

Propriedades físicas de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca

Sergio Hitoshi Watanabe, Cássio Antonio Tormena*, Marcelo Alessandro Araújo, Pedro Soares Vidigal Filho, José Carlos Pintro, Antonio Carlos Saraiva da Costa e Antonio Saraiva Muniz

Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.

**Autor para correspondência. e-mail: catormena@uem.br*

RESUMO. A região do Noroeste do Estado do Paraná apresenta, na maior parte da sua extensão, solos de textura média a arenosa que, dependendo do sistema de preparo e manejo do solo e das culturas, podem ser predispostos a elevados níveis de degradação física. O objetivo deste trabalho foi avaliar algumas propriedades físicas de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, sob três sistemas de preparo do solo, para a implantação da cultura da mandioca (Euphorbiaceae). O experimento foi instalado em área da Fazenda Experimental Pinduca Ltda, Araruna, Estado do Paraná. Os sistemas de preparo adotados foram: plantio direto da mandioca na palhada da cultura da aveia sem revolvimento do solo, plantio em áreas sob preparo mínimo com escarificação e, preparo convencional com aração com arado de aivecas e gradagem. As propriedades físicas do solo avaliadas foram: distribuição dos tamanhos de agregados por peneiramento a seco, resistência do solo à penetração, densidade e porosidade do solo. Os resultados indicaram que os sistemas de preparo considerados levaram a alterações significativas na maioria das propriedades físicas avaliadas. O diâmetro médio ponderado e geométrico dos agregados foi significativamente maior no sistema de plantio direto em relação ao preparo mínimo e ao preparo convencional. O plantio direto promoveu aumentos na densidade do solo e redução na macroporosidade em comparação com os outros sistemas de preparo. A resistência do solo à penetração apresentou valores considerados restritivos ao crescimento da cultura da mandioca no tratamento submetido ao sistema de plantio direto, em comparação com os sistemas de preparo mínimo e convencional.

Palavras-chave: preparo do solo, densidade do solo, porosidade do solo, agregação do solo, mandioca.

ABSTRACT. Soil physical properties of a Dystrophic Red Latosol (Oxisol) influenced by tillage systems for cassava production. The northwest area of the State of Paraná presents, in most of its extension, loamy to sandy texture soils that, depending on the system of management and tillage of the soil and crops, they can be predisposed to high levels of physical degradation of the soil. With the objective of characterizing the effect of cultivation systems for the cassava crop (Euphorbiaceae) in a Dystrophic Red Latosol (Oxisol), experiments were installed in the experimental area of the Pinduca Ltda Company, Araruna - PR. Three systems of cultivation were adopted: no-tillage of the cassava on the residues of the oats crop following the cultivation of annual crops without disturbing the soil, cultivation areas under minimum tillage with subsoiling, and conventional tillage with moldboard plow and disc harrowing. The physical properties evaluated were the size distribution of the aggregates after dry sieving, the soil resistance to root penetration, the bulk density and the porosity of the soil. The results indicated that the adoption of the different cultivation systems resulted in important alterations in most of the physical properties of the evaluated soil. The mean weight and geometric diameter of the aggregates differed among the systems of cultivation. The no-tillage cultivation system promoted increases in the bulk density of the soil and reduction in the macroporosity in comparison to the plowed systems of soil cultivation. In the absence of disturbing the soil, the soil resistance to penetration was restrictive to the growth of the plants in comparison to the systems of minimum and conventional cultivation of the soil.

Key words: soil tillage, bulk density, soil porosity, soil aggregation, cassava.

Introdução

A mobilização do solo, a incorporação e/ou queima dos resíduos culturais contribuem para acelerar os processos de degradação do solo nas regiões tropicais. A região Noroeste do Estado do Paraná é composta, em sua maioria, por solos de textura média a arenosa, com baixos teores de matéria orgânica, nos quais o cultivo e o preparo excessivo do solo podem induzir à sua degradação orgânica. Nesse contexto, os sistemas de preparo assumem fundamental importância devido à fragilidade estrutural desses solos.

Na região do Noroeste do Estado do Paraná, a cultura da mandioca tem-se destacado pelos aspectos econômicos e sociais envolvidos em sua cadeia produtiva (Großko, 1999). De forma geral, os sistemas de preparo do solo para a sua implantação dependem de, se a cultura será implantada em sucessão a culturas anuais ou para a reforma de pastagens. No caso de sucessão das culturas anuais, o sistema de preparo torna-se de fundamental importância, face à elevada suscetibilidade, da maioria dos solos desta região, à erosão. Assim, o plantio direto, utilizando os resíduos da cultura anterior, tem sido preconizado para a sustentabilidade do sistema de produção. No entanto, resultados de pesquisa regionais (Oliveira, 1998) e em outros países produtores, indicam decréscimo da produtividade da cultura na ausência ou redução do revolvimento do solo. A compactação do solo, decorrente da ausência de revolvimento, pode ser o fator determinante do decréscimo da produtividade, indicando que as condições físicas do solo são fundamentais para o sucesso dessa cultura.

Os fatores que controlam a agregação do solo determinam suas condições físicas. Dessa forma, os processos naturais de agregação do solo, os sistemas de manejo, os níveis de matéria orgânica do solo, o teor de argila dos solos, entre outros fatores, determinam a formação de agregados mais ou menos, estáveis. O solo se apresenta como um sistema poroso heterogêneo, o qual determina a resistência do solo à penetração, aeração, a temperatura, bem como, a disponibilidade e o fluxo de água no solo para as raízes (Glinski e Lipiec, 1990; Semmel *et al.*, 1990; Horn e Lebert, 1994).

