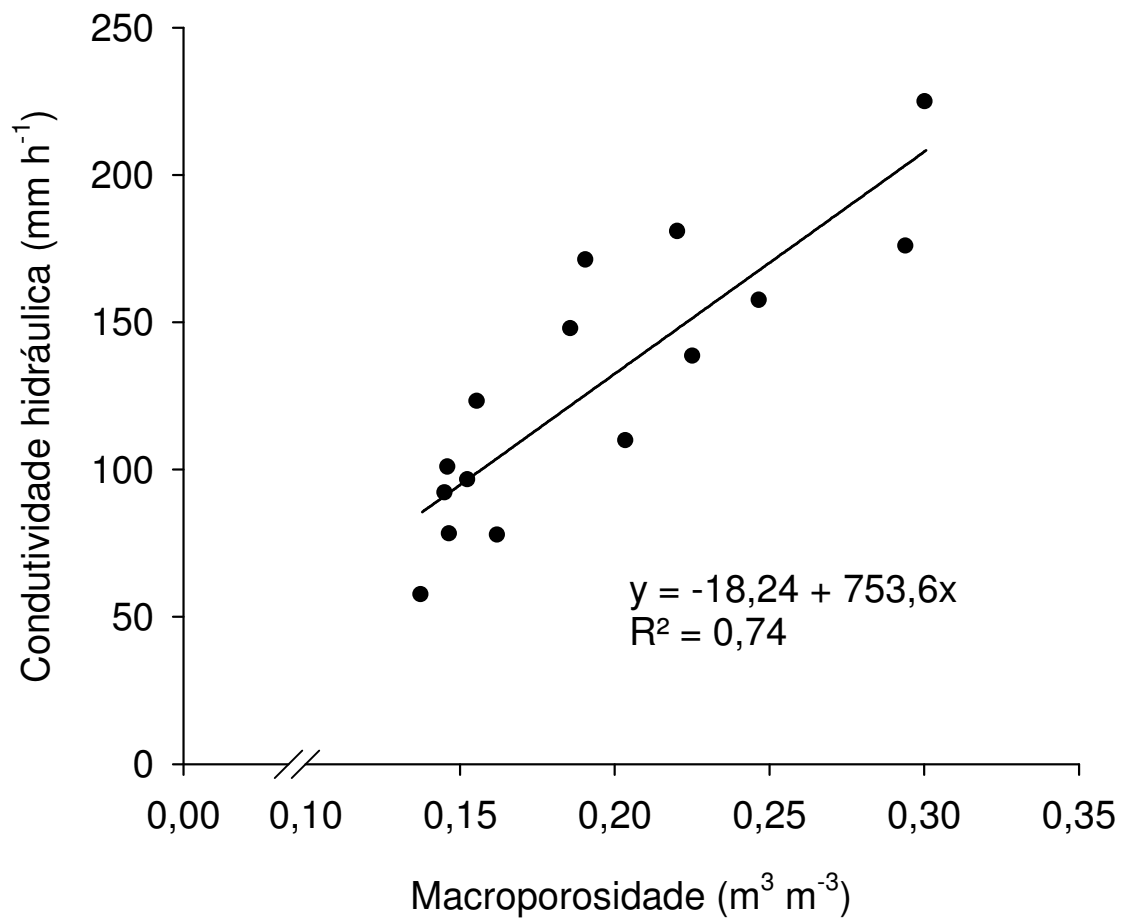


FIGURA 5 – RELAÇÃO ENTRE MACROPOROSIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DO SOLO, EM TODAS AS PROFUNDIDADES AVALIADAS.

3.2 Agregação do solo

O diâmetro médio ponderado úmido (DMPu) dos agregados da camada de 0-5 cm variou de 2,39 mm no sistema Er-Mi-Tr-So, para 3,04 mm, no sistema Tr-So e tenderam a aumentar em profundidade (FIGURA 6). Embora as diferenças não tenham sido significativas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, houve uma correlação direta e estreita entre DMPu e densidade do solo (FIGURA 7), evidenciando a possibilidade de que a estabilidade de tais agregados em água seja também resultado do processo de compressão do solo promovido pelo tráfego de máquinas. CARPENEDO e MIELNICZUK (1990) observaram, para um Latossolo Vermelho distroférico, que agregados do solo sob SPC ou SPD apresentaram-se compactados e com o predomínio de microporos, em relação aos agregados de solo sob pastagem perene e com maior abundância de raízes.

