

QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO⁽¹⁾

Paula Regina de Oliveira⁽²⁾, José Frederico Centurion⁽³⁾, Maria Aparecida Pessôa da Cruz Centurion⁽⁴⁾, Karina de Vares Rossetti⁽⁵⁾, Antonio Sergio Ferraudo⁽⁶⁾, Helena Baroni Junqueira Franco⁽⁷⁾, Fabiana de Souza Pereira⁽⁸⁾ & Laerte Souza Bárbaro Júnior⁽⁹⁾

RESUMO

A modificação estrutural do solo provocada pela sua compactação é fator limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas. O objetivo desta pesquisa foi avaliar, em um Latossolo Vermelho eutroférico no município de Jaboticabal, SP, os parâmetros físicos do solo como a estabilidade de agregados, a condutividade hidráulica e o índice “S”. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com parcelas subdivididas (quatro níveis de compactação e duas profundidades), com quatro repetições e uma área de mata nativa (MN) como testemunha. Os tratamentos de compactação foram: C₀= 0; C₁= 2; C₂= 4; e C₃= 6 passadas de um trator de 11 Mg. Verificou-se que a MN apresentou elevada relação aos índices diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), que constaram agregados maiores e mais estáveis em comparação aos demais tratamentos estudados. Foi obtido o valor de “S” de 0,036 e redução nos níveis mais compactados para 0,026, visto que a compactação reduziu o valor de “S”, que atingiu o valor limitante (< 0,035), apesar da mineralogia oxídica do solo analisado.

Termos para indexação: física do solo, agregação, retenção de água, análise multivariada.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 10 de fevereiro de 2012 e aprovado em 26 de março de 2013.

⁽²⁾ Doutoranda do Departamento de Produção Vegetal da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista - FCAV/UNESP. Bolsista da FAPESP. Via de Acesso Professor Paulo Donato Castellane, s/n. CEP 14884-900 Jaboticabal (SP). E-mail: paularoliveira@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos e Adubos, FCAV/UNESP. Bolsista CNPq. E-mail: jfcentur@fcav.unesp.br

⁽⁴⁾ Professora do Departamento de Produção Vegetal, FCAV/UNESP. E-mail: cidinha@fcav.unesp.br

⁽⁵⁾ Doutoranda do Departamento de Produção Vegetal, FCAV/UNESP. E-mail: krossetti@bol.com.br

⁽⁶⁾ Professor Doutor do Departamento de Ciências Exatas, FCAV/UNESP. E-mail: ferraudofcav.unesp.br

⁽⁷⁾ Doutora do Departamento de Produção Vegetal, FCAV/UNESP. E-mail: hbj_franco@yahoo.com.br

⁽⁸⁾ Doutora do Departamento de Solos e Adubos, FCAV/UNESP. E-mail: fabianadsp@hotmail.com

⁽⁹⁾ Doutorando do Departamento de Produção Vegetal, FCAV/UNESP. E-mail: barbaro2303@hotmail.com

SUMMARY: STRUCTURE QUALITY OF AN OXISOL SUBMITTED TO COMPACTATION

The structure change caused by soil compaction is a limiting factor to growth and development of plants. The objective of this study was to evaluate the physical parameters of an Eutrophic Oxisol in Jaboticabal, SP. Aggregate stability, hydraulic conductivity and "S" index were evaluated in a completely randomized split-plot (four levels of compaction and two depth), with four replications and an area of native forest (NF) as control. The compaction treatments consisted of $C_0 = 0$, $C_1 = 2$, $C_2 = 4$ and $C_3 = 6$ tractor passed of 11 Mg. It was observed that NF had high rates compared to GMD (geometric mean diameter) and WMD (weighted mean diameter) with larger and more stable aggregates compared to other treatments. The "S" value of 0,036 and a reduction in the most compacted levels to 0,026 were obtained, since the compaction reduced the value of "S", which reached its limiting value ($< 0,035$) despite the oxidic mineralogy of the analyzed soil.

Index Terms: soil physics, aggregation, water retention, multivariate analysis.

INTRODUÇÃO

Comumente com o avanço da tecnologia no intuito de obter produção em quantidade e qualidade, o tráfego contínuo de máquinas agrícolas em um solo com alta umidade contribui para alterações significativas nos atributos físicos do solo e na sua qualidade estrutural, o que deixa mais propenso à compactação. Em solos com umidade elevada, a compactação tem sido indicada como a principal causa da sua degradação física, pela redução de seu espaço poroso (Raper, 2005), uma vez que se verificam aumentos expressivos e prejudiciais da compactação para as plantas, principalmente até 0,20 m de profundidade (Cardoso et al., 2006), apesar de o maior estado de compactação ser verificado próximo a 0,10 m de profundidade (Genro Junior et al., 2004).