A utilização de diferentes sistemas de preparo afeta diretamente as propriedades físicas do solo, incluindo o tamanho médio e a distribuição dos tamanhos dos agregados. Resultados experimentais em diferentes condições de solo e de manejo (Carpenedo e Mielniczuk, 1990; Castro Filho *et al.*, 1998; Hajabbasi e Hemmat, 2000) indicam que os sistemas conservacionistas que mantêm parcial ou

totalmente os resíduos na superfície do solo, tais como o plantio direto e o cultivo mínimo, contribuem para a melhoria da estrutura do solo. Utilizando diferentes índices que medem a agregação do solo, Castro Filho *et al.* (1998) constataram que os efeitos dos sistemas de preparo, especialmente plantio direto e preparo convencional, na agregação do solo são significativos apenas na camada superficial de até 0,10 m. De acordo com Silva e Mielniczuk (1997), a agregação e a estruturação do solo representam características dinâmicas do solo e interferem diretamente na produtividade das culturas, por determinar a disposição mecânica das unidades estruturais e/ou partículas e a variação do espaço poroso do solo.

A densidade, a resistência do solo à penetração e a porosidade do solo são parâmetros frequentemente utilizados para caracterizar o estado de compactação dos solos e os efeitos decorrentes dos efeitos dos sistemas de preparo sobre a estrutura e propriedades físicas dos solos (Centurion e Dematte, 1985; Eltz *et al.*, 1989; Albuquerque, *et al.*, 1995; Klepker e Anghinoni, 1995; Tormena e Roloff, 1996; Tormena *et al.*, 1998; Corsini e Ferraud, 1999). Estas propriedades podem afetar a distribuição, a quantidade e a morfologia das raízes, com reflexos no crescimento da parte aérea das plantas (Klepker e Anghinoni, 1995). A hipótese de que estas alterações nas propriedades físicas do solo resultam em condições adversas para o desenvolvimento das raízes, controlando o crescimento da parte aérea das plantas e a taxa fotossintética, tem sido confirmada em diferentes resultados de pesquisas (Davies e Zhang, 1991; Tardieu, 1994).

Entretanto, têm sido registradas diferenças no impacto dos sistemas de manejo nas propriedades físicas do solo. Em um estudo utilizando-se de duas classes de solos e de diferentes sistemas de preparo, Fernandes *et al.* (1983) constataram que os valores de densidade e porosidade total foram influenciados pelos sistemas de preparo. Já Eltz *et al.* (1989) não encontraram diferenças significativas para a densidade do solo, macro, micro e porosidade total, apesar de constatarem um aumento de produção de aproximadamente 22% no sistema de plantio direto em comparação com o plantio convencional.

Avaliação das condições físicas do solo decorrentes dos diferentes sistemas de preparo do solo utilizados para a cultura da mandioca, no Noroeste do Estado do Paraná, são escassas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos dos sistemas de preparo convencional com aração e gradagem, preparo mínimo com escarificação e, plantio

direto em algumas propriedades físicas de um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, cultivado com a cultura da mandioca (*Euphorbiaceae*) em sucessão a culturas anuais conduzidas sob plantio direto há dois anos.

Material e métodos

O experimento foi instalado em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (Embrapa, 1999), em área pertencente a Pinduca Indústria Alimentícia Ltda, no município de Araruna, Estado do Paraná, em maio de 1999. O clima da região é classificado como Cfb, mesotérmico, sem estação seca, com verões quentes, com temperatura anual média de 21,5°C e precipitação média anual de 1617 mm e umidade relativa do ar anual de 62% (Godoy *et al.*, 1976).

A caracterização física e química do solo realizada antes da implantação do experimento, encontra-se na Tabela 1, e foi feita conforme Embrapa (1997).

Os tratamentos foram constituídos de três sistemas de preparo de solo: plantio direto com revolvimento do solo apenas ao longo das linhas de plantio (PD), preparo mínimo com escarificação a uma profundidade de 25-30 cm seguido de destorroador e posterior plantio (PM) e, preparo convencional com aração com arado de aiveca a uma profundidade entre 25-30 cm seguido de gradagem niveladora (PC). Antes da implantação dos tratamentos a área vinha sendo cultivada no sistema de plantio direto, com culturas anuais, por dois anos consecutivos. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos completos casualizados, com oito repetições por tratamento, perfazendo um total de 24 unidades experimentais.

Nos três tratamentos, em cada repetição, foram coletadas 3 amostras de solo, na camada de 0-0,15 m, com massa de aproximadamente 500 g, totalizando 24 amostras de solo para o total de repetições de cada tratamento, as quais foram utilizadas para a determinação da distribuição do tamanho dos agregados por peneiramento a seco (DTAS). As amostragens foram realizadas em julho de 2000. Para determinar o tamanho dos agregados, procedeu-se à separação dos agregados por vibração, com o tempo de agitação de 60 segundos por amostra. O conjunto de peneiras utilizado apresentava os seguintes diâmetros de abertura de malha: 9,52 mm, 7,93 mm, 4,0 mm, 2,0 mm e 1,0 mm. O material retido em cada peneira,

após pesagem, teve sua massa corrigida para massa seca em estufa a 105°C. A partir destes resultados, foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados, de acordo com a metodologia descrita por White (1993), utilizando-se a equação:

$$DMP = \sum_{i=1}^n X_i \cdot W_i \quad (1)$$

onde X_i é o diâmetro médio da fração i , que corresponde ao ponto médio entre o tamanho da peneira, na qual o material foi retido, e o tamanho da peneira de diâmetro imediatamente superior, e W_i é a proporção do total da amostra retida na peneira.

