

ATRIBUTOS RADICULARES DA CANA-DE-AÇÚCAR EM SISTEMAS DE PREPARO PROFUNDO CANTEIRIZADO E CONVENCIONAL DO SOLO

Camila Cassante de Lima

RESUMO

Os sistemas de preparo do solo e o tráfego agrícola podem promover alterações nos atributos físicos do solo e afetar o crescimento radicular das culturas. As técnicas de cultivo empregadas pelo setor sucroalcooleiro no estado de São Paulo têm frequentemente provocado degradação dos atributos do solo devido à utilização intensiva de máquinas e implementos, decorrentes da substituição da colheita manual pela mecanizada, e podem estar limitando o desenvolvimento das raízes. O objetivo deste trabalho foi avaliar os sistemas de preparo profundo canteirizado (PPC) e o preparo convencional (PC) do solo em cana-de-açúcar, antes do primeiro corte, bem como seus reflexos na distribuição do sistema radicular e em atributos físicos do solo. O estudo foi realizado no município de Piracicaba, SP, em um Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico. Os tratamentos experimentais foram os dois sistemas de preparo e duas faixas de tráfego. 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) onde foram realizadas as amostragens de solo até 1,0 m de profundidade. Foram avaliados atributos do solo relacionados com sua relação massa/volume e resistência mecânica do solo à penetração, bem como atributos do sistema radicular da cana-de-açúcar. Foi aplicada a transformação logarítmica nos valores dos atributos radiculares devido à elevada variabilidade amostral dos dados naturais. No PPC o crescimento das raízes não ficou limitado apenas ao canteiro, pois nesse sistema não foi observada diferença significativa para os atributos radiculares entre a faixa não trafegada e a faixa de tráfego agrícola (rua). No PPC, o canteiro apresentou menor resistência do solo à penetração e maior massa seca e volume radiculares comparado ao preparo convencional do solo. Em ambos os sistemas de preparo do solo, na rua de tráfego agrícola foi observado menor comprimento radicular e maior resistência mecânica à penetração em comparação com a respectiva faixa não trafegada. No PC as operações agrícolas resultam em aumento da densidade do solo e da resistência mecânica à penetração, com limitações ao crescimento das raízes abaixo da camada de 0,0-0,2 m, tanto na faixa não trafegada quanto na rua de tráfego agrícola.

Palavras-chave: resistência do solo à penetração, massa seca radicular, comprimento radicular.

ABSTRACT

The soil tillage systems and agricultural traffic generate changes in soil physical attributes and impact on the growth of root systems of crops. The cultivation techniques used by farmers and sugar cane companies in the state of Sao Paulo have caused damage to attributes of soils by intensive use of machinery and implements, resulting from the replacement of manual harvesting by mechanized, and can may be limiting the development of the roots. The objective of this study was evaluate the systems deep strip-till and the conventional tillage soil in sugarcane, before the first harvest, and its impact on the distribution of the root system and in soil physical attributes. The experiment carried out at Piracicaba, SP, and the soil was an Alfisol Xeralf. The treatments were the deep strip-till and conventional tillage of soil. The culture spacing

was 0.90 m (in-row) x 1.50 m (inter-row) where the soil samples were taken until 1,0 m deep. Were evaluated the physical attributes that predict the bulk of soil, penetration resistance and root systems of sugarcane. Logarithmic transformation was used in root attributes due to the high variability of natural data. On the deep strip-till the root growth didn't limit only on in-row, because in these systems didn't observe significant difference for the root attributes between the in-row and inter-row. On deep strip-till, the in-row showed smaller soil resistance to penetration and higher dry mass and root volume compared to conventional tillage. However, in both the soil tillage systems, on inter-row was observed smaller root length and greater mechanical resistance to penetration compared to the respective in-row. In conventional tillage, the agricultural traffic results in increased bulk of soil and preparation of implements and machinery traffic result in increased density and soil resistance to penetration, with limitations to root growth below the 0-0.2 m layer in the in-row and inter-row.

Key-words: penetration resistance, root dry mass, root length.

