

EFEITOS DOS SISTEMAS DE PREPARO PROFUNDO CANTEIRIZADO E CONVENCIONAL DO SOLO EM CANA DE AÇÚCAR NA DISTRIBUIÇÃO DE POROS E ÍNDICE S

Camila Cassante de Lima

RESUMO

A manutenção da qualidade física do solo para o crescimento das plantas depende da geometria e da distribuição de poros por tamanho que desempenha papel fundamental nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa, quantificada de maneira simples pela curva de retenção da água no solo. Os sistemas de preparo do solo e práticas de manejo de culturas podem alterar a distribuição dos poros por seus tamanhos, condicionando comportamentos físico-hídricos distintos, influenciando a potencialidade agrícola dos solos. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações na distribuição dos poros do solo e índice S em preparo profundo canteirizado e preparo convencional do solo cultivado com cana-de-açúcar. O estudo foi realizado no município de Piracicaba, SP, em um Nitossolo Vermelho. A cultura foi implantada em espaçamento duplo alternado com 0,90 m na faixa não trafegada e 1,50 m na faixa de tráfego (rua). Os tratamentos experimentais foram os dois sistemas de preparo e as faixas com e sem tráfego. Foram obtidas curvas de retenção de água no solo e a partir delas foi feita a distribuição de poros do solo, curva de frequência acumulada do tamanho de poros e calculado o Índice S. Na faixa não trafegada do preparo profundo canteirizado e do preparo convencional houve aumento da retenção de água em baixas tensões em relação às ruas de tráfego agrícola. Em baixos potenciais, o aumento da macroporos do solo pelo surgimento de fendas proporcionada pela subsolagem profunda, tornou desfavorável à retenção de água. O preparo profundo do solo homogeneizou a distribuição de poros do solo no canteiro e melhorou a qualidade física do solo, evidenciada pelo índice S e distribuição de poros. O sistema de cultivo convencional do solo não ofereceu qualidade física ao cultivo da cana-de-açúcar até 0,4 m de profundidade.

Palavras-chave: raio máximo de poros, curva de retenção, frequência de poros.

INTRODUÇÃO

A porosidade do solo é constituída por poros de diferentes tamanhos, formas e continuidade (Kay & Vandenbygaart, 2002). A manutenção da qualidade física do solo para o crescimento das plantas depende da geometria e da distribuição de poros por tamanho que desempenha papel fundamental nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa (Ribeiro et al., 2007), quantificada de maneira simples pela curva de retenção da água no solo (Silva et al., 2010).

Através da equação matemática utilizada por van Genuchten (1980) para ajustar a curva de retenção de água é possível, ainda, obter o Índice S proposto por Dexter (2004a). Esse índice é definido como o valor absoluto da declividade da curva de retenção da água no solo em seu ponto de inflexão e representa a distribuição do tamanho de poros de maior frequência, tornando possível a comparação direta dos efeitos de diferentes práticas de manejo na qualidade física do solo.

O índice S reflete diretamente nos principais atributos físicos do solo pois, o ponto de inflexão entre os conteúdos de água correspondentes à saturação (θ_{sat}) e ao conteúdo residual (θ_{res}) é dependente principalmente, aos poros estruturais (microfendas, fendas e bioporos) e macroestruturas produzidas pelo preparo do solo (Andrade & Stone, 2009), sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (“ α ”, “ n ” e “ m ”).

Os sistemas de preparo do solo e práticas de manejo de culturas podem alterar a distribuição dos poros por seus tamanhos, condicionando comportamentos físico-hídricos distintos os quais terão influência significativa na estrutura do solo e nos fluxos de água e ar (Argenton et al., 2005) influenciando a potencialidade agrícola dos solos (Cunha et al., 2010).

O preparo convencional, em geral, promove um revolvimento intenso da camada superficial de solo. Baseado numa sucessão de atividades que resultam na desagregação de toda a superfície pela inversão de camadas de solo, pode ocorrer efeito deletério na qualidade estrutural do solo pelo surgimento de camadas compactadas abaixo da zona mobilizada e, conseqüentemente, redução do volume de macroporos e aumento de microporos, determinando uma diminuição do volume de poros ocupado pelo ar e um aumento na retenção de água. Em decorrência disso, há redução da taxa de infiltração de água no solo, afetando o desenvolvimento vegetal e predispondo o solo à erosão hídrica acelerada.

Nota-se em diversas pesquisas (Severiano et al., 2009; Souza et al., 2008; Silva et al., 2005; Ceddia et al., 1999) que com frequência se tem detectado altos níveis de degradação dos solos cultivados com cana-de-açúcar no que diz respeito ao rearranjo da estrutura do solo. Em decorrência das técnicas de cultivo empregadas pelos agricultores e empresas do ramo sucroalcooleiro, há o surgimento de camadas compactadas os quais alteram a distribuição dos poros do solo, alterando os fluxos de água e ar do solo (Silva & Ribeiro, 1997).

Na busca por soluções da compactação causada pelo intenso tráfego agrícola na cultura da cana-de-açúcar, o preparo profundo canteirizado do solo surgiu como uma alternativa para minimizar o impacto sobre a qualidade físico-hídrica do solo, pois revolve o solo em profundidade somente nos canteiros de plantio, de maneira localizada e combinada utilizando implementos que realizam, simultaneamente, subsolagem profunda, aplicação e incorporação de corretivo, enleiramento da palha e quebra dos torrões. O tráfego, portanto, ocorre de forma controlada, podendo eliminar a ocorrência de pé de grade e pé de arado, comuns no preparo convencional do solo.