Para determinar o diâmetro médio geométrico (DMG) e o desvio padrão geométrico (DPG), os dados da distribuição dos tamanhos de agregados a seco foram ajustados usando a função de distribuição log-normal, descrita por Perfect *et al.* (1993):

$$P(X > x) = 50 - 100 \operatorname{erf}[\ln(x/\text{DMG})/\ln(\text{DPG})] \quad (2)$$

onde $P(X > x)$ é a porcentagem de agregados (do peso total), com tamanho maior do que a peneira de tamanho x , erf é a função do erro, DMG é o diâmetro médio geométrico e DPG é o desvio padrão geométrico.

O DMG refere-se ao diâmetro de abertura de malha da peneira (x) através da qual 50% da massa acumulada irá passar. Por sua vez, o DPG é numericamente igual à diferença entre o tamanho de peneira através da qual 50% da massa acumulada irá passar e o tamanho de peneira através da qual 84,13 ou 13,87% da massa acumulada irá passar (Gardner, 1956). O modelo foi ajustado usando o método de Gauss-Newton de regressão não linear (Statistical Analysis System Institute, SAS 1999).

A resistência do solo à penetração foi medida oito meses após a instalação do experimento utilizando-se um penetrômetro seguindo a metodologia descrita em Tormena e Roloff (1996). A resistência foi avaliada a cada 0,05 m até a profundidade de 0,40 m, três dias após uma chuva, com a umidade do solo próxima da capacidade de campo. Foram coletados cinco valores de resistência do solo por profundidade, em cada unidade experimental e, posteriormente, calculou-se a média dos valores de resistência do solo para cada tratamento.

Tabela 1. Caracterização física e química do LATOSSOLO VERMELHO Distrófico utilizado no estudo.

Prof (m)	pH CaCl ₂	Al ⁺³	H ⁺ + Al ⁺³	Ca ⁺² + Mg ⁺²	Ca ⁺²	K ⁺	P	C	areia	silte	argila
				cmol _c dm ⁻³			mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹	
0,00 – 0,10	5,37	0,00	3,31	3,74	2,28	0,60	9,00	10,78	680	10	310
0,10 – 0,20	5,00	0,27	3,70	3,50	2,32	0,49	4,67	11,44	690	10	300
0,20 – 0,40	4,50	0,60	4,34	2,25	1,48	0,17	1,00	5,86	650	20	330
0,40 – 0,60	4,47	0,77	4,81	1,87	1,37	0,07	1,00	4,79	650	20	330
0,60 – 0,80	4,23	1,27	5,77	1,39	0,98	0,05	1,00	6,12	630	10	360
0,80 – 1,00	4,23	1,27	5,90	1,45	1,06	0,04	0,67	5,99	630	30	340

Quatro amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos (0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura) no centro da camada de 0 – 0,15 m de profundidade em cada parcela. Os pontos de amostragem foram aleatórios dentro de cada bloco. Após a coleta, as amostras foram envolvidas em papel alumínio, acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura de 5° C até serem processadas. Em seguida, as amostras foram devidamente preparadas, saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir 2/3 da altura das amostras.

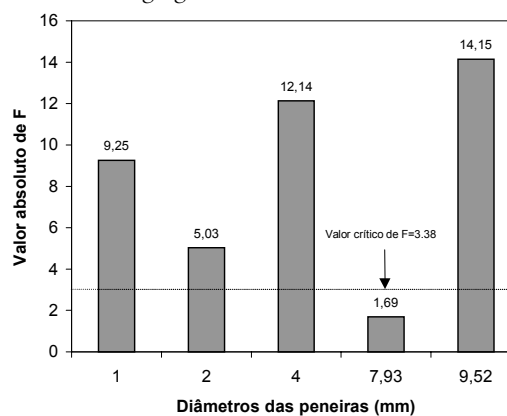
As amostras indeformadas foram submetidas ao potencial de -0,006 Mpa, utilizando uma mesa de tensão adaptada de Kiehl (1979). A partir dos resultados obtidos, calculou-se os valores de macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo, conforme Embrapa (1997). A porosidade total foi obtida como o conteúdo de água na saturação. Após a utilização das amostras indeformadas para determinação da porosidade do solo, as mesmas foram utilizadas para o cálculo da densidade do solo, conforme metodologia descrita por Blake e Hartge (1986).

As análises estatísticas foram realizadas considerando um delineamento em blocos casualizados, conforme Hatcher e Stepanski (1997) e executadas com o programa estatístico SAS (Statistical Analysis System Institute, 1999).

Resultados e discussão

O impacto dos sistemas de preparo na distribuição dos tamanhos de agregados pode ser avaliado pela magnitude dos valores de F obtidos na análise de variância (Figura 1). Os valores de F obtidos foram de 9,25; 5,03; 12,14; 1,69 e 14,15, respectivamente para as peneiras com abertura de malha equivalentes a 1,0; 2,0; 4,0; 7,93 e 9,52 mm. O valor crítico de F foi de 3,3875, de modo que todo valor de F maior que o valor crítico indica efeito significativo dos tratamentos. Para a peneira de 7,93 mm, os valores médios (dados não anexados) não diferiram entre os sistemas de preparo, enquanto que para as peneiras de 1,0 até 4,0 mm

não houve diferenças entre os sistemas de PC e PM, os quais apresentaram valores médios maiores do que no PD. Já na peneira de 9,52 mm os resultados mostram que o PD foi superior aos sistemas de PC e PM, os quais não diferiram entre si. Estes resultados refletem a atuação dos sistemas de preparo do solo, em especial dos efeitos dos implementos utilizados para o revolvimento do solo que homogeneizaram a distribuição de tamanhos de agregados nos sistemas de PC e PM.