INTRODUÇÃO

A colheita manual da cana-de-açúcar, em razão de fatores socioeconômicos, técnicos e ambientais, vem sendo suprimida e o uso da colheita mecanizada tornou-se uma necessidade exemplo, a proibição da despalha da cana por queima desde 2014 nas áreas com declividade menor que 12% foi impulsionada pelo Protocolo Agroambiental – Etanol Verde, assinado pelo Governo do Estado de São Paulo, União da Indústria Sucroalcooleira e pela Organização de Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil.

O processo atual de produção de cana-de-açúcar está baseado na adoção de sistema preparo convencional, que promove um revolvimento intenso da camada superficial de solo (Bertolet al., 2001). O plantio e o cultivo são realizados em uma ou duas linhas e a colheita é feita em linhas simples, acompanhada do veículo de transbordo na linha adjacente. Como consequência, ocorre tráfego intenso, com baixo rendimento operacional, alto custo e surgimento de camadas compactadas (Roque et al., 2010) que, por sua vez, podem prejudicar o crescimento de raízes das culturas (Valadão et al., 2015).

Na busca por soluções para reduzir a compactação causada pelo intenso tráfego agrícola em canaviais, o sistema preparo canteirizado surge como alternativa de controle de tráfego, com ou sem uso do piloto automático. Nesse sistema, o preparo do solo é realizado apenas em parte da área, formando canteiros, os quais serão preservados quando do tráfego subsequente. Essa técnica pode ser realizada com preparo profundo do solo, que consiste em operações conjugadas e simultâneas de subsolagem, aplicação e incorporação de adubos e corretivos, enleiramento da palha e quebra dos torrões na camada superficial do solo, mantendo as áreas entre os canteiros sem mobilização. A canteirização permite minimizar o efeito deletério do tráfego agrícola por criar zonas que favorecem o crescimento de raízes (Marasca et al., 2015). Deste modo, menor área é submetida ao tráfego, embora mais intensamente (Treinet al., 2005). Esta prática é recente no Brasil, e visa reduzir o impacto da compactação do solo sobre a produtividade das culturas (Tullberg, 1997).

A arquitetura e a distribuição do sistema radicular são fatores que apresentam importância expressiva na relação planta-água-solo as quais refletem a dinâmica de crescimento da cultura (Vasconcelos&

Casagrande, 2010). O sistema radicular da cana-de-açúcar é altamente responsivo ao ambiente edáfico, e é fundamental para a definição de técnicas agronômicas, como densidade de plantio, local de aplicação dos fertilizantes, operações de cultivo e sistemas de irrigação (Casagrande, 1991; Zonta et al., 2006). Nos estudos sobre as relações entre os sistemas de preparo e os atributos do solo, a avaliação do crescimento radicular da cana-de-açúcar tem sido realizada através dos atributos comprimento, massa e volume de raízes, por estarem diretamente relacionados com o potencial de absorção por água e nutrientes e o volume de solo explorado (Atkinson, 2000).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o preparo profundo canteirizado e o preparo convencional do solo, ambos com espaçamento duplo alternado, e seus efeitos sobre a distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar e em atributos físicos do solo.

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 como Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico, A moderado (Santos et al., 2013) de composição granulométrica homogênea ao longo do perfil (teores médios de 568 g kg⁻¹ de argila e 330 g kg⁻¹ de areia total). De litologia diabásica, em relevo suave ondulado, é bem drenado e não apresenta pedregosidade e rochiosidade. Na descrição do perfil foram observadas raízes muito finas e grossas nos horizontes A e AB, comuns e finas no horizonte B e poucas e finas no horizonte Bw, e também muitos canais biológicos.

Tratamentos experimentais

A área experimental de 2,5 há foi dividida em duas glebas com aproximadamente 0,70 ha cada, com 120 m de comprimento e 50 m de largura, nas quais foram aplicados dois tipos de preparo do solo: Preparo Profundo Canteirizado (PPC) e Preparo Convencional (PC). Preparo Profundo Canteirizado (PPC). O PPC foi aplicado em 15/07/2013 utilizando um canteirizador com haste profunda. O equipamento é constituído por componentes que permitem realizar, simultaneamente, 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 formaram os canteiros de solo preparado 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 PC foi aplicado em 24/06/2013, utilizando a grade aradora com 20 discos de 24 polegadas para incorporação do corretivo (calcário) em área total e grade niveladora para quebra dos torrões. A profundidade de operação variou entre 0,2 e 0,3 m. Um dia antes do plantio foi realizada a aplicação de 2

t ha⁻¹ de calcário com grade superficial, e no dia do plantio foi aplicado 0,8 t ha⁻¹ de gesso, incorporado com grade leve, antes da sulcação.