Apesar da avaliação da distribuição do tamanho ou classe de poros e índices de qualidade física e estrutural do solo serem temas frequentes em vários estudos (Klein & Libardi, 2002; Schaffrath et al., 2008; Cunha et al., 2010; Zaffar & Lu, 2015), as informações dos atributos físicos e do impacto sobre a estrutura do solo em áreas manejadas com sistema de preparo profundo canteirizado em cana-de-açúcar são recentes e pouco difundidas na comunidade científica. Isso tem dificultado na orientação e a tomada de decisão para o tipo de manejo a ser adotado.

Assim, este trabalho objetivou avaliar as alterações na distribuição dos poros do solo e índice S em preparo profundo canteirizado e preparo convencional do solo cultivado com cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi realizado no município de Piracicaba-SP, situado entre as coordenadas 22°41'04" Sul e 47°38'52" Oeste a 550 m de altitude. O clima da região é tropical de altitude, Cwa segundo Köppen, com temperatura e pluviosidade média anual de 24 °C e 1.273 mm, respectivamente.

O solo da área experimental foi classificado (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) como Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico, A moderado (Santos et al., 2013), e textura argilosa, com 134,0, 250,5, 115,0 e 500,0 g kg⁻¹ de areia grossa, areia fina, silte e argila, respectivamente nos horizontes superficiais (A e A/B) e com 93,0, 200,0, 94,0 e 613,0 g kg⁻¹ nos horizontes subsuperficiais (B e Bw). De litologia basáltica, em relevo suave ondulado, solo é bem drenado e não apresenta pedregosidade e rochosoidade.

Tabela 1. Descrição morfológica dos horizontes do Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico (Piracicaba, SP, Brasil).

H	Profundidade / m	Cor ⁽¹⁾	Textura	Descrição
Ap	0,0 – 0,1	(2.5YR 3/2) Vermelho-escuro acizentado	argiloso	Estrutura: blocos angulares e subangulares, pequenos a médios, moderado. Consistência úmida: friável. Consistência molhada: muito plástico e pegajoso. Transição: gradual e ondulada
AB	0,1 – 0,25	(2.5YR 2.5/4) Bruno-avermelhado-escuro	argiloso	Estrutura: blocos angulares e subangulares, pequenos a médios, moderado. Cerosidade: pouca e fraca. Consistência úmida: friável. Consistência molhada: muito plástico e pegajoso. Transição: difusa e ondulada.
B	0,25 – 0,6	(10R 3/6) Vermelho-escuro	muito argiloso	Structure: Blocos angulares e subangulares, média a grande, forte. Cerosidade: comuns e distinto. Consistência úmida: muito friável. Consistência molhada: muito plástico e muito pegajoso. Transição: difusa e ondulada.
Bw	+0,6	(2.5YR 3/6) Vermelho-escuro	muito argiloso	Estrutura: Blocos angulares, pequenos e fracos que se desfazem facilmente em granular. Cerosidade: pouco e fraco Consistência úmida: muito friável. Consistência molhada: muito plástico e muito pegajoso. Transição: difusa e ondulada.

*Perfil descrito úmido

A área de estudo é cultivada com cana-de-açúcar, em sistema de preparo convencional, sulcação em nível e colheita mecânica desde 2005, com dois ciclos sendo um de 5 anos (2005 a 2009) e outro de 3 anos (2010 a 2012). Em agosto de 2012 a soqueira do cultivo anterior foi suprimida com herbicida, a área foi preparada com aração e gradagens e mantida em pousio para instalação do novo ensaio.

Tratamentos experimentais

A área experimental de 2,5 hectares foi dividida em duas glebas com aproximadamente 120,0 m de comprimento e 50,0 m de largura (0,6 ha), nas quais foram aplicados dois sistemas de preparo do solo: Preparo Profundo Canteirizado (PPC) e Preparo Convencional (PC): O PPC foi realizado em 15/07/2013 com um canteirizador com haste profunda. O equipamento é constituído por componentes que permitem realizar subsolagem, revolvimento superficial para quebra dos torrões, enleiramento da palha e aplicação de corretivo e adubos. O revolvimento superficial (0,0-0,4 m) foi realizado com enxada rotativa, composta por 16 facas, e a subsolagem profunda atingiu 0,8 m. Essas operações foram realizadas simultaneamente para formar os canteiros de solo com 1,20 m de largura. Foram aplicados, simultaneamente, duas doses de calcário: 2 t ha⁻¹ a 0,4 m de profundidade, e 0,8 t ha⁻¹ a 0,8 m de profundidade. O trator utilizado para as operações foi o New Holland T8 com 270 cv de potência no motor.

O PC foi realizado em 24/06/2013, utilizando a grade aradora com 20 discos de 24 polegadas em área total e grade niveladora com 24 discos e 18 polegadas para quebra dos torrões. Um dia antes do plantio foi realizada a aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário e no dia do plantio foi aplicado 0,8 t ha⁻¹ de gesso, ambas incorporadas com grade leve com 26 discos de 18 polegadas, antes da sulcação, utilizando o trator Massey Ferguson 292 com 50cv de potência no motor. A profundidade de operação variou entre 0,15 a 0,2 m.