Em consequência da compactação, há alteração estrutural do solo em razão da reorganização das partículas e de seus agregados, o que aumenta a densidade e resistência do solo à penetração e reduz os macroporos, inibindo o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas (Collares et al., 2006). A condição primordial para garantir altas produtividades das culturas é a manutenção de bom estado de agregação, estabilidade e, conseqüentemente, boa estrutura (Corrêa, 2002). Entretanto, a fim de quantificar os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo, são utilizadas diferentes propriedades físicas relacionadas com sua forma e estabilidade estrutural, como a porosidade do solo e a estabilidade de agregados (Aratani et al., 2009). Niero et al. (2010) definiram o solo como ambiente para a produção agrícola, podendo a qualidade do solo ser avaliada por meio de atributos relacionados à sua capacidade de fornecer nutrientes às plantas, dar suporte ao crescimento e desenvolvimento de raízes e propiciar adequada estabilidade estrutural para resistir à erosão e reter água para as plantas.

Salton et al. (2008) realizaram estudos sobre as relações entre os agregados do solo e a matéria

orgânica, identificando, além da fração mineral, a fauna do solo, os microrganismos, as raízes, os agentes inorgânicos e as variáveis ambientais como os principais fatores envolvidos na formação e estabilidade de agregados do solo. Segundo esses autores, em uma fase preliminar, a formação de microagregados (diâmetro inferior a 0,25 mm) está relacionada à interação da matéria mineral entre si e com compostos orgânicos e, posteriormente, o crescimento de raízes e hifas de fungos, juntamente com resíduos de vegetais, insetos e outros organismos, estimula a formação de estruturas mais complexas e diversificadas, como macroagregados estáveis, com tamanho superior a 0,25 mm, visto que essas estruturas correspondem a um nível de organização mais elevado.

A agregação do solo controla os movimentos internos de água, ar e calor, bem como o crescimento de raízes; os resíduos orgânicos diminuem a densidade do solo, além de criar poros de diâmetro grande, que favorecem a entrada de ar e a drenagem de água (Vasconcelos et al., 2010).

O efeito das práticas de cultivo sobre a qualidade do solo deve ser monitorado e, segundo Freddi et al. (2009), principalmente aquelas relacionadas com a estrutura, a distribuição do tamanho dos poros e as propriedades hídricas do solo como os fluxos e a disponibilidade de água às plantas; para isso, têm sido empregados indicadores de qualidade do solo como o índice "S".

O índice "S" (S de "slope" = declividade), introduzido no Brasil por Silva (2004) e apresentado em uma série de artigos por Dexter (2004), é estabelecido pela declividade da curva de retenção de água do solo em seu ponto de inflexão e apresenta importante contribuição nos estudos da qualidade física do solo para a produtividade das culturas, principalmente pelo grande potencial para ser usado em avaliações da interação entre o manejo e a qualidade física do solo e por ser facilmente medido com equipamentos e equações utilizados rotineiramente nos laboratórios de física do solo.

Utilizando resultados experimentais, o índice “S” > 0,035 foi estabelecido como favorável para o crescimento das raízes, que indica adequada distribuição de tamanho de poros e qualidade física do solo, independentemente do tipo de solo, em clima temperado; por sua vez, valores de “S” < 0,020 estão claramente associados às más condições físicas do solo, pois pequena inclinação indica solo desestruturado e, portanto, elevada inclinação, solo estruturado apresentando muitos poros (Dexter, 2004). Segundo esse autor, o índice “S” avalia a porosidade estrutural que corresponde aos poros interpartículas, fendas, bioporos e poros macroestruturais resultantes do uso e manejo.

Um dos processos que melhor refletem as condições físico-hídricas do solo é a infiltração de água, uma vez que a qualidade estrutural condiciona uma distribuição do tamanho de poros favorável à aeração, à infiltração de água no solo e ao crescimento de raízes (Pott & De Maria, 2003). No entanto, um atributo do solo que exerce importante papel na resolução de problemas que envolvem irrigação, drenagem, conservação de recarga do lençol freático, poluição, infiltração e controle de enxurrada é a condutividade hidráulica (Stone & Silveira, 1978). A condutividade hidráulica saturada equivale à infiltração, que é o processo em que a água, proveniente da chuva ou irrigação, atravessa a superfície do solo; assim, a taxa de infiltração diminui com o tempo até atingir valor constante, influenciando todo o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (Julià et al., 2004).

Esta pesquisa teve por objetivos avaliar os efeitos de quatro níveis de compactação de um Latossolo Vermelho eutroférico, relacionado à sua agregação e condutividade hidráulica, tendo como testemunha a mata nativa, e caracterizar a compactação do solo a partir do índice “S”.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido na área experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP, com coordenadas geográficas de 21° 15' 29" de latitude sul e 48° 16' 47" de longitude oeste de Greenwich, com altitude média de 600 m. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação pluvial média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21 °C (Centurion, 1998). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico típico, textura argilosa, A moderado, caulinitico-oxidico (LVef) (Andrioli & Centurion, 1999).