Para amostras com maior densidade de raízes, como Er-Mi-Tr-So e Av-Mi-Tr-So na camada de 0-5 cm e Alf-Mi nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, constatou-se visualmente que as mesmas eram facilmente desagregadas durante a manipulação e remoção das raízes para a passagem em peneira de 8,00 mm. O resultado disso foi a tendência de menor DMPu para tais sistemas e camadas (FIGURA 6), o que de certa forma contradiz vários trabalhos que relatam a contribuição de raízes em formar agregados estáveis maiores (PALADINI; MIELNICZUK, 1991; CAMPOS *et al.*, 1995; SILVA; MIELNICZUK, 1997; WOHLBERG *et al.*, 2004). Porém esses autores relatam que o teor de matéria orgânica influencia a formação de agregados do solo, neste caso o manejo é fundamental, pois no sistema Alf-Mi a massa verde produzida pela cultura da alfafa é toda retirada para a elaboração de feno, com isso o teor de matéria orgânica é reduzido e conseqüentemente ocorre o aumento da densidade do solo na camada superficial (FIGURA 1) e a tendência desse sistema em apresentar menor DMPu na profundidade analisada (FIGURA 6).

Ainda nos tratamentos Er-Mi-Tr-So e Av-Mi-Tr-So, é possível que o cultivo isolado de cada espécie (ervilhaca ou aveia preta) não tenha proporcionado maiores valores de DMPu. CARPENEDO e MIELNICZUK (1990), estudando sistemas de culturas, verificaram que sistemas com consórcios de gramíneas e leguminosas são mais favoráveis a formação de agregados de classes maiores quando comparados