**Figura 1.** Distribuição dos valores de F em função da proporção da massa de agregados retida nos diferentes diâmetros de peneiras

De acordo com os valores de F (Figura 1), os agregados retidos nas peneiras de diâmetro de malha de 4,0 e 9,52 mm foram os mais afetados pelos sistemas de preparo (Figura 1), indicando que os sistemas de preparo do solo promovem maiores alterações nesses tamanhos de agregados. Em PD, a maior proporção de agregados retidos na peneira de 9,52mm reflete os efeitos da ausência do revolvimento e da compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas, dos quais resultam agregados de maior diâmetro. Já nos sistemas com revolvimento do solo, a quebra dos agregados pelos equipamentos de preparo reduz o seu diâmetro em relação ao sistema sem revolvimento, resultando num aumento da quantidade de material que passa pelas peneiras de

maior diâmetro e, portanto, do que fica retido nas peneiras de menor diâmetro.

A maior variação na massa dos agregados maiores que 9,52 mm indica que a proporção de agregados grandes é muito influenciada pelos sistemas de manejo. Uma das razões associadas a esses resultados é que os agregados mais afetados pelos sistemas de preparo são os de maior diâmetro, os quais são considerados menos estáveis (Braunack e Dexter, 1989a). Quando o preparo do solo é realizado em condições adequadas de umidade, ocorre desintegração mecânica dos agregados, fazendo com que o seu tamanho diminua. Por outro lado, quando o preparo e o tráfego são executados com o solo úmido, o processo de compactação conduz à formação de agregados maiores (Warren *et al.*, 1986). O efeito de homogeneização com uma maior proporção de agregados menores criados pelos sistemas com revolvimento do solo resulta em maior volume de poros, com reflexos em outras propriedades físicas do solo. O maior número de pontos de contato entre os agregados permite o aumento nos valores de poros totais, nos valores de macroporos e redução na densidade e na resistência do solo à penetração.

Um dos atributos relacionados à qualidade física do solo é o diâmetro dos agregados do solo. O diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) foi significativamente influenciado ($p < 0,05$) pelos sistemas de mobilização do solo (Figura 2). Neste estudo, os valores de DMP foram de 7,70, 6,93 e 6,73 mm para os sistemas PD, PM e PC, respectivamente. Estes resultados contradizem aqueles obtidos por Silva e Mielniczuk (1998), em solos de textura argilosa, em que constataram pouca variação entre os valores de DMP, sob diferentes sistemas de cultivo. Conforme Zhang (1994), o diâmetro médio dos agregados obtidos por peneiramento a seco tende a diminuir com o aumento no teor de matéria orgânica do solo. Apesar dos teores de matéria orgânica não diferirem ($p > 0,05$) entre os sistemas de preparo, constatou-se um aumento no diâmetro médio dos agregados no PD e PM em relação ao PC (Figura 2).

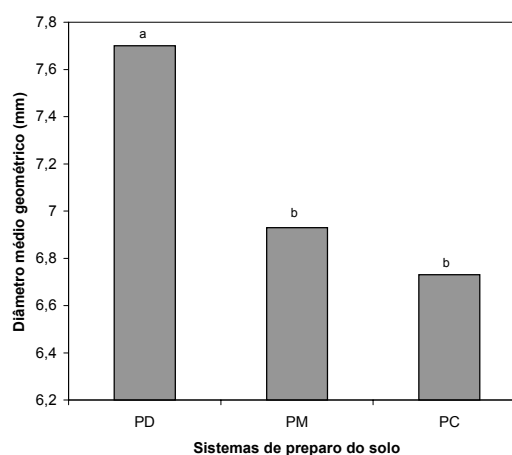


Figura 2. Valores do diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG) obtidos utilizando a função de White (1993) nos sistemas de preparo do solo utilizados (PD= Plantio Direto; PM= Preparo Mínimo e PC= Plantio Convencional)

Outro aspecto importante da estrutura do solo que pode ser alterado pelo manejo é a distribuição do tamanho dos agregados, que é considerada um indicador importante do estado de agregação do solo. A distribuição do tamanho dos agregados a seco é considerada por Braunack e Dexter (1989a) como um indicador do estado de agregação do solo. Análise estatística dos parâmetros do modelo descrito por Perfect *et al.* (1993) demonstrou que os valores de DMG foram afetados pelos sistemas de preparo do solo ($p < 0,05$). Também os valores de DPG foram significativamente afetados pelos sistemas de preparo ($p < 0,05$), indicando que a distribuição de tamanhos de agregados secos variou em função dos sistemas utilizados (Tabela 2), uma vez que o DPG descreve a amplitude dos valores ao redor da média do tamanho de agregados. O valor médio de DPG foi maior no tratamento PD em relação aos tratamentos PM e PC, que também diferiram entre si. Num estudo conduzido numa Terra Roxa estruturada sob pastagem, Imhoff *et al.* (2000) constataram diferenças na agregação do solo em duas posições de amostragem, apesar de que naquele estudo apenas o valor de DPG foi significativamente diferente entre os tratamentos considerados.

Tabela 2. Valores médios (mm) e níveis de significância do teste F para o diâmetro médio geométrico (DMG) e desvio padrão geométrico (DPG) obtidos do modelo de distribuição de tamanhos de agregados a seco: $P(X > x) = 50 - 100 \operatorname{erf} [\ln(x / \text{DMG}) / \ln(\text{DPG})]$

Variável	PD	PM	PC	F	P>F
DMG	9,05 a	7,15 b	6,58 c	757,89	0,0001
DPG	3,01 a	2,92 b	2,82 c	96,75	0,0001

Os maiores valores de DPG e DMG encontrados no PD, quando comparado ao PM e PC, indicam que o sistema proporcionou maior tamanho e uma maior variação de tamanho de agregados, já que quanto maior o DPG, maior é a amplitude dos valores ao redor da média. Para os sistemas de PM e PC ocorreu uma homogeneização na distribuição dos tamanhos de agregados em função do fracionamento mecânico proporcionado por esses sistemas de preparo (Figura 1). Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que o DPG foi modificado pelos tratamentos e que os tratamentos PM e PC promoveram redução na proporção de agregados de maior tamanho, o que se deve aos efeitos dos implementos na fragmentação dos agregados do solo. A maior proporção de agregados de maior tamanho no sistema PD pode estar relacionada aos efeitos do tráfego de máquinas cumulativamente neste sistema, sob condições de umidade elevada, que promove a formação de agregados maiores (Warren *et al.*, 1986).