A composição granulométrica do solo foi determinada em amostras deformadas, na profundidade de 0-0,20 m, por meio da dispersão com

NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta durante 16 h, sendo o teor de argila obtido pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986). A granulometria do solo apresentou valores médios de 550 g kg⁻¹ de argila, 240 g kg⁻¹ de silte, 110 g kg⁻¹ de areia fina e 100 g kg⁻¹ de areia grossa.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas, sendo cada unidade experimental constituída de quatro linhas de 4,0 m, espaçadas em 0,5 m, considerando-se como área útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,5 m de cada extremidade, em esquema fatorial 4 x 2 (quatro níveis de compactação e duas profundidades), com oito repetições; uma área de mata nativa (MN) adjacente foi empregada como referência, por tratar-se de um sistema em equilíbrio, sem ação antrópica.

Antes da instalação do experimento, toda área foi escarificada a 0,30 m de profundidade, seguida de gradagem niveladora. Os tratamentos testados foram: C₀ = 0; C₁ = 2; C₂ = 4; e C₃ = 6 passadas, no mesmo local, de um trator de 11 Mg com dois eixos e quatro pneus de mesma largura (0,40 m) e pressão interna, uma ao lado da outra, na direção do declive da área, perfazendo toda a superfície. O conteúdo de água no solo durante a compactação esteve próximo à capacidade de campo (0,01 MPa).

As coletas de amostras indeformadas de solo, nas entrelinhas da cultura da soja para a estabilidade de agregados, foram realizadas em janeiro de 2010, nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, com quatro repetições. Os torrões foram secos ao ar, desmanchados manualmente e passados em peneira de 7,93 mm. Para cada amostra de 50 g, foi determinada a distribuição de classes de agregados (7,93-4,0; 4,0-2,0; 2,0-1,0; 1,0-0,5; 0,5-0,25; e < 0,25 mm) analisadas por peneiramento a úmido, seguindo o método proposto por Yooder (1936). O diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP) foram calculados, conforme o método descrito por Kemper & Chepil (1965).

Foram coletadas 64 amostras indeformadas de solo, por tratamento, na entrelinha, com cilindros de 53,16 x 10⁻⁶ m³ (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m para determinar os atributos físicos densidade do solo e porosidade total, conforme as recomendações da Embrapa (1997) e resistência do solo à penetração, segundo Tormena et al. (1998). Ainda nessas amostras, foram avaliadas a microporosidade do solo, por secagem (tensão de 0,006 MPa), em câmaras de pressão de Richards, com placa porosa; e a macroporosidade, obtida pela diferença entre a porosidade total e microporosidade. As amostras foram saturadas por ascensão capilar em uma bandeja, durante 24 h, e em seguida submetidas às tensões de 0,001; 0,003; 0,006; 0,01; 0,033; 0,06; 0,1; e 0,3 MPa. Ao atingir o equilíbrio, na tensão de 0,01 MPa, as amostras foram pesadas para se obter o peso saturado e submetidas à determinação da resistência do solo à penetração, com duas subdeterminações por amostra.

As curvas de retenção de água foram ajustadas pelo modelo proposto por van Genuchten (1980); a partir desse, determinaram-se a declividade da reta tangente em seu ponto de inflexão e, conseqüentemente, o índice "S", como segue:

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (1)$$

em que n e m são parâmetros que governam o formato da curva; θ_{sat} e θ_{res} , a umidade na saturação e residual, respectivamente.

A determinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) do solo foi medida no campo, empregando-se carga hidráulica (0,03 m de coluna de água), em maio de 2010, com cinco repetições, em local tomado aleatoriamente em cada tratamento, utilizando-se um permeâmetro tipo Guelph, na profundidade de 0,20 m (Reynolds et al., 1992).

Os resultados do experimento foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias, quando significativas, comparadas pelo teste de Tukey a 5 %.

Foram aplicados os princípios da estatística multivariada exploratória, em decorrência de melhorar a compreensão do grande número de variáveis que influenciam a qualidade do solo, por meio da técnica da análise de agrupamento por método hierárquico (Sneath & Sokal, 1973) processada com a distância euclidiana entre os acessos e o algoritmo de Ward, como método de ligação entre os grupos. O resultado da estrutura de grupo contida nos dados é apresentado num gráfico denominado dendrograma. Em complemento, foi aplicada a análise de agrupamento pelo método não hierárquico processada com o algoritmo *k-means* (Hair et al., 2005). Esse método minimiza a variância dos acessos dentro de cada grupo.