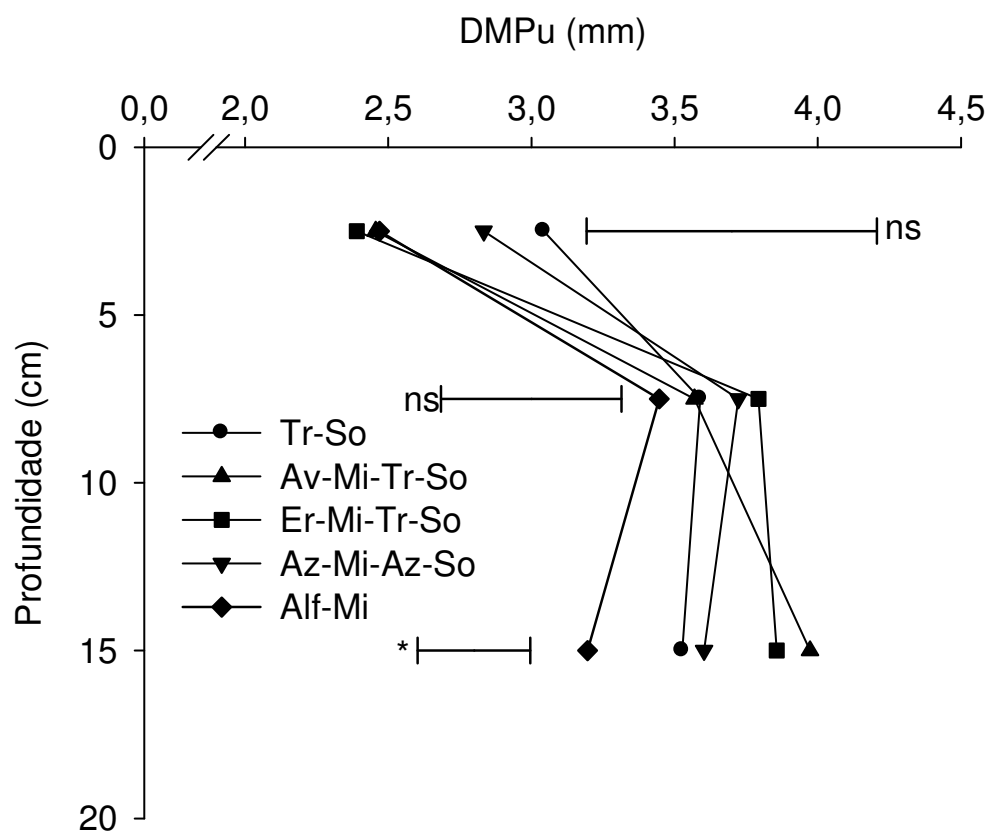


FIGURA 6 – DIÂMETRO MÉDIO PONDERADO ÚMIDO (DMPu) DE AGREGADOS DO SOLO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO, NAS CAMADAS DE 0-5, 5-10 E 10-20 CM. TR-SO = TRIGO – SOJA; AV-MI-TR-SO = AVEIA-MILHO-TRIGO-SOJA; ER-MI-TR-SO = ERVILHACA-MILHO-TRIGO-SOJA; AZ-MI-AZ-SO = AZEVÉM-MILHO-AZEVÉM-SOJA; ALF-MI = ALFAFA-MILHO. BARRAS HORIZONTAIS REPRESENTAM A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICATIVA PELO TESTE DE TUKEY $P < 0,10$ (NS: NÃO SIGNIFICATIVO; * SIGNIFICATIVO A 10 %).

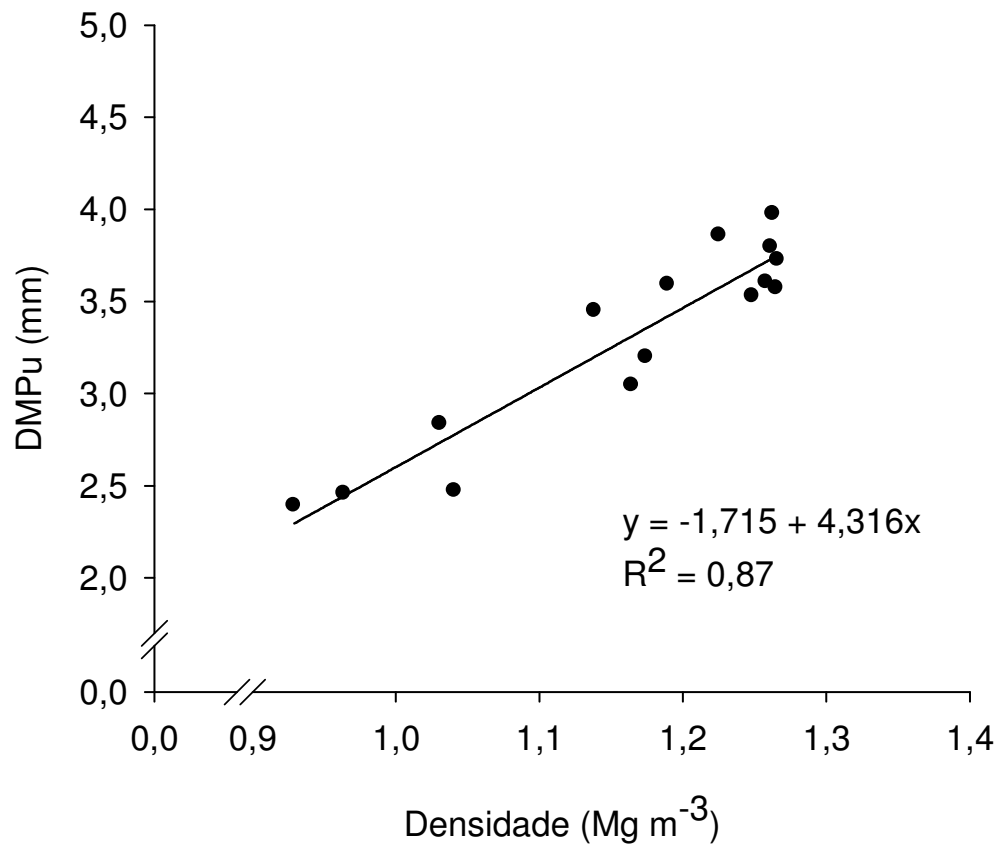


FIGURA 7 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE DO SOLO E DIÂMETRO MÉDIO PONDERADO ÚMIDO (DMPu) DE AGREGADOS, EM TODAS AS PROFUNDIDADES AVALIADAS.

com monocultivos hibernais e estivais. WOHLWENBERG *et al.* (2004) também verificaram que as sequências nas rotações e o tempo de estabelecimento das culturas influenciam o estado de formação de agregados do solo.

Quanto à maior abundância de raízes, uma hipótese para explicar esse fato de que essa abundância tende a promover menor DMPu pode ser baseada na fragmentação de agregados maiores em menores por planos de fraqueza formados durante os ciclos de umedecimento-secamento que ocorrem na rizosfera, ao longo de eventos de precipitação seguidos por absorção de água pelas raízes (BRADFIELD, 1937).