A sulcação e o plantio nos dois tratamentos foram realizados em espaçamento duplo alternado, definindo uma faixa menor (0,9 m) onde não há tráfego de máquinas e implementos (faixa não trafegada) e uma faixa maior (1,5 m), que é utilizada para a passagem de todo o tráfego dos tratamentos culturais e colheita (faixa trafegada ou rua). No PPC a faixa não trafegada corresponde ao canteiro, com preparo profundo, sendo a faixa de tráfego mantida sem preparo. No PC, ambas as faixas receberam o mesmo preparo, e a faixa não trafegada não é caracterizada como um canteiro. Dessa forma os tratamentos experimentais foram definidos como PPC-CANT, PPC-RUA, PC-FNT e PC-RUA.

Tratos Culturais na Área Experimental

A variedade plantada foi a IACSP95-5000. A adubação de plantio seguiu as recomendações para a cultura, com aplicação de 600 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 5-20-20 (N-P-K) nos sulcos de plantio. Antes da colheita foi feita a avaliação da fertilidade do solo até 1,0 m de profundidade (Tabela 1).

A colheita da cana-planta foi realizada na primeira quinzena de outubro de 2014 utilizando a colhedora de esteira, Case IH – A8800. Após a colheita, realizou-se a adubação da soqueira com 450 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 20-05-20.

Tabela 1 -Valores médios dos atributos químicos do Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólicodos tratamentos preparo profundo canteirizado (PPC) e preparo convencional (PC), em setembro de 2014.

Camada (m)	pH (CaCl ₂)	MO g dm ⁻³	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V%
-----mmol _c dm ⁻³ -----								
PPC								
0,0-0,2	5,0	17,5	20,5	12,0	35,5	33,3	68,8	48,0
0,2-0,4	5,5	16,0	28,0	21,5	31,0	31,0	81,0	58,5
0,4-0,6	4,9	13,0	16,5	6,0	37,5	37,5	60,5	37,5
0,6-0,8	5,2	13,0	20,0	9,5	35,0	35,0	65,0	45,0
0,8-1,0	5,1	11,0	14,0	2,5	30,5	30,5	47,5	35,5
PC								
0,0-0,2	5,1	22,0	23,0	13,5	38,5	37,1	75,6	47,5
0,2-0,4	4,6	19,5	13,5	6,00	45,5	19,9	65,4	30,0
0,4-0,6	4,6	16,0	14,0	5,00	45,0	19,4	64,4	29,5
0,6-0,8	4,8	13,5	13,5	3,50	40,0	17,4	67,4	31,0
0,8-1,0	4,9	12,5	10,0	2,50	36,0	12,8	48,8	26,5

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, em um transepto de quatro pontos equidistantes na linha não trafegada (0,90 m) e

Análise estatística

Os dados de resistência mecânica do solo à penetração e umidade foram analisados por meio de intervalo de confiança da diferença entre duas médias, utilizando o software SISVAR 5% de nível de significância (Ferreira, 2000).

Devido à elevada variabilidade dos atributos radiculares, os dados foram previamente transformados pela equação $y = \log(x + 10)$, conforme Cintra et al. (2006). Em seguida, foram identificados “outliers” seguindo o critério definido pela amplitude interquartil (IQR), sendo eliminados até três valores não compreendidos dentro dos limites inferior (primeiro quartil - 1,5 IQR) e superior (terceiro quartil + 1,5 IQR), conforme Libardi et al. (1986). Os dados log-transformados foram comparados pelo intervalo de confiança da diferença entre duas médias, utilizando o software SISVAR (Ferreira, 2000), considerando 15% de nível de significância (Payton et al., 2000).