Todas as análises estatísticas multivariadas foram processadas no *software* STATISTICA versão 7.0 (Statsoft, 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os resultados sobre a agregação do solo (Quadro 1), as variações na distribuição da massa de solo quanto ao diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) sob a mata nativa não apresentaram diferenças significativas no tratamento C_2 , evidenciando diferença estatística entre os demais sistemas de uso, profundidade 0-0,10 m, cuja MN não diferiu entre camadas. O solo sob mata, por não sofrer o trânsito de máquinas e equipamentos, apresentou elevados índices DMG e DMP, que constaram agregados maiores e mais estáveis, em comparação aos demais tratamentos, pois quanto maior for a porcentagem de agregados grandes retidos nas peneiras com malhas maiores, maior é o DMP.

Em relação aos tratamentos C_0 , C_1 e C_3 , os valores dos índices DMG e DMP foram semelhantes, que diferiram do tratamento C_2 apenas na profundidade de 0-0,10 m. Entre camadas, C_2 não apresentou diferenças estatisticamente, diferindo apenas na profundidade de 0-0,10 m, em comparação aos demais tratamentos. Provavelmente a diferença observada em 0-0,10 m no tratamento C_2 apresentou efeito da compactação, que causou compressão das partículas do solo, formando torrões, sem, entretanto, ocorrerem os mecanismos de formação e estabilização, que não apresentaram qualidades positivas de um agregado (Silva et al., 2000). A agregação mecânica que ocorreu por efeito da tensão exercida pela compactação, levando à união de partículas sob alta umidade no solo, pôde ser verificada pelo aumento na estabilidade de agregados; esse processo foi detectado em Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso por Silva et al. (2006).

Para a profundidade de 0,10-0,20 m, não se obteve diferença entre os tratamentos compactados para o valor de DMP, conforme observado por Bergamin et al. (2010), visto que o maior estado de compactação foi verificado próximo a 0,10 m de profundidade (Genro Junior et al., 2004).

A análise de variância para efeito de tratamentos na condutividade hidráulica saturada na profundidade de 0,10 m mostrou que houve redução significativa do fluxo de água nos solos das áreas sob soja, em relação à área sob mata natural (Figura 1). Verificou-se que a condutividade hidráulica não constatou diferença estatística entre os tratamentos compactados. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva (1996) e Beutler et al. (2003). Esses resultados podem ser consequência da redução da macroporosidade, por apresentar grande efeito sobre a velocidade de infiltração de água, bem como sobre o desenvolvimento radicular das plantas, por exibir ao solo condições de baixa aeração, principalmente em solos argilosos (Cintra et al., 1983). Além da relação com o aumento da microporosidade causado pela destruição dos agregados nas áreas compactadas, segundo Carvalho (2002), a condutividade hidráulica do solo na condição saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo, onde o efeito da estrutura torna possível que um solo argiloso possa expor valores de condutividade hidráulica semelhantes aos dos solos arenosos. Para Stone et al. (2002), o efeito da compactação na diminuição do tamanho dos poros, que efetivamente transportam água, explica a redução da condutividade hidráulica com o aumento da densidade do solo, por ser altamente relacionada com raio médio ponderado para o fluxo, diminuindo o seu valor, de forma acentuada, com a redução do tamanho dos poros.

A partir dos parâmetros estabelecidos pelas curvas de retenção de água (Figura 2), foram obtidos os valores de índice "S".

Nos tratamentos estudados, foi obtido o valor de "S" de 0,036, no nível sem compactação (C_0),

Quadro 1. Agregados estáveis em água no Latossolo Vermelho eutroférico, em mata nativa (MN), submetidos a quatro níveis de compactação e em duas profundidades

Prof.	Classe de agregado (mm)						DMG	DMP
	7,93 a 4,00	4,00 a 2,00	2,00 a 1,00	1,00 a 0,50	0,05 a 0,25	< 0,25		
m	%						mm	
	MN							
0-0,10	98,99 Aa	0,28 Cb	0,15 Db	0,21 Cb	0,27 Cb	0,10 Da	5,85 Aa	5,92 Aa
0,10-0,20	95,74 Aa	1,81 Ba	0,87 Ca	0,69 Ba	0,62 Ba	0,29 Ba	5,59 Aa	5,79 Aa
	C ₀ ⁽¹⁾							
0-0,10	25,35 Bb	14,66 Ba	16,54 Ca	20,03 Aa	15,79 Aa	7,62 Aa	1,44 Cb	2,42 Cb
0,10-0,20	43,94 Ba	17,45 Aa	16,08 ABa	10,79 Ab	8,14 Ab	3,61 Ab	2,42 Ba	3,50 Ba
	C ₁							
0-0,10	23,42 Bb	17,04 Ba	19,64 Ba	19,84 Aa	14,07 Aa	6,00 Aa	1,51 Cb	2,42 Cb
0,10-0,20	36,30 Ba	17,60 Aa	19,55 Aa	13,00 Ab	9,35 Ab	4,21 Ab	2,08 Ba	3,13 Ba
	C ₂							
0-0,10	31,95 Bb	21,47 Aa	20,17 ABa	14,11 Ba	8,75 Ba	3,56 Ca	2,08 Ba	3,00 Ba
0,10-0,20	40,22 Ba	15,85 Ab	17,12 ABb	12,63 Aa	9,84 Aa	4,35 Aa	2,15 Ba	3,27 Ba
	C ₃							
0-0,10	23,40 Bb	21,84 Aa	23,53 Aa	17,43 Aa	9,98 Ba	3,83 BCa	1,74 BCb	2,58 BCb
0,10-0,20	47,46 Ba	15,66 Ab	15,11 Bb	11,05 Ab	7,57 Aa	3,15 Aa	2,54 Ba	3,64 Ba
CV (%) ⁽²⁾	18,25	19,45	12,81	30,55	34,92	43,11	13,67	12,02
CV (%) ⁽³⁾	16,37	22,3	19,72	25,52	28,58	43,74	11,31	10,44