Isso, no entanto, não deve necessariamente ser entendido como algo desvantajoso para a estrutura do solo, pois essa fragmentação produz macroporos responsáveis pela aeração e condutividade hidráulica saturada. Além disso, no solo a unidade estrutural é mantida, pois as raízes continuam desempenhando seu papel de enredamento de unidades estruturais maiores que 8,00 mm, um papel que não foi totalmente considerado nesse estudo, pois os agregados foram manualmente quebrados em unidades menores e as raízes removidas.

3.3 Resistência à penetração

De modo geral, a maior resistência à penetração foi observada no sistema Tr-So, com valores superando ao crítico de 1,5 MPa na camada de 7,5 a 22,5 cm (FIGURA 8), indicando uma ação de carga de rodados nessas camadas mais profundas. Tais cargas também são aplicadas nas camadas superficiais, porém sua ação não foi expressa em termos de resistência à penetração, devido à possível ação de raízes mais concentradas nessas camadas superficiais, a palhada sobre o solo e o efeito de elementos sulcadores e discos de semeadoras que promovem a mobilização do solo mais próximo da superfície. BRAIDA *et al.* (2006), estudando um Argissolo, verificaram que a palhada e o teor de matéria orgânica do solo contribuem na dissipação das forças de compactação impostas pelo tráfego de máquinas.

Por outro lado, o sistema semi-perene Alf-Mi apresentou a menor resistência à penetração ao longo do perfil, superando o valor crítico de 1,5 MPa somente na camada de 12,5 a 15,0 cm (FIGURA 8). Neste sentido, STRECK *et al.* (2004),