Estes resultados mostram que tanto o DMP como o DMG foram sensíveis para detectar os efeitos dos tratamentos nos parâmetros da estrutura avaliados pela distribuição dos tamanhos de agregados. Braunack e Dexter (1989a) e Horn *et al.* (1995) registraram que o movimento de íons é incrementado quando os agregados são pequenos e uniformes. Tisdall e Oades (1982) observaram que os solos com estrutura degradada apresentam diâmetro menor que 1mm ou maior que 10mm, e que nestas condições, pode ocorrer redução no movimento de íons, devido a maior tortuosidade dos poros do solo (Shierlaw e Alston, 1984 e Hoffman e Jungk, 1995). Os resultados obtidos por diversos autores (Braunack e Dexter, 1989a e b; Passioura, 1991; Vepraskas, 1994) sugerem que o tamanho dos agregados entre 1 mm e 4 mm de diâmetro parecem ser os mais convenientes para o fluxo de água, sempre que não existam limitações de aeração. Também, Braunack e Dexter (1989b) determinaram o tamanho de agregados e concluíram que diâmetro de agregados menor que 0,5 mm ou maior que 8 mm podem limitar o desenvolvimento das culturas, por influenciar a capacidade de armazenamento de água do solo, a aeração e/ou a resistência mecânica à penetração das raízes. Desta forma, os resultados obtidos nesta pesquisa sugerem, com base nas constatações dos autores acima, a não

ocorrência de restrições ao fluxo de água e íons do solo para as raízes da cultura da mandioca.

Os resultados da avaliação da resistência do solo à penetração (RP) são apresentados na Figura 3. Constataram-se maiores valores de RP no PD, comparado ao PC e PM, até a profundidade de 0,30m. Até esta profundidade, os maiores valores de RP no PM comparados ao PC devem-se ao revolvimento parcial do solo pelo escarificador. Abaixo desta profundidade, constata-se efeito residual da escarificação cuja profundidade média de atuação foi de 0,35 m. Os maiores valores de RP no PD podem influenciar diretamente o stand final da cultura, a altura de plantas e a produtividade de raízes, uma vez que afeta diretamente o crescimento das raízes e por sua vez a absorção de água e nutrientes. Valores de RP acima de 2,0 MPa têm sido considerados impeditivos ao crescimento radicular para a maioria das culturas (Taylor e Burnett, 1964; Taylor *et al.*, 1966; Nesmith, 1987). Similarmente a esta pesquisa, maiores valores de resistência do solo à penetração, indicando maiores restrições ao crescimento radicular, foram constatados em sistemas de plantio direto, comparativamente a sistemas com revolvimento do solo (Tormena e Roloff, 1996; Tormena *et al.*, 1998; De Maria *et al.*, 1999).

Foram observadas diferenças significativas na densidade do solo (Ds) entre os tratamentos avaliados. Os resultados obtidos indicam que o revolvimento do solo resultou em uma redução significativa ($p < 0,05$) da densidade do solo em comparação com PD (Figura 4).

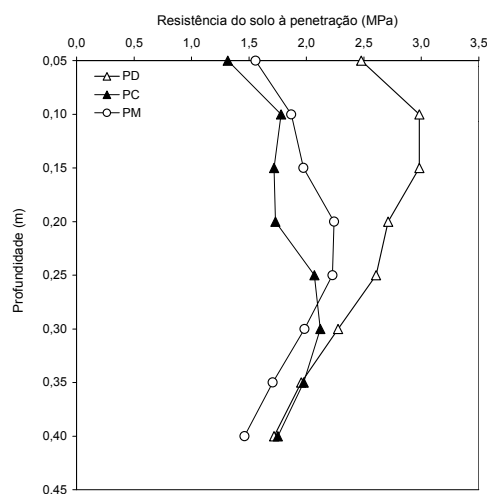


Figura 3. Resistência do solo à penetração nos sistemas de preparo utilizados para a cultura da mandioca (PD= Plantio Direto; PC= Plantio Convencional e PM= Preparo Mínimo)

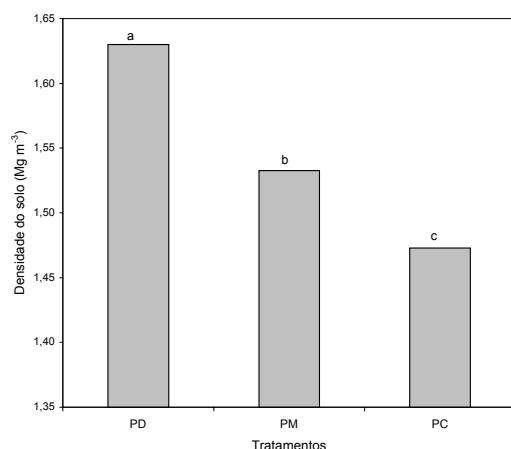


Figura 4. Valores de densidade do solo para os diferentes tratamentos na profundidade de 0-0,15 m (PD= Plantio Direto; PM= Preparo Mínimo e PC= Plantio Convencional)