A sulcação e o plantio da variedade IACSP95-5000, nos dois tratamentos foram realizados em agosto de 2013 em espaçamento duplo alternado, definindo um espaço de 0,9 m, onde não há tráfego de máquinas e implementos (faixa não trafegada), e um espaço de 1,5 m, que foi utilizado para a passagem do tráfego realizado em todos os tratamentos culturais e colheita (faixa trafegada ou rua). No PPC a faixa não trafegada corresponde ao canteiro (CANT), com preparo profundo, sendo a faixa de tráfego mantida sem preparo. No PC, como ambas as faixas receberam o mesmo preparo, a faixa não trafegada (FNT) não é caracterizada como um canteiro. Dessa forma, os tratamentos experimentais foram definidos como: PPC-CANT, PPC-RUA, PC-FNT e PC-RUA.

Amostragem e análises

Amostras indeformadas de solo foram coletadas antes da colheita da cana-de-açúcar, em agosto de 2014, nas camadas de 0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m em anéis metálicos de 0,025 m de altura e 0,070 m de diâmetro utilizando o amostrador de Uhland em cada tratamento (Uhland, 1951).

Foram obtidas curvas de retenção de água no solo para cada repetição amostrada, obtendo-se então uma curva média. Os equipamentos utilizados para medir o potencial mátrico foram a mesa de tensão e câmaras de pressão de Richards (Klute, 1986). Para construção dos gráficos o termo potencial mátrico foi substituído por tensão, para que os valores sejam expressos com sinal positivo.

As amostras foram saturadas por 24 horas com água destilada e em seguida levadas à mesa de tensão e câmara de pressão. Após a obtenção do contato hidráulico entre a placa e a amostra aplicou-se a sucção

(mesa de tensão) e pressão de ar (câmaras de pressão) correspondente à tensão desejada. Os pontos obtidos foram os correspondentes aos potenciais mátricos de 0 (saturado), -0.5, -10 e -100 kPa (mesa de tensão), e nos potenciais mátricos de -500, -700, -1000 e -1500 kPa (câmaras de pressão).

Atingindo o equilíbrio, nas câmaras e nos funis, iniciou-se a obtenção dos pesos em balança de precisão; em seguida foram levadas à estufa com circulação forçada de ar, a 105°C durante 24 horas. Após esse período foram novamente pesadas para obtenção do peso seco. A partir desses dados obteve-se a densidade do solo e o conteúdo de água a base de massa e volume.

Após determinar a umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$) e volumétrica ($m^3\ m^{-3}$) e conhecendo as pressões em que cada uma foi medida, foram traçadas as curvas de retenção de água no solo ajustada conforme o modelo utilizado por van Genuchten (1980) (equação 1), utilizando o software SWRC Fit - Soil Water Retention Curve (Seki, 2007).

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

em que:

θ : umidade na tensão h ;

θ_{res} : umidade residual ($m^3\ m^{-3}$);

θ_{sat} : umidade de saturação ($m^3\ m^{-3}$);

h : tensão da água (kPa);

α : parâmetro empírico, associado à aeração;

m e n : parâmetros empíricos.

Determinou-se, com base nos parâmetros obtidos, o Índice S , correspondente à tangente à curva de retenção de água no solo no ponto de inflexão (equação 2) (Dexter, 2004a).

$$S = \frac{-n (\theta_{sat} - \theta_{res})}{(1 + (1/m)^{-(1+m)})} \quad [2]$$

em que:

S : índice S ;

m e n : parâmetros empíricos.

θ_{res} : umidade residual ($g\ g^{-1}$);

θ_{sat} : umidade de saturação ($g\ g^{-1}$).

A distribuição de poros do solo foi feita com base na teoria da capilaridade, por meio das curvas de retenção de água (Libardi, 2012). Os poros foram classificados de acordo com o proposto por Koorevaar et al. (1983), em que: raios $< 15\mu m$ (3 kPa) são classificados como microporos, raios entre 15 e 50 μm (3 a 10 kPa) são mesoporos e raios $> 50\mu m$ são macroporos.

A partir da diferenciação da curva de retenção da água no solo obteve-se a curva de frequência acumulada do tamanho de poros (equação 3). E pela segunda derivada da equação obteve-se o valor de raio máximo (equação 4).

$$\frac{d\theta}{d \log \tau} = (\theta_s - \theta_r) m n A^n r^{-n} [1 + A^n r^{-n}]^{-m-1} \quad [3]$$

$$r_{max} = A \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{n}} \quad [4]$$

Análise estatística

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado (DIC) disposto em um esquema fatorial do tipo 2 x 2 sendo 2 tratamentos (Preparo Profundo Canteirizado – PPC e Preparo Convencional - PC) e 2 locais de amostragem (canteiro e rua de tráfego agrícola) em 5 camadas de solo (0,0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m) com 4 repetições.

Os dados foram submetidos à análise de Normalidade (Shapiro & Wilk, 1965) e Homocedasticidade (Bartlett, 1937) utilizando o software R (R Core Team, 2017). O teste F foi aplicado e quando constatada significância ($p < 0,05$) foi feita a comparação múltipla das médias para a distribuição de poros e índice S pelo teste de Tukey.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figuras 1 e Figura 2 são apresentadas as curvas de retenção de água do PPC e do PC, respectivamente, nos canteiros e nas ruas nas diferentes camadas, ajustadas segundo o modelo matemático utilizado por van Genuchten (1980). A retenção de água foi modificada de acordo com as posições de amostragem e as camadas, indicando que os tipos de preparo do solo influenciaram o conteúdo de água retido nas diferentes tensões.