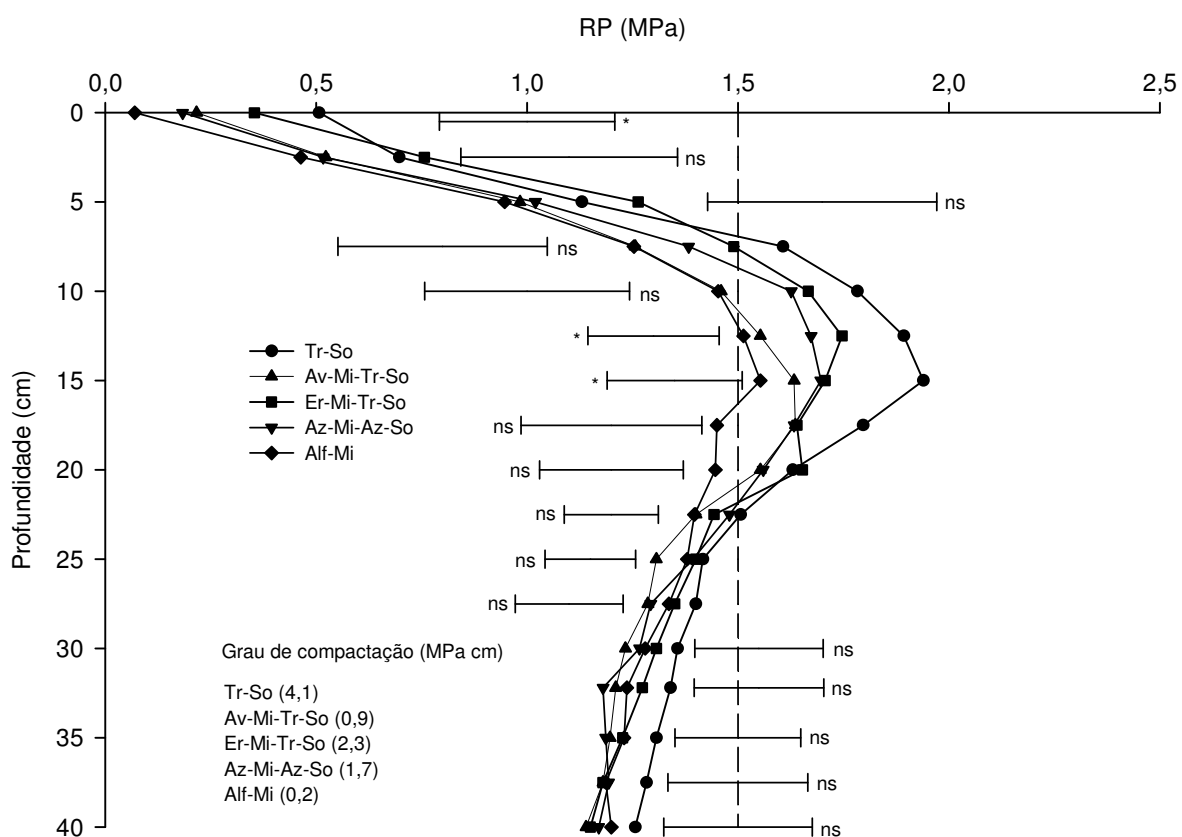


FIGURA 8 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (RP) E GRAU DE COMPACTAÇÃO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO. TR-SO = TRIGO – SOJA; AV-MI-TR-SO = AVEIA-MILHO-TRIGO-SOJA; ER-MI-TR-SO = ERVILHACA-MILHO-TRIGO-SOJA; AZ-MI-AZ-SO = AZEVÉM-MILHO-AZEVÉM-SOJA; ALF-MI = ALFAFA-MILHO. BARRAS HORIZONTAIS REPRESENTAM A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICATIVA PELO TESTE DE TUKEY $P < 0,10$ (NS: NÃO SIGNIFICATIVO; * SIGNIFICATIVO A 10 %). O GRAU DE COMPACTAÇÃO (MPa CM) É DADO PELA INTEGRAÇÃO DA ÁREA DO GRÁFICO QUE POSSUI RP SUPERIOR A 1,5 MPA, CONSIDERADO COMO CRÍTICO.

avaliando o estado de compactação de um Argissolo sob sistema de plantio direto, encontraram uma camada compactada na profundidade de 6 a 14 cm e esta camada é próxima a encontrada por COLLARES *et al.* (2008), trabalhando com um Latossolo Vermelho, onde determinaram valores acima de 2 MPa na camada de 5 a 15 cm.

Dessa forma, pode-se inferir que, mesmo sem um grande tráfego de máquinas e implementos, a consolidação do sistema plantio direto irá aumentar os valores de resistência a penetração do solo. Desta forma, o objetivo das práticas de manejo deverá ser o de não deixar esse valor ultrapassar 2 MPa e progredir em profundidade.

Neste sentido, GENRO JUNIOR *et al.* (2004) relataram que plantas de cobertura de verão podem reduzir os efeitos negativos do tráfego de máquinas. Contudo PRIMAVESI (2002) ressalta que essa redução é devido ao tempo de repouso e à redução do tráfego de máquinas nessas áreas, isso por que as plantas de cobertura de solo estivais necessitam de menos tratos culturais que as culturas principais, de verão. Portanto, além da utilização de espécies de inverno para a cobertura do solo, a utilização de culturas de verão pode ser uma alternativa para a redução da resistência a penetração e o aumento da estrutura grumosa do solo.

Com base nos resultados de resistência à penetração e sua distribuição ao longo do perfil, calculou-se o grau de compactação do solo, dado pela integração da área do gráfico que possui resistência à penetração superior a 1,5 MPa ao longo do perfil (FIGURA 8). Como esperado, o grau de compactação foi maior no sistema Tr-So (4,1 MPa cm) e praticamente nulo no sistema Alf-Mi (0,2 MPa cm) (FIGURA 8).

A resistência à penetração apresentou uma relação direta com a densidade do solo (FIGURA 9), indicando a associação entre essas duas variáveis (SILVA; CABEDA, 2006). Com essa relação e considerando o valor crítico de 1,5 MPa de resistência a penetração, deduz-se que a densidade crítica restritiva desse solo seja de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ (FIGURA 9). O contrário foi observado para a macroporosidade, ou seja, uma relação inversa entre macroporosidade e resistência a penetração (FIGURA 10) e, nesse caso, a macroporosidade crítica seria de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Os maiores valores de resistência à penetração e de grau de compactação no sistema Tr-So estão possivelmente associados à menor ação de raízes, menor adição de carbono ao solo e ao maior tráfego de máquinas (TABELA 1).