Como pode ser constatado na Figura 4, os maiores valores de densidade do solo ocorreram no PD, o que se deve ao efeito cumulativo de tráfego de máquinas e da ausência de mobilização mecânica do solo. Resultados obtidos por Silva *et al.* (1997) também demonstraram maiores valores de Ds sob plantio direto. Voorhees (1983) salienta que em sistemas sem revolvimento, os processos naturais, tais como ciclos de secagem e umedecimento, são ineficientes em reduzir a densidade do solo, principalmente em solos não expansivos. Tormena *et al.* (1998) também constataram aumento da densidade do solo após a introdução do sistema de plantio direto sob diferentes condições de revolvimento inicial do solo, principalmente na linha trafegada. Por outro lado, o revolvimento intensivo do solo com arado de aveia proporcionou maior redução na densidade do solo em comparação com o revolvimento parcial efetuado com escarificador (Figura 4). Os menores valores da densidade do solo, no preparo convencional e no preparo mínimo, podem ser atribuídos ao revolvimento do solo e à incorporação dos resíduos culturais (Hill, 1990). Outros autores também observaram redução na densidade com o aumento na mobilização do solo (Cassel, 1982; Voorhees, 1983; Centurion e Dematte, 1985; Klepker e Anghinoni, 1995; Corsini e Ferraud, 1999). No entanto, contrário aos resultados obtidos neste experimento, os resultados obtidos por Eltz *et al.* (1989) e Albuquerque *et al.*

(1995) não constataram efeitos significativos de diferentes sistemas de preparo na densidade do solo. Ressalta-se que os solos eram argilosos.

Os valores de porosidade total do solo, macro e microporosidade são apresentados na Figura 5. Os sistemas de preparo PM e PC apresentaram valores diferenciados na porosidade do solo, quando comparados ao PD. A utilização do arado de aveia e de escarificadores, nos tratamentos PC e PM, proporcionaram os maiores valores ($p < 0,001$) de macroporosidade (MAC) e porosidade total (PT) nesse solo (Figura 5). Já os valores de microporosidade (MIC) não diferiram entre os tratamentos. Ressalta-se que a presença da cultura da aveia, com sistema radicular fino e abundante, neste período da avaliação, não foi suficiente para promover aumento na porosidade do solo. Os dados indicam que o aumento da densidade do solo ocorreu às expensas da diminuição dos poros de maior diâmetro.

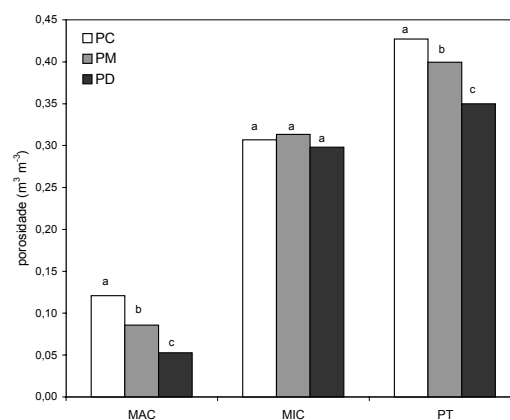


Figura 5. Valores de porosidade do solo para os diferentes tratamentos (PC= Plantio Convencional; PM= Preparo Mínimo e PD= Plantio Direto) na profundidade de 0-0,15m. MAC=macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); MIC=microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); PT=porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com aqueles obtidos por Hill e Cruse (1985), que constataram redução na macroporosidade do solo na ausência de revolvimento. De acordo com Van Ouwerkerk e Boone (1970), o plantio direto além de reduzir a porosidade total, muda drasticamente a distribuição do tamanho dos poros, com redução dos poros de maior tamanho, o que pode ser constatado na Figura 5. Desta forma, a hipótese de que o revolvimento do solo aumenta o número de poros drenáveis (Negi *et al.*, 1981; Tollner *et al.*, 1984) também é confirmada pelo aumento no volume de macroporos. As implicações destes resultados, conforme Hill e

Cruse (1985), é que os solos com preparo convencional poderiam drenar mais rapidamente e influenciar, temporalmente, a disponibilidade de água às plantas.

A macroporosidade ou a porosidade ocupada com ar é uma medida diretamente relacionada com a difusão de oxigênio no solo para as raízes das plantas (Grable e Siemer, 1968). De acordo com Thomasson (1978) e Erickson (1982), a macroporosidade determina a capacidade de aeração do solo, e os resultados obtidos sugerem que a capacidade de aeração do solo segue em ordem crescente nos sistemas de preparo PD, PM e PC. Valores de porosidade com ar abaixo de 10-15% são geralmente adotados como restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas, apesar da dependência da espécie de planta e da atividade biológica do solo e do regime de umidade do solo. Os resultados obtidos (Figura 5) indicam que estas condições potencialmente impeditivas podem ocorrer no PD, cujo valor médio da macroporosidade é da ordem de 5%, principalmente em períodos úmidos prolongados. Utilizando-se a classificação proposta por Thomasson (1978), a capacidade de aeração do solo nos tratamentos PD, PM e PC é considerada ruim, moderada e boa, respectivamente. Thomasson (1978) também salienta que valores adequados de capacidade de aeração são dependentes das condições climáticas, e os valores críticos de porosidade de aeração devem ser ampliados sob condições mais úmidas.

A distribuição da macroporosidade do solo em função da densidade, para os diferentes sistemas de preparo do solo, é mostrada na Figura 6.