A distribuição do tamanho de poros, conforme Koorevaar et al. (1983), em macroporos ($>50 \mu\text{m}$), mesoporos ($15-50 \mu\text{m}$), e microporos ($<15 \mu\text{m}$) para os tratamentos avaliados são apresentados na tabela 2 e auxiliam no entendimento das modificações ocorridas nas curvas de retenção.

Na camada de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m o PPC-CANT apresentou maior retenção de água até a tensão de 1 hPa em relação ao PPC-RUA. Este resultado pode ser explicado pela forma como o preparo do solo foi realizado nesta posição. A enxada rotativa rompeu a estrutura em blocos do solo, pulverizando-o e elevando a macroporosidade nestas camadas, (Tabela 2), aumentando a disponibilidade de água em altas tensões.

Acima da tensão de 1 hPa, as diferenças em relação a quantidade de macro, meso e microporos entre PPC-CANT e PPC-RUA mostraram que o preparo profundo do solo alterou a curva de retenção na camada de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m pelo aumento da aeração do solo e, na camada de 0,6-0,8 m na macro e

microporosidade em PPC-CANT. Isso pode ser evidenciado pela maior retenção de água no PPC-RUA nas tensões menores devido aos microporos, responsáveis pelo armazenamento da água no solo.

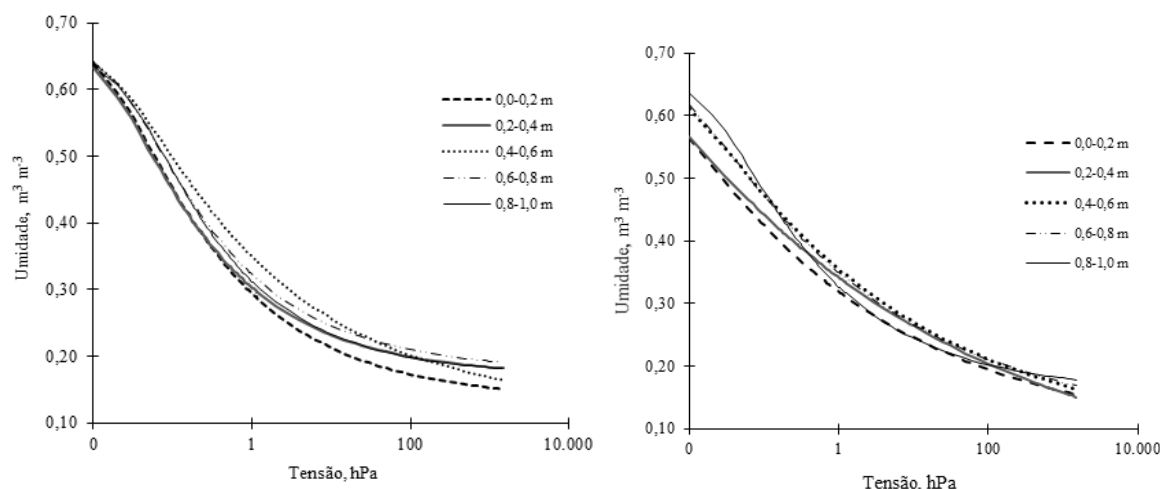


Figura 1. Curvas médias de retenção de água no solo do PPC-CANT (A) e do PPC-RUA (B) nas camadas estudadas, ajustadas ao modelo utilizado por van Genuchten (1980).

No PC observa-se pouca modificação nas formas das curvas do PC-FNT em relação ao PC-RUA. Maior de retenção de água entre as tensões de 1 a 3 hPa no PC-FNT é atribuída à maior frequência de poros com menores tamanhos nesta faixa de tensão.

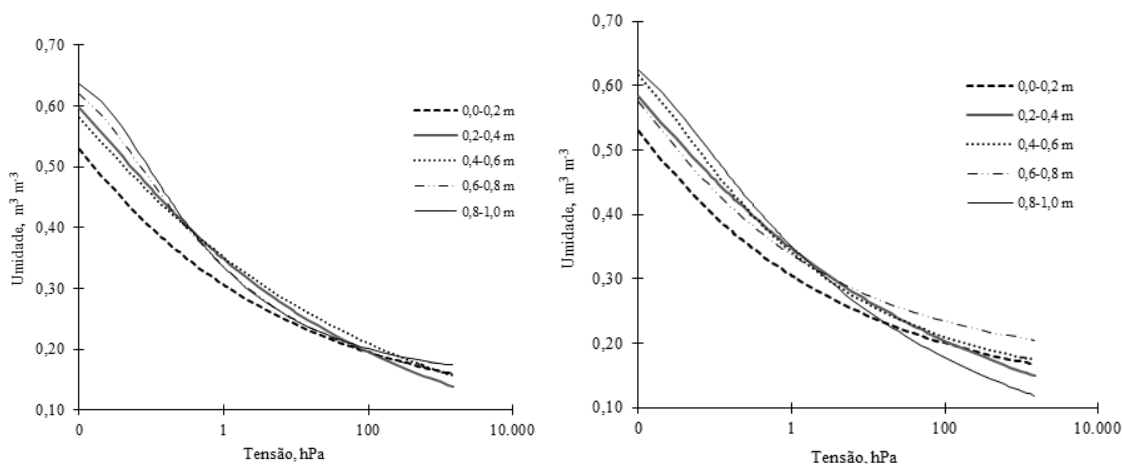


Figura 2. Curvas médias de retenção de água no solo do PC-FNT (A) e do PC-RUA (B) nas camadas estudadas, ajustadas ao modelo utilizado por van Genuchten (1980).