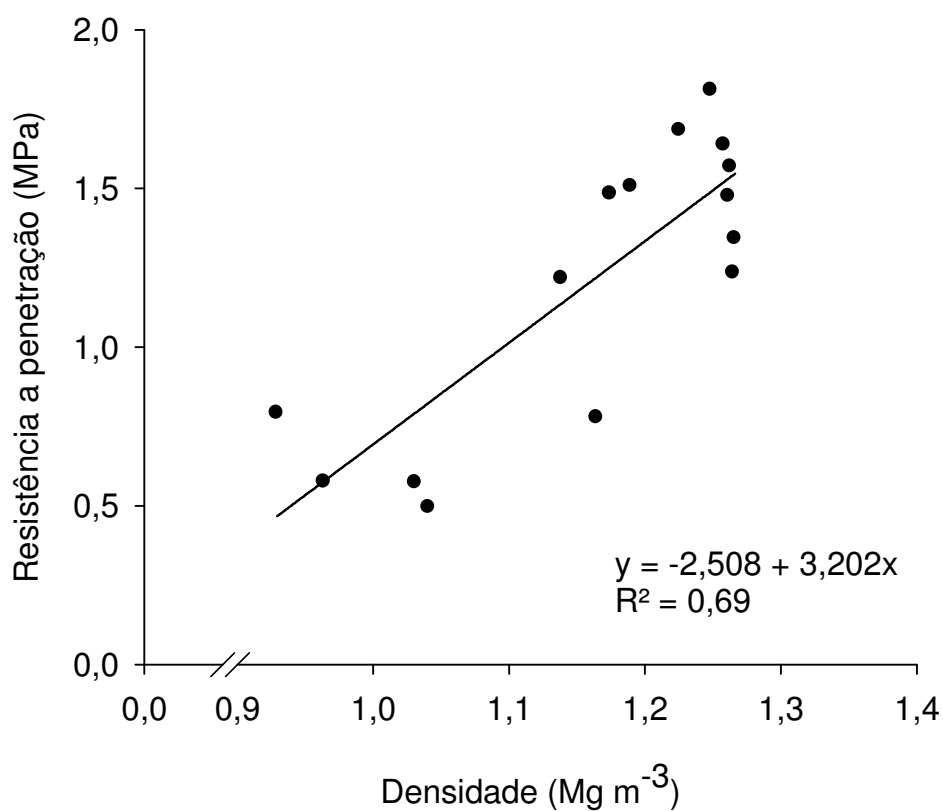


FIGURA 9 – RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE DO SOLO E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO, EM TODAS AS PROFUNDIDADES AVALIADAS. PARA ADEQUAR OS DADOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO NAS CAMADAS ANALISADAS FOI REALIZADA UMA MÉDIA DA SEGUINTE FORMA: A) CAMADA 0-5 CM FOI UTILIZADO OS VALORES DAS CAMADAS 0,0, 2,5 E 5,0 CM; B) CAMADA 5-10 CM OS VALORES FORAM DAS CAMADAS 5,0, 7,5 E 10,0 CM E C) CAMADA 10-20 CM OS VALORES UTILIZADOS FORAM 10,0, 12,5, 15,0, 17,5 E 20,0 CM.