⁽¹⁾ C₀: solo não trafegado; C₁: duas passadas; C₂: quatro passadas; e C₃: seis passadas de trator de 11 Mg. ⁽²⁾ nível de compactação; e ⁽³⁾ profundidades. Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na linha, para tratamentos; e minúscula, na coluna, entre profundidades, não diferem pelo teste de Tukey (p<0,05).

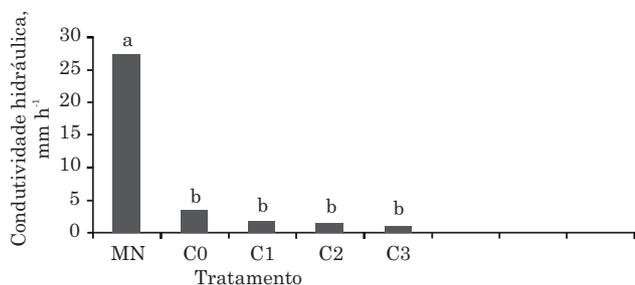


Figura 1. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho eutroférico submetida a quatro tratamentos e a Mata Nativa até 0,10 m de profundidade. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05) (CV = 64,25 %).

proporcionando condições físicas favoráveis ao desenvolvimento radicular; contudo, observou-se que com duas passadas do trator foi suficiente para reduzir o valor do índice “S” para 0,028. Nos tratamentos C₂ e C₃, esse valor foi reduzido para 0,026, que está abaixo do preconizado por Dexter (2004) de “S” < 0,035, como limitante para um solo com estrutura física degradada (Quadro 2). Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2008), cujos resultados foram menores que 0,035. A redução de “S” nos níveis compactados pode estar associada a uma diminuição

do pico da distribuição de frequência de poros, resultando em um “achamento” vertical da curva de retenção de água, pela redução dos poros estruturais (Dexter, 2004). Sob sistemas de plantio direto e preparo convencional, em um Latossolo Vermelho, na linha e na entrelinha da cultura do milho, Tormena et al. (2008), avaliando o índice “S”, verificaram maiores valores desse índice sob plantio direto e na linha de plantio, que, por sua vez, concluíram que o valor de “S” diminuiu com o aumento da densidade do solo e que, associada à sua compactação, houve redução da qualidade física do solo. Pode-se concluir que essa perda da qualidade física em razão do tráfego de tratores ocorreu, principalmente, pela redução da macroporosidade na camada de 0-0,10 m, cujos valores reduziram de 0,142 m³ m⁻³ no tratamento C₀ para 0,077 m³ m⁻³ (C₁); 0,059 m³ m⁻³ (C₂); e 0,015 m³ m⁻³ (C₃), concordando com os resultados de Argenton et al. (2005).

Na mata nativa, o valor de “S” foi de 0,088, podendo-se, dessa forma, afirmar que esse solo possui boa qualidade física. Segundo Carvalho Filho et al. (2009), um Latossolo Vermelho férreo, em sistema de uso com pastagem, obteve o menor valor do parâmetro “S” de 0,063, em razão de esse solo ser altamente intemperizado e apresentar elevados teores de óxidos de Fe e Al, que conferem melhor estrutura e porosidade a esse solo, conforme verificado por Ferreira et al. (1999). Dessa forma, para esse tipo de