A ausência de tráfego agrícola no PPC-CANT e PC-FNT aumentou a retenção de água em baixas tensões em relação ao PPC-RUA e PC-RUA. Em baixos potenciais, o aumento da macroporos do solo pelo surgimento de fendas proporcionada pela subsolagem profunda, torna-se desfavorável à retenção de água.

Por outro lado, a utilização do subsolador elimina os impedimentos físicos, rompe camadas compactadas e favorece o desenvolvimento de raízes.

Tomaz (2013) observou maior retenção de água em Nitossolo Vermelho sob sistema convencional com maior quantidade de microporos. Araújo et al. (2004) observaram que o aumento da compactação do solo promoveu um aumento da água retida em Latossolo Vermelho devido à predominância de poros de menor tamanho nas condições de maior densidade.

Em altas tensões, as formas como os preparos do solo foram realizadas não alterou a forma das curvas de retenção. Reichardt (1987) e Demattê (1988) afirmaram que, em solos de textura mais fina, a distribuição dos poros por tamanho é maior e mais uniforme, proporcionando a adsorção de maior conteúdo de água e decréscimo mais gradual da umidade do solo com o aumento da tensão.

Considerando a que a transição entre horizontes do perfil do solo é ondulada, o horizonte Bw (latossólico) pode manifestar-se acima ou abaixo da profundidade de 0,6 m. Isto indica que o preparo profundo do solo não altera a distribuição de poros em horizonte com estrutura microgranular, e não há modificações das curvas de retenção de água em baixas tensões.

Desta forma, as curvas de retenção de água da camada de 0,6-0,8 m mostraram que a ação das máquinas agrícolas não interferiu na retenção de água para os tipos de preparos do solo realizados. No entanto, o preparo profundo do solo com subsolador à 0,80 m de profundidade no PPC-CANT alterou a distribuição dos poros (macro e microporosidade) na camada de 0,6-0,8 m.

Na camada de 0,8-1,0 m, a interferências dos tratamentos na estrutura do solo foram reduzidas em razão das características latossólicas do solo e todas as curvas tiveram comportamentos semelhantes. A partir da tensão de aproximadamente 5 hPa a curva de retenção de água dos canteiros e ruas invertem seus comportamentos e, a rua passa a reter mais água em baixos potenciais devido ao incremento da microporosidade, responsável pela retenção de água em altas tensões.

Tabela 2. Distribuição de poros (macro, meso e microporos) a base de volume obtidos a partir da curva de retenção de água no solo dos tratamentos avaliados.

Tratamentos	PPC		PC	
	CANT	RUA	FNT	RUA
Camadas (m)	Macroporosidade ($m^3 m^{-3}$)			
0,0-0,2	0,29 aA	0,20 aB	0,21 bA	0,19 aA
0,2-0,4	0,27 aA	0,18 aB	0,19 bA	0,19 aA
0,4-0,6	0,23 aA	0,20 aA	0,19 bA	0,21 aA
0,6-0,8	0,27 aA	0,21 aB	0,23 aA	0,20 aA
0,8-1,0	0,28 aA	0,26 aA	0,25 aA	0,24 aA
	Mesoporosidade ($m^3 m^{-3}$)			
0,0-0,2	0,13 aA	0,11 aB	0,10 bA	0,10 aA
0,2-0,4	0,13 aA	0,11 aB	0,12 aA	0,11 aA
0,4-0,6	0,13 aA	0,11 aA	0,10 bA	0,12 aA
0,6-0,8	0,12 aA	0,11 aA	0,13 aA	0,11 aB

0,8-1,0	0,14 aA	0,13 aA	0,14 aA	0,12 aA
Microporosidade (m³ m⁻³)				
0,0-0,2	0,58 bB	0,69 aA	0,69 aA	0,72 aA
0,2-0,4	0,60 bB	0,71 aA	0,69 aA	0,69 aA
0,4-0,6	0,64 bA	0,69 aA	0,71 aA	0,67 aA
0,6-0,8	0,61 aB	0,68 aA	0,64 aB	0,69 aA
0,8-1,0	0,58 aA	0,61 aA	0,61 aA	0,64 aA

*Letra minúscula na linha compara posições iguais entre tratamentos (PPC-CANT x PC-FNT) e (PPC-RUA x PC-RUA). *Letra maiúscula na linha compara posições diferentes dentro de cada tratamento (PPC-CANT x PPC-RUA) e (PC-FNT x PC-RUA).

As curvas de distribuição de frequência (curvas diferenciais das curvas de retenção) são apresentadas na figura 3 e na figura 4. Observa-se em todos os tratamentos que para cada tensão aplicada existe um poro com raio equivalente, e todos os poros de raio maior que ele, são esvaziados na referida tensão aplicada. A forma de sino da curva diferencial representa o raio dos poros mais frequentes no solo.

A distribuição dos poros do solo depende da combinação dos efeitos devido à textura e estrutura do solo e podem ser classificados como primários e secundários. Os primários são devido à textura retém fortemente a água no solo por adsorção, e os secundários são poros estruturais que correspondem ao espaço entre os agregados e são suscetíveis a modificações devido ao manejo ou qualquer perturbação da estrutura do solo (Nimmo, 1997; Zaffar & Lu, 2015).