Constata-se que a adoção dos sistemas de preparo induziram a diferentes amplitudes de densidade e de macroporosidade do solo. O PC, por promover o revolvimento total do solo, proporcionou a redução da densidade e o aumento da macroporosidade do solo. Por outro lado, o PD apresentou os maiores valores de densidade e menores de macroporosidade e estes constituem os valores extremos de densidade e macroporosidade do solo. Já o sistema PM proporcionou a mais ampla variação de densidade e macroporosidade do solo. Os sistemas PD e PC agruparam os valores de densidade e macroporosidade nos extremos da variação observada enquanto que o PM proporcionou uma amplitude de variação dos parâmetros físicos, abrangendo as variações observadas em PD e PC, exceto os extremos superiores de PD. A disponibilidade de oxigênio às plantas é

determinada pelas taxas de difusão de oxigênio, as quais diminuem progressivamente com a redução do espaço poroso ocupado com ar, além de depender da continuidade e tortuosidade dos macroporos (Kay e Angers, 2000). A maior variabilidade de condições físicas em PM demonstra o efeito de revolvimento parcial do solo, criando poros com amplitude de tamanho que podem potencialmente prover as raízes das plantas com oxigênio nas condições deste solo.

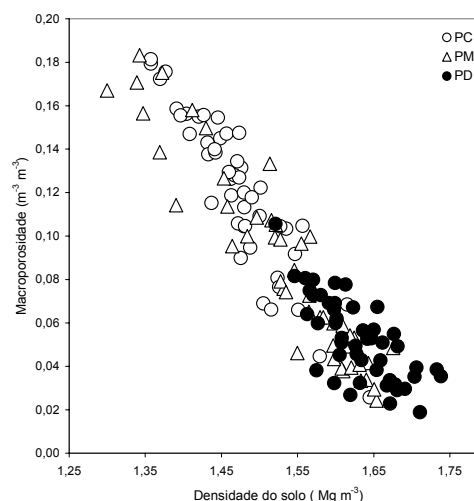


Figura 6. Macroporosidade em função da densidade do solo, na profundidade de 0-0,15m, para os sistemas de preparo de solo utilizados (PC= Plantio Convencional; PM= Preparo Mínimo e PD= Plantio Direto)

Os resultados obtidos neste experimento revelam os efeitos dos implementos no fracionamento dos agregados, com consequente aumento do espaço poroso no solo. Estes resultados estão em concordância com Domzal e Slowinska-Jurkiewicz (1987), que afirmam que a estrutura do solo, após a aplicação dos implementos de preparo, é fortemente dependente do tipo de implemento utilizado, apesar da influência da umidade do solo e das condições climáticas após o preparo. Segundo os mesmos autores, sob condições de maior Ds na superfície do solo há possibilidade de reduções na produtividade das culturas quando da ocorrência de déficit hídrico nos estágios fenológicos críticos das mesmas. Nestas condições, no sistema sem revolvimento do solo a resistência do solo atinge níveis impeditivos ao crescimento das raízes no solo. Além disso, a densidade do solo também tem sido correlacionada com parâmetros de crescimento das plantas (Voorhees, 1983), apesar de a densidade ter

influência indireta no crescimento das mesmas (Leteý, 1985).

De forma geral, constata-se que o PC apresentou as mí nimas limitações físicas do solo. No entanto, o revolvimento do solo e a incorporação dos resíduos culturais, aliado ao manejo da cultura, expõem o solo a elevados níveis de erosão e perdas de solo e de água, reduzindo a sustentabilidade do sistema em longo prazo. Já o sistema de preparo com escarificação do solo, além de manter a cobertura do solo, proporcionou valores de propriedades físicas do solo intermediárias entre o sistema sem revolvimento e com preparo convencional do solo. Os valores de macroporosidade, ou porosidade de aeração e de resistência do solo à penetração, são consideradas de baixo nível de impedimento à cultura da mandioca. Desta forma, a presença de resíduos mantém maiores conteúdos de água no solo contribuindo para manter as propriedades físicas numa faixa ótima para o crescimento das culturas (Kladviko, 1994), e estas condições podem ser potencializadas no sistema de preparo com escarificação do solo. O sistema sem revolvimento, apesar de manter a cobertura do solo, protegendo-o contra a erosão, pode predispor a cultura a severas restrições físicas ao crescimento das suas raízes tuberosas e raízes de absorção. Neste sistema, de acordo com informações da literatura, elevados valores de densidade e de resistência do solo à penetração, bem como os baixos valores de porosidade de aeração mostraram-se altamente impeditivos ao crescimento da planta.

Referências

- ALBUQUERQUE, J.A. *et al.* Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeitos sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.19, n.1, p.115-119, 1995.
- 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.
- BRAUNACK, M.V.; DEXTER, A.R. Soil aggregation in the seed-bed: a review. I. Properties of aggregation and beds of aggregates. *Soil. Till. Res.*, Amsterdam, v.14, p.259-279, 1989a.
- BRAUNACK, M.V.; DEXTER, A.R. Soil aggregation in the seed-bed: a review. II. Effect of aggregate size on plant growth. *Soil. Till. Res.*, Amsterdam, v.14, p.281-298, 1989b.
- CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.14, n.1, p.99-105, 1990.
- CASSEL, D.K. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. In: *Predicting tillage effects on soil physical properties and processes*. Madison: America Society of Agronomy, 1982, cap 4, p.45-67.
- CASTRO FILHO, C. *et al.* Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotação de cultura e métodos de preparo das amostras. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.22, n.3, p.527-538, 1998.
- CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.9, n.2, p.263-266, 1985.
- CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, v.34, n.4, p.289-298, 1999.
- DAVIES, W.J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, Palo Alto, v.42, p.55-76, 1991.
- DE MARIA, I.C. *et al.* Atributos físicos do solo e crescimento radicular da soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.23, n.4, p.703-709, 1999.
- DOMZAL, A.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. Effect of tillage and wheater condition a structure and physical properties of soil and yeld of winter wheat. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.10, p.225-241, 1987.
- ELTZ, F.L.F. *et al.* Efeitos de sistemas de preparo do solo em propriedades físicas e químicas de um Latossolo Roxo álico. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.13, n.2, p.259-267, 1989.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de Métodos de Análises de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Embrapa, 1999. 412p.
- ERICKSON, A. E. Tillage effects on soil aeration. In: *Predicting tillage effects on soil physical properties and processes*, Proceedings. Madison: America Society of Agronomy, 1982, cap.5, p-91-104.
- FERNANDES, B. *et al.* Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.7, n.3, p.829-833, 1983.
- GARDNER, W.R. Representation of soil aggregation-size distribution by a logarithmic-normal distribution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, v.20, p.151-153, 1956.
- GLINSKI, J.; LIPIEC, J. Soil physical conditions and plant roots. Florida: CRC Press, 1990.
- GODOY, H., *et al.* Clima do Paraná. In: Manual Agropecuário para o Paraná. Fundação Instituto Agrônomo do Paraná. Londrina, 1976. p.17-36.