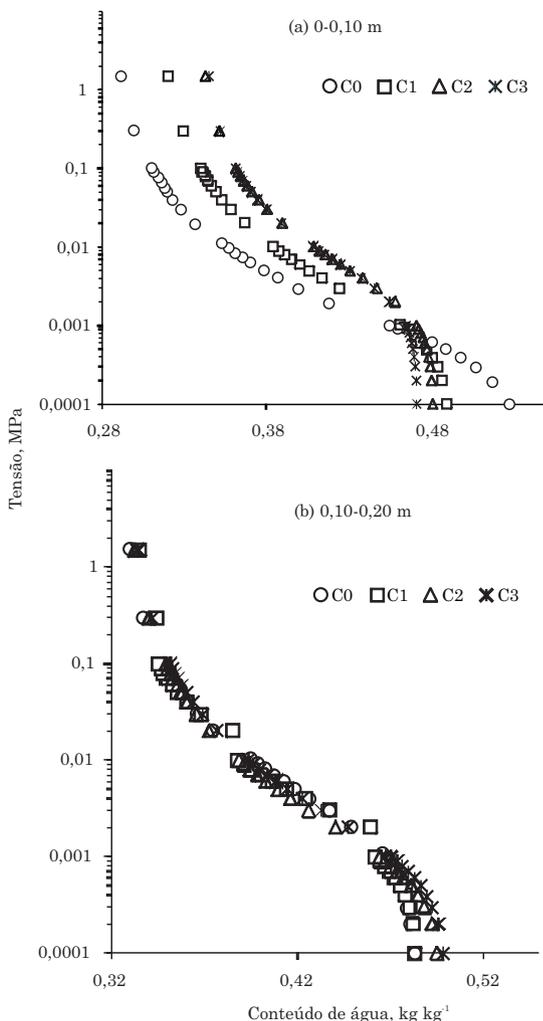


Figura 2. Curvas de retenção de água ajustadas pelo modelo proposto por van Genuchten (1980).

Quadro 2. Valores do índice “S” para os níveis de compactação e profundidades do Latossolo Vermelho eutroférico

Treatamento	“S”
Compactação (A)	
C ₀ ⁽¹⁾	0,036 b ⁽²⁾
C ₁	0,028 c
C ₂	0,026 c
C ₃	0,026 c
Mata	0,088 a
F	295,25**
Profundidade (B)	
0-0,10 m	0,041 a
0,10-0,20 m	0,040 a
F	0,420 ^{ns}
Teste F (A x B)	9,90**
CV (%)	13,12

⁽¹⁾ C₀: solo não trafegado; C₁: duas passadas; C₂: quatro passadas; e C₃: seis passadas de trator de 11 Mg; ⁽²⁾ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); **: significativo a 1 %; ns: não significativo.

solo, o valor do índice “S” considerado crítico ao crescimento das plantas é superior a 0,035.

No solo não trafegado, o índice “S” na profundidade de 0-0,10 m foi superior ao valor de 0,035, o que diferiu dos demais tratamentos (Quadro 3). Na profundidade de 0,10-0,20 m, os valores foram inferiores, porém não diferiram entre si. Na mata nativa, o índice apresentou valores elevados e obteve diferenças, quando comparados aos demais tratamentos; para as duas camadas analisadas, e ainda, seu índice “S” foi superior na profundidade de 0,10-0,20 m, quando comparado com a camada de 0-0,10 m.

Análise multivariada

No dendrograma da figura 3, observa-se uma organização dos acessos em três grupos G1, G2 e G3, contendo padrões diferenciados para o conjunto de variáveis consideradas. No G1, ficaram concentrados os acessos sem tráfego de trator na profundidade P1 (0-0,10 m); esses resultados são explicados pela melhor distribuição do sistema radicular, que está relacionada com a condição de solo solto (C0) e com o solo pouco revolvido, corroborando com os resultados de Merten & Mielniczuk (1991), os quais verificaram que o peso da matéria seca de raízes de soja foi de 80 % na profundidade de 0-0,10 m. O G2 é caracterizado pela profundidade P2 (0,10-0,20 m), subsuperfície, além de apresentar todos os tratamentos analisados. O fato de apresentar pouco efeito do tráfego de tratores não determinou distinção entre os tratamentos dentro do grupo; o G3 apresentou os acessos onde o solo sofreu compactação, principalmente na primeira camada, em razão da maior influência do impacto do trator sobre o solo.

Os mesmos dados foram submetidos à análise de agrupamento por método não hierárquico (algoritmo K-means), considerando a divisão em três grupos, resultante da análise de agrupamento por método hierárquico. Os centroides dos grupos constam da figura 4, sendo observados valores superiores de “S”,

Quadro 3. Valores do índice “S” na interação de compactação dentro de profundidades

Compactação (A)	Profundidade (B)		F
	0-0,10 m	0,10-0,20 m	
C ₀ ⁽¹⁾	0,044 Ba ⁽²⁾	0,027 Bb	30,84**
C ₁	0,029 Ca	0,027 Ba	0,19 ^{ns}
C ₂	0,025 Ca	0,028 Ba	0,57 ^{ns}
C ₃	0,025 Ca	0,028 Ba	1,16 ^{ns}
Mata	0,084 Ab	0,092 Aa	7,27**
F	130,78**	174,37**	

⁽¹⁾ C₀: solo não trafegado; C₁: duas passadas; C₂: quatro passadas; e C₃: seis passadas de trator de 11 Mg; ⁽²⁾ Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); **: significativo a 1 %; ns: não significativo.