Pode-se notar, portanto, pela curva diferencial de retenção de água no solo (Figura 3A) que no PPC-CANT os picos da frequência máxima de raios em todas as camadas foram coincidentes e estão compreendidos no intervalo dos macroporos onde o raio máximo variou de 176 a 298 μm . Esse resultado é reflexo do preparo em localizado realizado profundidade, o qual pulverizou o solo. A estrutura em blocos do solo até a profundidade de 0,4 m do foi modificada pelos mecanismos ativos da enxada rotativa, o qual reduziu o tamanho dos agregados tornando as partículas de solo mais próximas umas das outras. As diferenças entre os horizontes (tabela 1) foram perdidas e a água é facilmente retirada em baixas tensões, sendo maior a infiltração e redistribuição de água e menor a retenção de água no mesmo. Pires et al. (2009) também verificaram modificação dos picos das curvas diferenciais de frequência de poros, devido a modificações na estrutura do solo.

O PPC-RUA (Figura 3B) é destinado a passagem dos rodados agrícolas, cujo o preparo do solo não foi realizado e apresenta as condições estruturais advindas dos usos/manejo anteriores. Neste local observa-se que nas camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m apesar dos picos da frequência máxima de raios também estarem compreendidos dentro do intervalo dos macroporos a água é retirada dos poros com maior dificuldade, indicando compactação, principalmente na camada de 0,2-0,4 m, caracterizando um pé-de-grade. Os maiores picos observados nas camadas de 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1,00 m ocorrem devido a característica latossólica do horizonte com transição ondulada compreendido a partir de 0,6 m de profundidade.

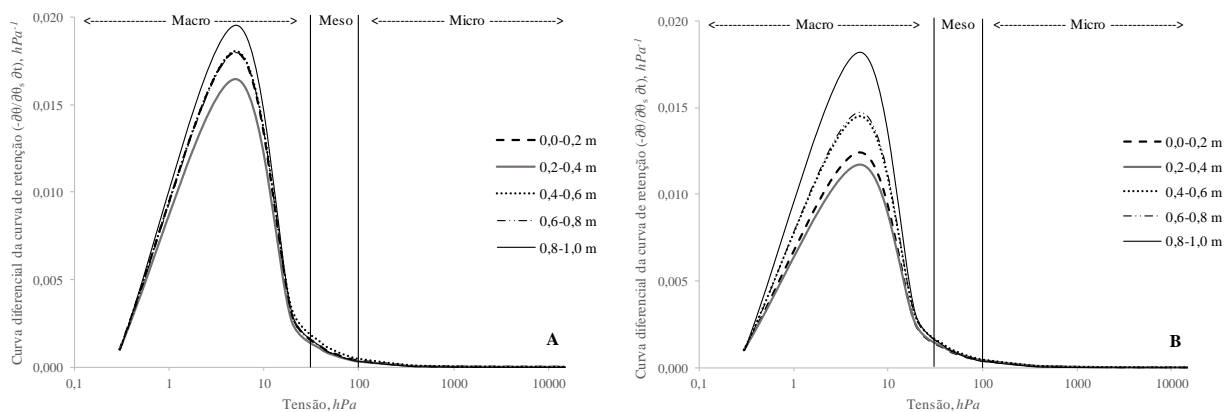


Figura 3. Curvas de distribuição de frequência de volume de poros nas camadas estudadas dos tratamentos PPC-CANT (A) e PPC-RUA (B), ajustada pela equação utilizada por van Genuchten (1980).

Para o PC-FNT e PC-RUA as curvas diferenciais da distribuição de frequência de poros foram semelhantes. O preparo total da área com grade aradora e niveladora rompeu a estrutura compactada do solo em superfície formando fendas e macroestruturas que favoreceram a frequência máxima de poros grandes ($>2000 \mu\text{m}$).

Os elevados valores de raio máximo obtido por meio da frequência de raios para solos argilosos a muito argilosos, como o do presente estudo, são ocasionados devido ao funcionamento simplista do modelo da capilaridade, cujo fenômeno é caracterizado pelo movimento ascendente da água em tubos de feixes capilares (Libardi, 2012; Hunt et al., 2013). Devido a complexibilidade do meio poroso de solos argilosos com elevada atividade biológica somada às fendas e macroestruturas geradas pelo preparo do solo, não há ascensão uniforme da água, intensificando, além disso, os fenômenos de histerese.

Os valores de raio máximo observados no presente estudo estão de acordo com a distribuição bimodal de poros observado no estudo de Tognon (1991) com intervalo de raios entre 2,5 e 2000 μm , correspondendo aos poros interagregados em Nitossolo Vermelho no estado de São Paulo.

Durante a saturação das amostras indeformadas de solo o ar aprisionado nas macroestruturas oferece, posteriormente, certa resistência à saída de água da amostra sob determinada pressão de borbulhamento (Libardi, 2012), elevando o valor do parâmetro “ α ” da equação utilizada por van Genuchten (1980) e, conseqüentemente o valor do raio máximo de poros. Os valores elevados dos parâmetros “ α ” são, também, provavelmente a mineralogia oxídica da fração argila, o qual favorece a agregação do solo.