- 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 Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.32, p.180-186, 1968.
- GROXKO, M. Mandioca. In: Acompanhamento da situação agropecuária no Paraná. Curitiba: Seab/Deral, v.25, n.9, p. 39-45, 1999.
- HAJABBASI, M.A.; HEMMAT, A. Tillage impacts on aggregate stability and crop productivity in a clay-loam soil in central Iran. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.56, p.205-212, 2000.
- HATCHER, L.; STEPANSKI, E.J. *A step-by-step approach to using the SAS System for Univariate and Multivariate Statistics*. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1997. 552p.
- HILL, R.L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.54, p.161-166, 1990.
- HILL, R.L.; CRUSE, R.M. Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.49, p.1270-1273, 1985.
- HOFFMAN, C.; JUNGK, A. Growth and phosphorus supply of sugar beet as affected by soil compaction and water tension. *Plant Soil*, Dordrecht, v.176, p.15-25, 1995.
- HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. Van (Ed.). *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.141-165. (Developments in Agricultural Engineering, 11).
- HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.35, p.23-36, 1995.
- IMHOFF, S. et al. Spatial heterogeneity of soil properties in areas under elephant-grass short-duration grazing systems. *Plant Soil*, Dordrecht, v.219, p.161-168, 2000.
- KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. In: A. SUMNER, M.E. (Ed). *Handbook of Soil Science*. Boca Raton, CRC Press Inc., FL. 2000, cap.7, p. 229-276.
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1979.
- KLADIVKO, E.J. Residue effects on soil physical properties. In: UNGER, P.W. (ED). *Managing Agricultural Residues*. Boca Raton: Lewis Publisher, 1994, cap.7, p.123-141.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.19, n.3, p.395-401, 1995.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, New York, v.1, p.277-294, 1985.
- NEGI, S.C. et al. Hydraulic characteristics of conventionally and zero-tilled field plots. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.2, p.281-292, 1981.
- NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.51, p.183-186, 1987.
- OLIVEIRA, J.O.A.P. *Efeito de sistemas de preparo em algumas propriedades do solo e na cultura da mandioca (Manihot esculenta, Crantz)*. 1998. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 1998.
- PASSIOURA, J.B. Soil structure and plant growth. *Austr. J. Soil Res.*, Sidney, v.29, n.6, p.717-728, 1991.
- PERFECT, E. et al. Comparison of functions for characterizing the dry aggregate size distribution of tilled soil. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.28, p.123-139, 1993.
- SAS-STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. *SAS/STAT Procedure guide for personal computers*. Version 5, SAS Inst. Cary, NC. 1999.
- SEMMELE, H. et al. The dynamic of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technol.*, Amsterdam, v.3, n.1, p.113-129, 1990.
- SHIERLAW, J.; ALSTON, A.M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant Soil*, Dordrecht, v.75, p.15-28, 1984.
- SILVA, A.P. et al. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compactions. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.44, p.81-93, 1997.
- SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.21, n.2, p.313-319, 1997.
- SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.22, n.2, p.311-317, 1998.
- TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.30, p.217-243, 1994.
- TAYLOR, H.M.; BURNETT, E. Influence of soil on the root growth habitat of plants. *J. Soil Sci.*, Oxford, v.98, p.174-180, 1964.
- TAYLOR, H.M. et al. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soils materials. *J. Soil Sci.*, Oxford, v.102, p.18-22, 1966.
- THOMASSON, A. J. Towards an objective classification of soil structure. *J. Soil Sci.*, London, v.29, p.38-46, 1978.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregate in soils. *J. Soil Sci.*, Oxford, v.33, p.141-163, 1982.
- TOLLNER, E.W. et al. Influence of conventional and no-tillage practices on soil physical properties in the southern Piedmont. *J. Soil Water Conserv.*, Ankeny, v.39, n.1, p.73-76, 1984.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.20, n.2, p.333-339, 1996.
- TORMENA, C.A. et al. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

- VAN OUWERKERK, C.; BOONE, F.R. Soil-physical aspects of zero-tillage experiments. *Neth. J. Agri. Sc.*, The Hague, v.18, p.247-261, 1970.
- VEPRASKAS, M.J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R. (Ed.). *Plant environment interaction*. New York: M. Dekker, 1994. p.263-287.
- VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.47, p.129-133, 1983.
- WARREN, S.D. *et al.* Soil response to trampling under intensive rotation grazing. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.50, p.1336-1341, 1986.
- WHITE, W.M. Dry aggregate distribution. In: CARTER, M.R. (Ed.). *Soil sampling and methods of analysis*. Toronto: Lewis Publishers, 1993. p.659-662.
- ZHANG, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.31, p.263-275, 1994.

Received on August 17, 2001.

Accepted on April 23, 2002.