O efeito da transformação matemática dos dados de atributos radiculares sobre a estabilização das variâncias pode ser verificado pela relação entre os valores de coeficiente de variação (CV) dos dados naturais e log-transformados, considerando sua distribuição em torno da linha 1:1 (Figura 2). Com a transformação dos dados, o CV reduziu em 80 % para massa seca de raízes, 109 % para comprimento radicular, 156 % para área radicular, 157 % para o volume de raízes e 159 % para a densidade radicular. Tais diminuições dos valores do CV indicam que a transformação logarítmica favoreceu maior aderência à distribuição normal de dados dos atributos radiculares, estabilizando a variância dos mesmos. Os valores de CV seguiram a ordem: massa seca radicular < comprimento < densidade radicular < área radicular < volume radicular. Isto está relacionado ao acúmulo de suas variâncias individuais visto que, por exemplo, a área e volume radiculares são atributos bi e tridimensionais, respectivamente. Assim, a densidade radicular passou a enquadrar-se na classe de baixa variabilidade (CV < 12 %) e os demais atributos radiculares, na classe de média variabilidade (12 % < CV < 52 %) (Warrick&Nielsen,1980). Em geral, os dados log-transformados aumentaram em 67 % a sensibilidade do intervalo de confiança da diferença entre médias, ratificada pelas probabilidades de significância (valor p , dados não apresentados).

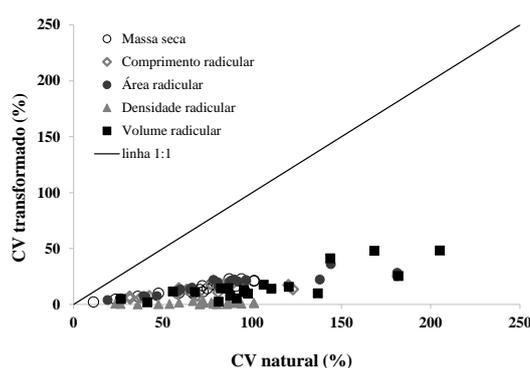


Figura 2 - Alteração do coeficiente de variação (CV) dos dados não transformados dos atributos radiculares em relação $ay = \log(x + 10)$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resistência do solo à penetração

Os valores médios da RP nos tratamentos PPC-RUA, PC-FNT e PC-RUA mostram perfis de resistência semelhantes (Figura 3), com valores mais elevados de resistência comparativamente ao PPC-CANT e indicando um aumento da compactação a partir da camada de 0,15m de profundidade. A canteirização promoveu alterações da estrutura do solo na profundidade de 0,10 a 0,50 m, mobilizada pelo preparo realizado pelos mecanismos ativos da enxada rotativa e pelo faturamento profundo da estrutura do solo. Tal manejo reduziu a impedância mecânica do solo em relação à condição inicial do solo, representada pela faixa direcionada ao tráfego agrícola no PPC e ao preparo convencional do solo em área total, que apresentam compactação de subsuperfície ocasionada pelo acúmulo das pressões de contato exercidas pelos rodados do trator e implementos agrícolas, inclusive o utilizado para preparo dos canteiros, somado à história de tensão do solo, reflexo de manejos anteriores.

No PC, embora os valores de resistência sejam maiores na rua de tráfego, o efeito do controle de tráfego não foi observado. O preparo do solo foi realizado em área total, ocorrendo um afrouxamento da estrutura do solo. A camada superficial preparada com grade aradora e niveladora, entretanto, transmite cargas em profundidade que provocam a compactação da subsuperfície. Para Silva & Cabeda (2006), em trabalho sobre tráfego de máquinas em cana-de-açúcar, o uso de grade nas operações de preparo do solo contribuiu para o aumento da compactação do solo em profundidade. Assim, no PC, tanto na rua trafegada como na linha sem tráfego, os valores de densidade do solo foram elevados na camada superficial e nota-se um aumento da RP a partir da camada de 0,10 a 0,20m. Resultados semelhantes foram encontrados em Latossolo Vermelho de textura média por Marasca et al. (2015), o qual verificaram menores valores de índice de cone nas entrelinhas do preparo canteirizado (1,2 MPa) em relação a mesma posição no preparo convencional do solo (3,4 MPa), enquanto que a nas ruas de tráfego agrícola relataram elevada compactação do solo.