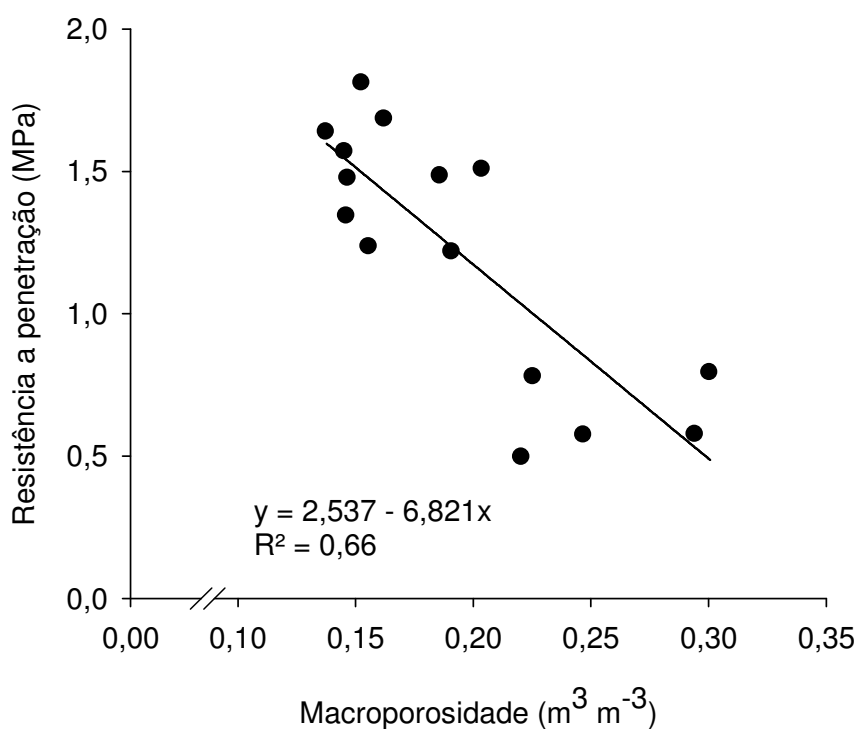


FIGURA 10 – RELAÇÃO ENTRE MACROPOROSIDADE E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO, EM TODAS AS PROFUNDIDADES AVALIADAS. PARA ADEQUAR OS DADOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO NAS CAMADAS ANALISADAS FOI REALIZADA UMA MÉDIA DA SEGUINTE FORMA: A) CAMADA 0-5 CM FORAM UTILIZADOS OS VALORES DAS CAMADAS 0,0, 2,5 E 5,0 CM; B) CAMADA 5-10 CM OS VALORES FORAM DAS CAMADAS 5,0, 7,5 E 10,0 CM E C) CAMADA 10-20 CM OS VALORES UTILIZADOS FORAM 10,0, 12,5, 15,0, 17,5 E 20,0 CM.

4 CONCLUSÕES

O sistema semi-perene de produção de alfafa por três anos consecutivos intercalado com um cultivo de milho possui maior capacidade em promover melhorias na qualidade estrutural do solo, considerando-se atributos como densidade, macroporosidade, condutividade hidráulica e resistência a penetração, na camada de 0-20 cm como um todo, em relação aos sistemas baseados em cultivos de espécies anuais.

Sistemas bi-anuais de rotação, baseados em plantas de cobertura como aveia preta ou ervilhaca possuem maior capacidade em promover melhorias na qualidade estrutural do solo em relação à sucessão trigo – soja. O sistema bi-anual com azevém no inverno para a produção de feno possui uma capacidade intermediária. Nesse sentido, a rotação de culturas baseada na inclusão de plantas de cobertura hibernais, ou forrageiras hibernais, é uma estratégia a ser recomendada no sentido de promoção de qualidade estrutural do solo.

REFERÊNCIAS

ALTHAUS, R.A., CANTERI, M.G., GIGLIOTI, E.A. Tecnologia da informação aplicada ao agronegócio e ciências ambientais: sistema para análise e separação de médias pelos métodos de Duncan, Tukey e Scott-Knott. In: ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10., Ponta Grossa, 2001. Anais. Parte 1, Ponta Grossa, 2001. Pt. 1, p.280-281.

AMADO, T.J.C. O Sistema Plantio Direto na Palha de Qualidade e os Serviços Ambientais. 2009. Disponível em: <http://www.agrisus.org.br/arquivos/AGRISUS_Telmo.pdf>. Acesso em 30/11/2009.

ARAÚJO, R., GOEDERT, W.J. & LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:1099-1108, 2007.

BERTOL, I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D. & BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, 58:555-560, 2001.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:155-163, 2004.

BRADFIELD, R. Soil conservation from the viewpoint of soil physics. **Journal of The American Society of Agronomy**, 29:85-92, 1937.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:605-614, 2006.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICLODI, R.; RUEDELL, J. & PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:121-126, 1995.

CARPENEDO, V. & MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 14:99-105, 1990.

CIVIDANES, F.J. & BARBOSA, J.C. Efeitos do plantio direto e da consorciação soja-milho sobre inimigos naturais e pragas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36 (2):235-241, fev. 2001.

CIVIDANES, F.J. Efeitos do sistema de plantio e da consorciação soja-milho sobre artrópodes capturados no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 37(1):15-23, jan. 2002.

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

CORSINI, P.C. Modificações de características físicas hídricas em perfis das séries Jaboticabal e Santa Teresa, ocasionados pelo cultivo intensivo. **Científica**, 29(2):148-68, 1974.

COSTA, F.S., ALBUQUERQUE, J.A., BAYER, C., FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:527-535, 2003.

D'ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N. & FERREIRA, M.M. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos cerrados no sul do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:1047-1054, 2002.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, 11:199-238, 1988.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p. 3-22. (Publication Number 35).

ELLIES, A.; GREZ, R. & RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para El diagnóstico de La estructura del suelo. **Agro Sur**, 5:51-56, 1997.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997. 212p.

FAO. Desarrollo de la siembra directa en el Brasil tropical. In: FAO. Boletín de servicios agrícolas de la FAO - 147, 81p., 2004. Disponível em:<<http://www.fao.org/docrep/007/y2638s/y2638s00.htm#Contents>>. Acesso em 01/12/2009.