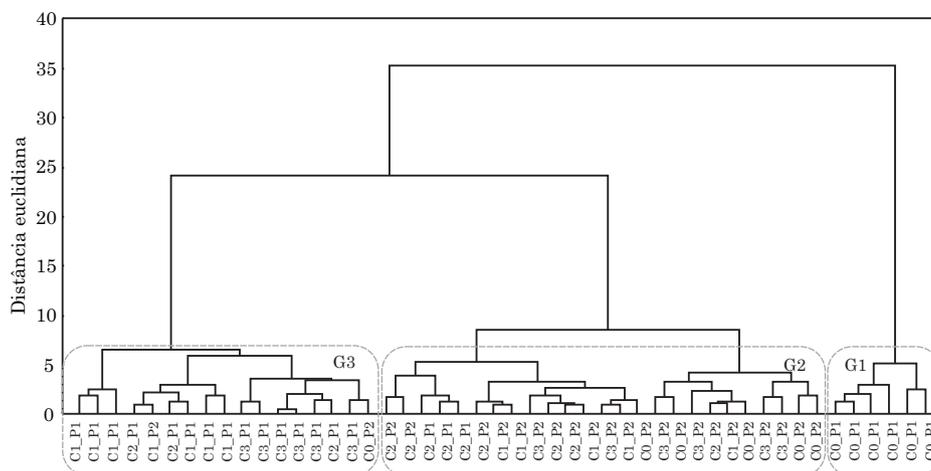


Figura 3. Dendrograma resultante da análise de agrupamento por método hierárquico evidenciando a formação de grupos G1, G2 e G3 dos acessos nas profundidades P1: 0-0,10 e P2: 0,10-0,20 m e nos solos C₀: solo não trafegado; C₁: duas passadas; C₂: quatro passadas; e C₃: seis passadas de trator de 11 Mg.

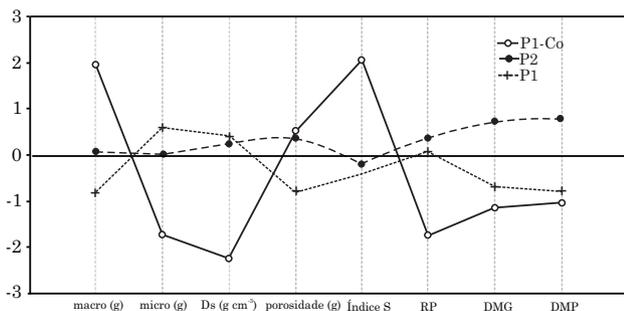


Figura 4. Centroides dos grupos das propriedades físicas do Latossolo submetidos aos tratamentos de compactação para cada grupo, segundo análise de agrupamento não hierárquico nas profundidades P1: 0-0,10 e P2: 0,10-0,20 m. C₀: solo não trafegado; macro: macroporosidade; micro: microporosidade; Ds: densidade; poro: porosidade; RP: resistência do solo à penetração; DMG: diâmetro médio geométrico; e DMP: diâmetro médio ponderado.

de macroporosidade e porosidade total no tratamento sem compactação (C₀) e na menor profundidade P1. Esse grupo corrobora com os resultados de Aratani et al. (2009), cujos parâmetros discriminaram a formação de um grupo, que foram responsáveis pelas melhores condições estruturais do solo obtidas na área de mata.

A densidade (Ds) e a resistência do solo à penetração (RP) no solo sem tráfego de trator e na profundidade de superfície (P1_C₀) foram baixas, comparada aos demais tratamentos. Logo, pode-se inferir que nesse tratamento encontram-se as melhores condições estruturais do solo; por sua vez, os valores de porosidade foram superiores nesse tratamento, além dos tratamentos que receberam compactação na profundidade P2 (0,10-0,20 m), uma vez que o solo

nessas condições se torna bem estruturado. Aratani et al. (2009) reportaram que na camada superficial também foram encontrados menor densidade, confirmada pelos maiores volumes de macroporos, resultando no aumento da porosidade, reflexo da ação do equipamento utilizado no revolvimento e preparo do solo.

As variações da estabilidade de agregados apresentaram valores superiores na maior profundidade, visto que na subsuperfície nessa camada de solo não ocorre alteração de suas estruturas, com menor intensidade de revolvimento. Essa relação entre a estabilidade de agregados e a intensidade de mobilização do solo, gerada pelo sistema de manejo, condiz com os resultados de Niero et al. (2010), em que foram obtidos maiores valores para DMP nos manejos com menor revolvimento do solo.