Considerando que os valores de umidade do solo do solo obtidos nas diferentes distâncias da soqueira não apresentaram diferença significativa (Figuras 4B, 5B, 6B e 7B), assume-se que as variações nos valores de resistência à penetração (RP) observadas são resultantes da mobilização efetuada pelos tipos de preparo do solo e da compactação provocada pelo tráfego de máquinas no local.

Na linha não trafegada (canteiro) no PPC (Figura 4A) são observadas diferenças de RP nas camadas de 0,15-0,20 m e 0,25-0,30 m entre as distâncias de 0,15 e 0,45 m e de 0,45 e 0,75 m da soqueira de cana-de-açúcar, respectivamente. A maior resistência do solo à penetração na distância de 0,15 m da soqueira indica, possivelmente, a efemeridade da pulverização do solo realizada pela enxada rotativa na camada de 0,00-0,40 m. Assim, as partículas do solo podem ter se reorganizado mais rapidamente 16 meses após o preparo dos canteiros, nos pontos amostrais mais próximos às plantas de cana-de-açúcar, possivelmente pelo efeito da sulcação para o plantio e tratos culturais.

A partir da profundidade de 0,40 m são observadas diferenças no perfil de resistência do solo à penetração entre a posição central (0,45 m) da soqueira e suas adjacentes (0,15 e 0,75 m). Na posição central da soqueira os valores de resistência são menores devido ao rasgo no solo provocado pela haste sulcadora

até 0,80 m de profundidade. Efeito residual da subsolagem foi observado em 16 meses após o preparo do solo.

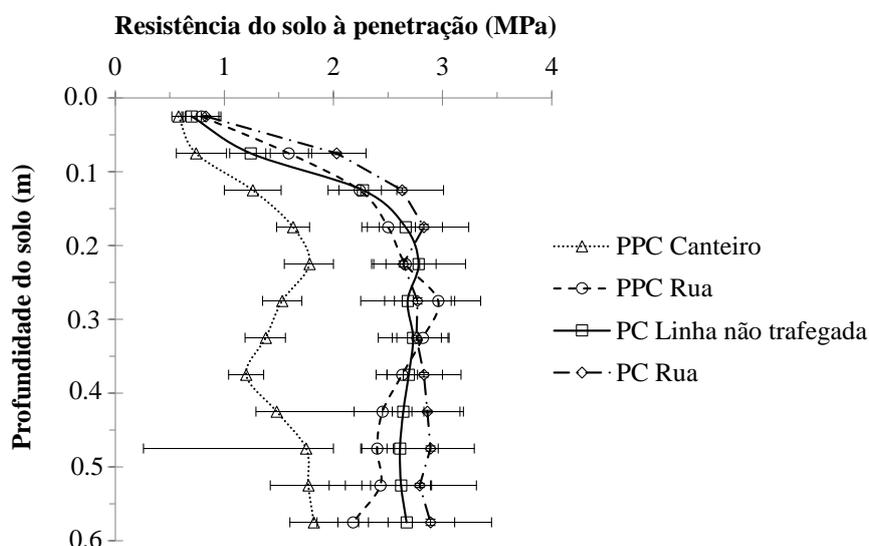


Figura 3 - Valores médios da resistência do solo à penetração no preparo profundo canteirizado, canteiro (PPC-CANT) e faixa trafegada (PPC-RUA), e no preparo convencional, na faixa não trafegada (PC-FNT) e na faixa trafegada (PC-RUA), em Nitossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar.

Portanto, as diferenças encontradas entre as distâncias de 0,15; 0,75 e 0,45 m na camada de 0,40-0,45 m, e distâncias de 0,75 e 0,45 m nas camadas de 0,45-0,50 m e 0,50-0,55 m são reflexo da configuração tridimensional da descompactação realizada pelos implementos utilizados no preparo profundo do solo. Da superfície do solo até a profundidade de 0,40 m houve tendência de uniformidade na pulverização do solo realizada pela enxada rotativa dentro da entrelinha não trafegada e de 0,40 a 0,80 m houve fraturamento do solo ocasionado pelo subsolador originando um perfil trapezoidal de resistência do solo à penetração.