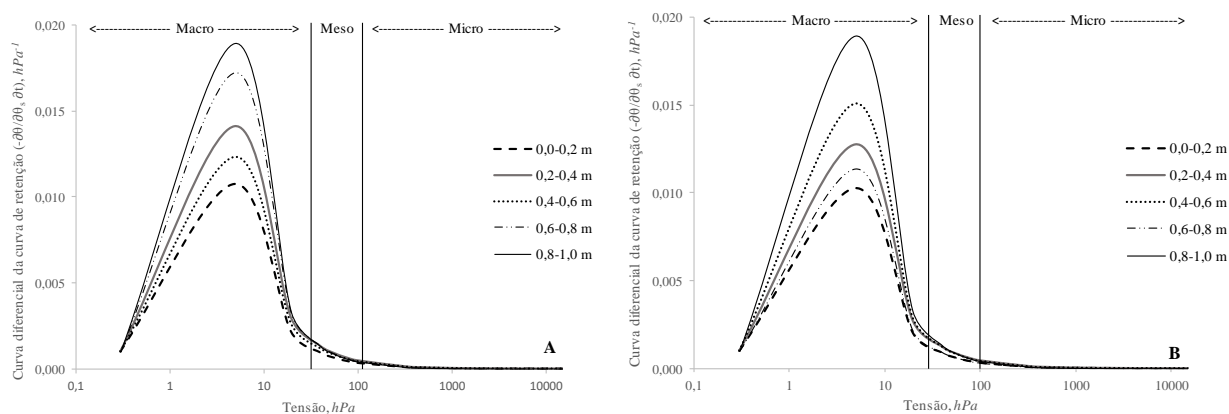


Figura 4. Curvas de distribuição de frequência de volume de poros nas camadas estudadas dos tratamentos PC-FNT (A) e PC-RUA (B), ajustada pela equação utilizada por van Genuchten (1980).

De forma geral, houve alteração na amplitude das curvas diferenciais da distribuição de frequência de poros o que significa que o manejo alterou o raio dos poros predominantes do solo. Klein & Libardi (2002) também verificaram mudanças no traçado das curvas de retenção e alteração na distribuição do diâmetro dos poros em diferentes sistemas de manejo de solo (sequeiro e irrigado com preparo convencional do solo, plantio direto e aração profunda).

Letey (1985) destacou que a presença de uma rede ideal de poros, com ampla variação de diâmetros, é um fator-chave na produtividade das culturas, pois interfere nas relações entre drenagem, teor de água disponível para as plantas, absorção de nutrientes, penetração de raízes, aeração e temperatura.

Avaliando a qualidade física por meio do índice S introduzido no Brasil a partir dos trabalhos de Dexter (2004a, 2004b e 2004c) é possível verificar numericamente que os manejos modificaram a declividade da curva característica de retenção da água do solo em seu ponto de inflexão e, as alterações na proporção de tamanhos de poros (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios do Índice S do solo dos tratamentos avaliados.

Tratamentos	PPC			PC
	CANT	RUA	FNT	RUA
Camadas (m)	Índice S			
0,0-0,2	0,08 aA	0,04 aB	0,04 bA	0,04 aA
0,2-0,4	0,08 aA	0,04 aB	0,05 bA	0,05 aA
0,4-0,6	0,07 aA	0,05 aA	0,05 aA	0,06 aA
0,6-0,8	0,07 aA	0,06 aA	0,08 aA	0,05 aB
0,8-1,0	0,09 aA	0,08 aA	0,08 aA	0,06 aA

*Letra minúscula na linha compara posições iguais entre tratamentos (PPC-CANT x PC-FNT) e (PPC-RUA x PC-RUA). *Letra maiúscula na linha compara posições diferentes dentro de cada tratamento (PPC-CANT x PPC-RUA) e (PC-FNT x PC-RUA).

Os valores de índice S no PPC e no PC nos canteiros e nas ruas ficaram acima de 0,035, preconizado por Dexter (2004a) como limite crítico para a boa qualidade do solo. Aratani et al. (2009) em seus estudos não encontraram valores críticos para o índice S em função dos sistemas de uso e manejo e, por isso, esse valor crítico de 0,035 foi questionado.

Verificando a adequação do índice S no diagnóstico da qualidade física de solos de diferentes classes texturais, Andrade & Stone (2009) estabeleceram limites que separam solos com boa e pobre qualidade estrutural. Com base nos intervalos de valores de densidades do solo, sugeridos como normais pela literatura (Assis & Lanças, 2005; Secco et al., 2005; Spera et al., 2006), definiram que valores acima de 0,045 indicam solos de textura argilosa a muito argilosa com boa qualidade física.

Assim, considerando os limites propostos por Andrade & Stone (2009), o valor de S abaixo de 0,045 correspondeu a uma mudança no formato da curva de retenção de água no solo, na camada de 0,0-0,2 m no PPC-RUA, PC-FNT e PC-RUA e na camada de 0,2-0,4 m do PPC-RUA. A inclinação da curva de retenção (Figura 1B, Figura 2A e Figura 2B) correspondeu à redução significativa do S (0,040) indicando um solo com pobre qualidade física em função da distribuição de poros desproporcional ao que é considerada ótima ao desenvolvimento das culturas.

A redução do índice S nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar pode estar associada à diminuição do pico da distribuição de frequência de poros, resultando em um “achatamento” vertical da curva de retenção de água, pela redução dos poros estruturais como pôde ser observado nas curvas diferenciais da frequência de poros. Isso demonstra que houve perda da qualidade física em razão do tráfego de máquinas agrícolas, principalmente, pela redução da macroporosidade, concordando com os resultados observados por Argenton et al. (2005).