FEBRAPDP – FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. Evolução da área cultivada em plantio Direto no Brasil: 2002/03 à 2005/06. Disponível em:<<http://www.febrapdp.org.br/arquivos/BREvolucaoPD2002a2006.pdf>>. Acesso em 02/12/2009.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:477-484, 2004.

GIACOMINI, S.J.; AITA, C.; VENDRUSCOLO, E.R.O.; CUBILLA, M.; NICOLOSO, R.S. & FRIES, M.R. †. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e

potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27(2):325-334, 2003.

GLIESSMANN, S.R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 3.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. p. 653.

GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America**, 32:180-186, 1968.

HOWARD, A. **Um testamento agrícola**. 1.ed. São Paulo: Expressão Popular, 2007.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. **Aggregate stability and size distribution 1986**. In: KLUTE, A. *et al.* Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods. p. 425-442. 1986.

KHATOUNIAN, C.A. **A reconstrução ecológica da agricultura**. Botucatu: Agroecológica, 2001.

KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, 32(6):945-953, 2002.

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

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. & CÂMARA, C.D. Implicações da colheita florestal e do preparo do solo na erosão e assoreamento de bacias hidrográficas. In: GONÇALVES, J.L.M. & STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba, IPEF, 2002. p. 373-391.

LLANILLO, R.F. **Indicadores de sustentabilidade da produção familiar mecanizada de grãos em modalidades de plantio direto no norte do Paraná, Brasil**. 139 p. Tese (Doutorado em Agronomia). UEL, Londrina (PR), Brasil, 2007.

MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Informativo Agropecuário**, Belo Horizonte, 13 (147). Março, 1987.

MIELNICZUCK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2 ed. rev. e atual. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p. 1-5.

MOLIN, R. **Subsistemas de produção em plantio direto: explorando alternativas econômicas rentáveis para o inverno**. Castro-PR, Fundação ABC, 2008. p. 104.

NCA. **El manejo sostenible de suelos**. USDA, p. 40, 2007. Disponível em: <<http://attra.ncat.org/espanol/pdf/suelos.pdf#xml=http://search.ncat.org/taxis/search/pdfhi.txt?query=el+manejo+sostenible+de+suelo&pr=ATTRAv2&prox=page&rorder=5>>

00&rprox=500&rdfreq=500&rwfreq=500&rlead=500&rdepth=0&sufs=0&order=r&cq=&id=4b2cb3437>, acesso em 01/12/2009.

ODUM, E.P. & BARRETT, G.W. **Fundamentos de ecologia**. [Tradução Pégasus Sistemas e Soluções]. 5.ed. São Paulo, Thomson Learning, 2007. p. 612.

OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 3:197-200, 1968.

PALADINI, F.L.S. & MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15:135-140, 1991.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo**: a agricultura em regiões tropicais. São Paulo, Nobel, 2002.

REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In.: CARLESSO, R.; PETRY, M. ; ROSA, G. & CERETTA, C.A. **Irrigação por Aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, 2001. p. 114-131.

REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Qualidade física dos solos. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2006. 30 p. (apostila didática).

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E.; BUCKNER, J.FORNARI, A.; SÁ, M.F.M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENZKE-FILHO, S.P.; PAULLETI, V. & NETO, M.S. O plantio direto como base do sistema de produção visando o seqüestro de carbono. **Revista Plantio Direto**, 84:45-61, 2004.

SECCO, D.; DA ROS, C.O.; SECCO, J.K. & FIORIN, E.J. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:407-414, 2005.

SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E.; BREJDA, J.J. Soil resilienc: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, 164:224-234, 1999.

SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21:113-117, 1997.

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

SILVA, R.R., SILVA, M.L.N., FERREIRA, M.M. Atributos físicos indicadores da qualidade do solo sob sistemas de manejo na bacia do Alto do Rio Grande – MG. **Ciência Agrotécnica**, 29(4):719-730, jul./ago., 2005.

SILVA, A.J.N. & CABEDA, M.S.V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30(6):921-930, 2006.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (SSSA). Defining and assessing soil quality. Madison, Wisc.: **Soil Science Society of America** Special Publication 35, 1994.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, 34(3):755-760, mai-jun, 2004.

TISDALL, J.M.; COCKROFT, B.; UREN, N.C. The stability of soil aggregates as affected by organic materials, microbial activity and physical disruption. **Australian Journal of Soil Research**, 19:9-17, 1978.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C. S. & GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, 59(4):795-801, out./dez. 2002.

VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 4:242-246, 1961.

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