Os mecanismos de afrouxamento da estrutura da enxada rotativa e fraturamento do solo pelo subsolador alteraram efetivamente a densidade do solo no PPC-CANT (Figura 4C), modificando as condições que favorecem o crescimento radicular e não apresentando valores limitantes de densidade do solo, entre 1,4 a 1,6 Mg m⁻³ para solos argilosos segundo Veihmeier & Hendrickson (1948).

No entanto, o manejo do solo com a enxada rotativa pulveriza o solo de modo que as alterações da geometria porosa podem ter efeitos deletérios sobre a qualidade física do solo. Concomitantemente, poderá ocorrer movimentação de partículas mais finas do solo (argila) para camadas mais profundas, favorecendo o bloqueio de poros e a redução da permeabilidade de sub-horizontes.

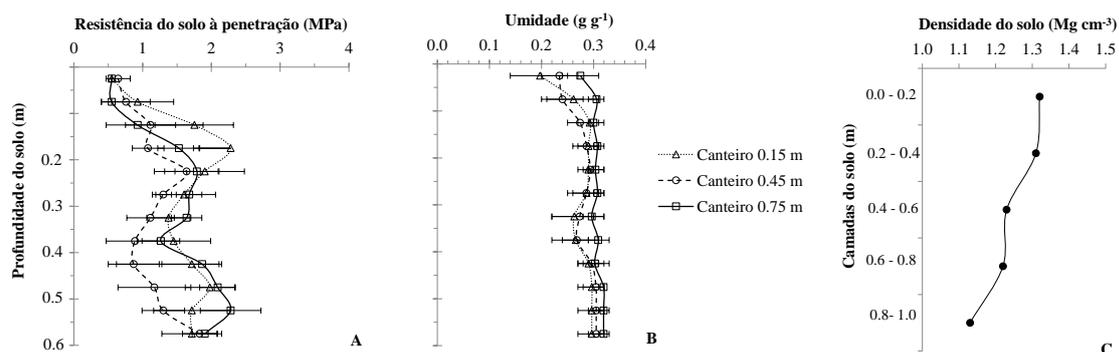


Figura 4 - Valores médios da resistência à penetração (A) e umidades do solo correspondentes (B) a três distâncias a partir da soqueira (0,15, 0,45 e 0,75m) e da densidade do solo (C) no canteiro do preparo profundo canteirizado (PPC).

Isso resultou na degradação da qualidade do solo, indicada pelo aumento da resistência do solo à penetração, principalmente até a profundidade de 0,30 m (Figura 4A), a qual apresentou valores de RP próximos a 3,0 MPa, que pode ser considerado limitante para várias culturas agrícolas (Taylor et al., 1966).

Por outro lado, os valores menores de RP observados na posição 0,15 m na linha de tráfego são resultantes do efeito de mobilização pelo preparo do solo realizado no canteiro, que o revolve em uma faixa com largura de 1,20m, aliado à sulcação de plantio, os quais se sobrepõem à faixa de tráfego agrícola.

A profundidade da compactação na linha de tráfego agrícola ficou limitada à superfície do solo (até 0,20 m). Isto é decorrente da história de tensão do solo, que experimentou movimentações superficiais com grades e arados bem como manejo de plantas daninhas, somada aos ciclos de umedecimento e secagem do solo no período que antecedeu a instalação do experimento, favorecendo o efeito *buffer*: quando a camada compactada na superfície do solo funciona como uma barreira limitadora da profundidade de transmissão de cargas advindas do tráfego agrícola (Veiga et al., 2008), o que tornou menos expressiva a compactação subsuperficial.

Esses resultados refletiram em maiores valores de Ds no PPC-RUA, os quais podem prejudicar o crescimento radicular, principalmente na camada de 0,0-0,2 m devido ao valor de Ds ser superior a 1,45 Mg m⁻³ (Figura 5C), quando as raízes não encontram condições de suprir a demanda da parte aérea das plantas por nutrientes em níveis satisfatórios (Fernandes et al., 1983). Costa et al. (2007) também encontraram densidade do solo (1,47 Mg m⁻³) desfavorável ao crescimento radicular de cana-de-açúcar na camada superficial de um Nitossolo Vermelho eutroférico. Por outro lado, nas camadas de 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m os efeitos da transmissão das pressões de contato não são mais pronunciados e as baixas densidades do solo devem-se ao caráter latossólico observado no Nitossolo do presente estudo.