Na camada de 0,2-0,4 m, os índices S do PPC-CANT e PC-FNT enquadraram-se na faixa de boa qualidade física segundo Andrade & Stone (2009) (Tabela 3). No entanto diferiram entre si devido à redução da porosidade estrutural no PC-FNT ocasionada pela compactação. Tormena et al. (2008) associaram a redução do índice S ao aumento da densidade do solo, indicando a redução da sua qualidade física, associada à sua compactação.

A partir da camada de 0,4-0,6 m PPC-CANT e PC-FNT não diferiram pois, apesar do preparo profundo realizado com subsolador no PPC, o solo a partir da profundidade de 0,60 m apresenta estrutura granular (característica latossólica) e a interferência das operações mecanizadas são minimizadas. No PC as camadas de 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m apresentam melhores índices em relação às camadas de 0,0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m. A maior declividade na curva de retenção no ponto de inflexão do PPC-CANT ($S = 0,080$) relevou um solo estruturado e com melhor distribuição de tamanho de poros (Figura 1A).

CONCLUSÕES

O preparo do solo localizado para o cultivo da cana-de-açúcar, realizado em forma de canteiros homogeneizaram a distribuição de poros do solo em profundidade, desconfigurando a estrutura em blocos,

original da classe dos Nitossolos. No entanto, melhorou a qualidade física do solo, evidenciado pelo índice S e distribuição de poros.

O sistema de cultivo convencional do solo não oferece qualidade física ao cultivo da cana-de-açúcar até 0,4 m de profundidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13:382–388, 2009.

ARATANI, R.G.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ANDRIOLI, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:425-435, 2005.

ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:515-522, 2005.

BARTLETT, M.S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society**, Series A, 160:268–282, 1937.

CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L.A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 34:1467-1473, 1999.

CUNHA, E.Q.; STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; FERREIRA, E.P.B.; DIDONET, A. D. Atributos físicos do solo sob diferentes preparos e coberturas influenciados pela distribuição de poros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 14:1160-1169, 2010.

DEMATTE, J.L.I. **Manejo de solos ácidos dos trópicos úmidos-região amazônica**. 1.ed. Campinas: Fundação Cargill, 1988. 215p.

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, 2004a.

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

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about Stheory. **Geoderma**, 120:227-239, 2004c.

HUNT, A.G.; EWING, R.P.; HORTON, R. What's wrong with soil physics? **Soil Science of America Journal**, Madison, 77:1877-1887, 2013.

KAY, B. D.; VANDENBYGAART, A. J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil & Tillage Research**, 66:107-118, 2002.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:857-867, 2002.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2 ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Society of America, 1986. p.365-662.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; KIRKSEN, C. **Elements of soil physics**. Amsterdam: Elsevier, 1983. 228p. (Developments in Soil Science, 13).

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP), 2012. 346p.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advison Soil Science**, [S.l.], 1:277-294, 1985.

NIMMO, J.R. Modeling structural influences on soil water retention. **Soil Science Society of America Journal**, 61:712-719, 1997.

PIRES, L.F.; REICHARDT, K.; COOPER, M.; CÁSSARO, F.A.M.; DIAS, N.M.P.; BACCHI, O.O.S. Pores system changes of damaged Brazilian oxisols and nitosols induced by wet-dry cycles as seen in 2-D micromorphologic image analysis. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, 81:151-161, 2009.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. 1.ed. São Paulo, 1987. 188p.

RIBEIRO, K.D.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B.F.; SAMPAIO, F.M.T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, 31:1167-1175, 2007.

SANTOS H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2013.

SCHAFFRATH, V.R.; TORMENA, C.T.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES A.C.A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 32:1369-1377, 2008.

SECCO, D.; ROS, C.O.; SECCO, J.K.; FIORIN, J.E. 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.

SEKI, K. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrol. Earth System. Science Discussion*. 4:407-437, 2007.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; CURI, M.; DIAS JUNIOR, M.S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:159-168, 2009.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V.A. Indicadores da qualidade física do solo. In: Jong van Lier, Q., ed. **Física do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.541-281.

SILVA, J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 21:677-684, 1997.

SILVA, R.R.; SILVA, M.L.N.; FERREIRA, M.M. Atributos físicos indicadores da qualidade do solo sob sistemas de manejo na Bacia Alto do Rio Grande-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, 29:719-730, 2005.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. *Ciência Rural*, 36:1193-1200, 2006.

SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A.N.; PRADO, R.M.; BENTO, M.J.C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, 34:31-38, 2008.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete sample). *Biometrika*, Great Britain, 52:591-611, 1965.

UHLAND, R.E. Rapid method for determining soil mixture. **Soil Science Society of American Proceedings**, 15:391-393, 1951.

TOGNON, A.A. Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guará-SP sob diferentes sistemas de cultivo. 1991. 85f. (Dissertação) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

TOMAZ, H.V.Q. Sistema de preparo profundo do solo e sua influência no desenvolvimento da cana-de-açúcar. 2013. 133f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

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. **Scientia Agricola**, Piracicaba, 65:56-60, 2008.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, 44:892-898, 1980.

ZAFFAR, M.; LU, S.G. Pore size distribution of cleyey soils and its correlation with soil organic matter. **Pedosphere**, 25:240-249, 2015.