CONCLUSÕES

1. A condutividade hidráulica saturada mostrou que houve redução significativa do fluxo de água nos solos das áreas sob as passadas do trator, em relação à área sob mata natural.

2. O valor de “S” de 0,036 foi obtido no nível sem compactação (C₀) e redução nos níveis mais compactados para 0,026; entretanto, apesar da mineralogia oxidada do Latossolo Vermelho a compactação diminuiu o valor de “S”, atingindo o valor limitante (< 0,035).

3. A melhor agregação do solo ficou evidenciada no tratamento C₀, na profundidade 0-0,10 m, em razão da concentração de macroporos, porosidade total e índice S.

LITERATURA CITADA

- ANDRIOLI, I. & CENTURION, J.F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Brasília, 1999. Anais... Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p.1-4.
- ARATANI, R.G.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F. & ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 33:677-687, 2009.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A. & BAYER, C. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. R. Bras. Ci. Solo, 29:425-435, 2005.
- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A. & SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. R. Bras. Ci. Solo, 34:681-691, 2010.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & ROQUE, C.G. Comparação de métodos para determinação da capacidade de campo em laboratório. Cult. Agron., 12:55-68, 2003.
- CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J.L.; TORRES, E.; SARAIVA, O.F. & GUIMARÃES, M.F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema plantio direto. Pesq. Agropec. Bras., 41:493-501, 2006.
- CARVALHO, L.A. Condutividade hidráulica do solo no campo: As simplificações do método do perfil instantâneo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2002. 86p. (Dissertação de Mestrado)
- CARVALHO FILHO, A.; CARVALHO, L.C.C.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; CORTEZ, J.W. & RIBON, A.A. Qualidade física de um Latossolo Vermelho férrico sob sistemas de uso e manejo. Biosci. J., 25:43-51, 2009.
- CENTURION, J.F. Caracterização e classificação dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 1998. 84p. (Tese de Livre Docência)
- CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. & SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 7:323-327, 1983.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. Pesq. Agropec. Bras., 41:1663-1674, 2006.
- CORRÊA, J.C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. Pesq. Agropec. Bras., 37:203-209, 2002.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory. Effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120:201-214, 2004.
- EMBRAPA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURTI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 23:507-514, 1999.
- FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; DUARTE, A.P. & LEONEL, C.L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I - Características de planta, solo e índice S. R. Bras. Ci. Solo, 33:793-803, 2009.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. v.1. p.383-411.
- 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. R. Bras. Ci. Solo, 28:477-484, 2004.
- HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. & BLACK, W. Análise multivariada de dados. 5ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2005. 593p.
- JULIÀ, M.F.; MONREAL, T.E.; JIMÉNEZ, A.S.C. & MELÉNDEZ, E.G. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. Geoderma, 123:257-277, 2004.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E. & CLARK, F.E., eds. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison, American Society of Agronomy, 1965. Part 1. p.499-510.
- MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 15:369-374, 1991.
- NIERO, L.A.C.; DECHEN, S.C.F.; COELHO, R.M. & DE MARIA, I.C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho distroférico com usos e manejos distintos. R. Bras. Ci. Solo, 34:1271-1282, 2010.
- POTT, C.A. & DE MARIA, I.C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. R. Bras. Ci. Solo, 27:19-27, 2003.
- RAPER, R.L. Agricultural traffic impacts on soil. J. Terramech., 42:259-280, 2005.
- REYNOLDS, W.D.; VIEIRA, S.R. & TOPP, G.C. An assessment of the single-head analysis for the constant head well permeameter. Can. J. Soil Sci., 72:489-501, 1992.
- SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M. & BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 32:11-21, 2008.
- SILVA, O.S.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; ANDRIOLI, F.F. & ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. Irriga, 13:191-204, 2008.

- SILVA, M.A.S.; MAFRA, Á.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; ROSA, J.D.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:329-337, 2006.
- SILVA, A.P. Integração manejo x física. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., Santa Maria, 2004. Palestras... Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD ROM.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. *Ci. Rural*, 30:795-801, 2000.
- SILVA, A.J.N. Caracterização de Latossolos amarelos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1996. 133p. (Dissertação de Mestrado)
- SNEATH, P.H. & SOKAL, R.R. *Numerical taxonomy: The principles and practice of numerical classification*. San Francisco, W.H. Freeman, 1973. 573p.
- STATSOFT, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 7. 2004. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>>.
- STONE, L.F.; GUIMARAES, C.M. & MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 6:207-212, 2002.
- STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 13:63-71, 1978.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.C. & DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. *Sci. Agríc.*, 65:56-60, 2008.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.
- van GENUCHTEN, M.T.A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-897, 1980.
- VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; OLIVEIRA, V.S.; COSTA, Y.D.J. & CAVALCANTE, D.M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de Tabuleiro Costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:309-316, 2010.
- YOODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.*, 28:337-351, 1936.