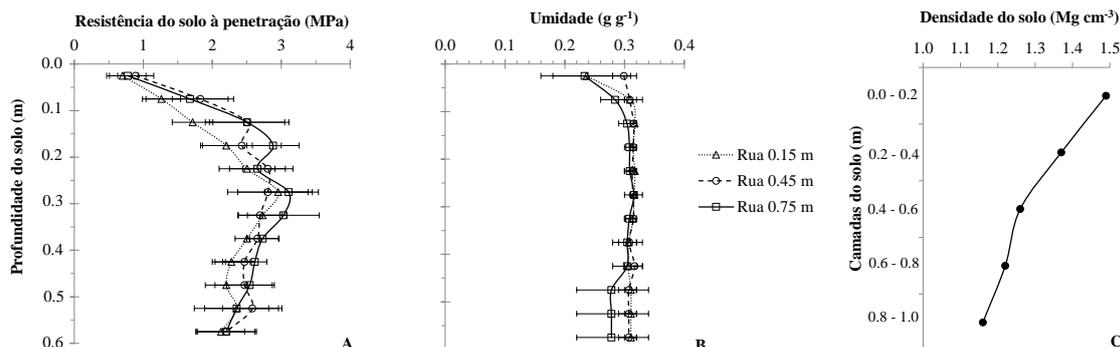


Figura 5 - Valores médios da resistência à penetração (A) e umidades do solo correspondentes (B) em três distâncias a partir da soqueira (0,15, 0,45 e 0,75m) e da densidade do solo (C) na rua do preparo profundo canteirizado (PPC).

Similarmente ao PPC, no PC a movimentação de máquinas e implementos agrícolas foi realizada exclusivamente sobre a rua, ficando a linha não trafegada sem receber as pressões exercidas pelo tráfego. Nessa linha não trafegada do PC, nas camadas de solo de 0,0-0,05 m e 0,10-0,15 m há diferenças entre as distâncias da soqueira, com menor RP na distância de 0,75m (Figura 6A).

Observa-se que o preparo do solo em área total com grade aradora e niveladora no PC eliminou os impedimentos físicos à penetração das raízes apenas até a profundidade de aproximadamente 0,15 m, visto que a partir dessa profundidade os valores de RP aumentaram. Tal fato pode ter sido ocasionado pela história de tensão do solo, o qual a quebra dos agregados da camada superficial do solo o tornou mais propenso à transmissão de cargas advindas do próprio preparo do solo e do tráfego, para o controle de pragas e plantas daninhas.

A densidade do solo na camada superficial do PC-FNT, segundo Veihmeier & Hendrickson (1948), é considerada crítica para solos argilosos, podendo restringir o desenvolvimento de culturas agrícolas (Figura 6C).

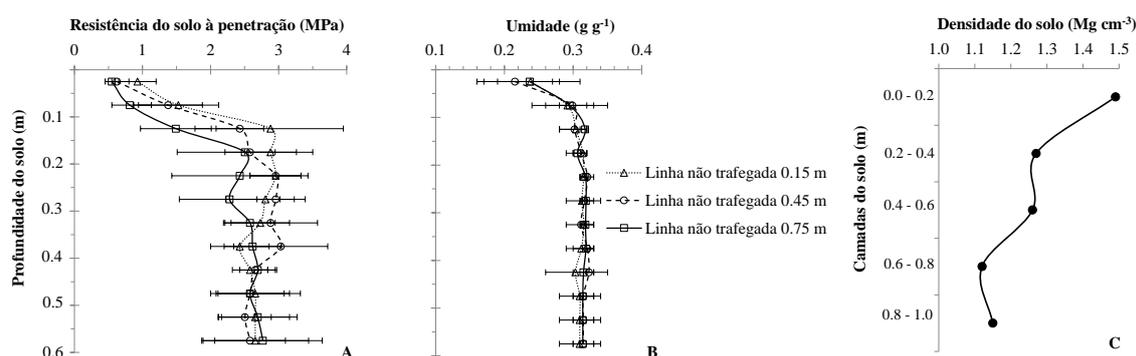


Figura 6 - Valores médios da resistência à penetração (A) e umidades do solo correspondentes (B) em três distâncias a partir da soqueira (0,15, 0,45 e 0,75m) e da densidade do solo (C) na faixa não trafegada do preparo convencional (PC).

Na linha de tráfego agrícola do PC não foram observadas diferenças entre as posições de amostragem em relação à soqueira (Figura 7A) e, da mesma forma que na linha não trafegada, a RP aumentou até a profundidade de 0,15m. Também a densidade na camada superficial (Figura 7C) apresentou valores restritivos para o crescimento de raízes nesse solo argiloso. Como o tráfego agrícola ocorre somente nas faixas de 1,5 m, a compressão do solo é mais intensa nessa área, ocasionado empacotamento das partículas do solo abaixo da camada mobilizada, caracterizando pé-de-grade a 0,2 m. Concomitantemente, isto facilita a tração de máquinas e equipamentos agrícolas; no entanto, menores volumes de raízes são esperados nesse local.

É esperado que o tráfego agrícola nas linhas de cana-de-açúcar provoque compactação (Souza et al., 2012; Otto et al., 2011). Souza et al. (2012) observaram maior compactação do solo na linha do rodado em tratamento cujo tráfego agrícola é direcionado em linhas permanentes. Para Braunack & McGarry (2006), o sistema de manejo com controle de tráfego alia uma melhor condição de tráfego na linha do rodado, facilitando a tração de máquinas e implementos, com uma melhor condição para o desenvolvimento das raízes na linha de plantio pela ausência de tráfego, favorecendo o desenvolvimento das culturas agrícolas. Conforme Suzuki et al. (2008), o aumento da densidade promove redução dos vazios do solo e aumento do grau de compactação, reduzindo o efeito da deformação plástica, favorecendo o tráfego de máquinas. Porém, valores elevados de densidade do solo podem limitar o crescimento radicular das plantas.

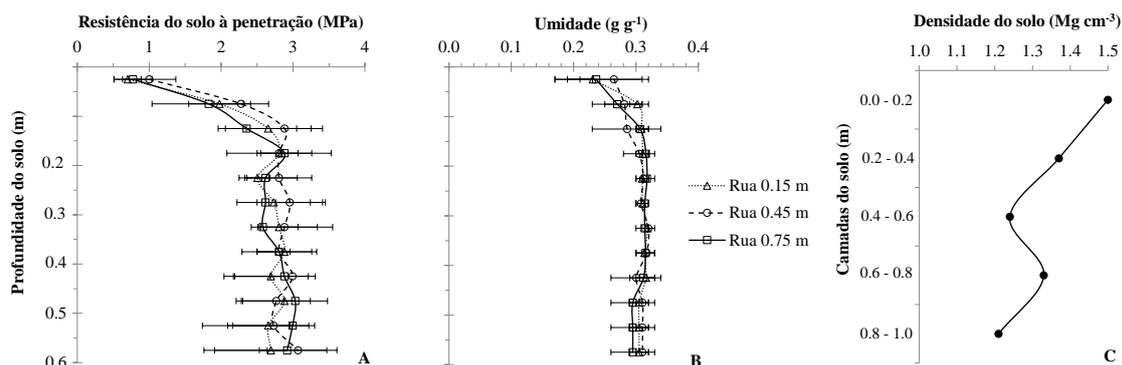


Figura 7 - Valores médios da resistência à penetração (A) e umidades do solo correspondentes (B) em três distâncias a partir da soqueira (0,15, 0,45 e 0,75m) e da densidade do solo (C) na rua do preparo convencional (PC).

Aspectos métricos do sistema radicular da cana-de-açúcar

A menor impedância mecânica observada no perfil de resistência do solo à penetração dos canteiros do PPC resultaram em melhor crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, verificada pelos resultados de maior massa seca de raízes nas camadas de 0,0-0,2, 0,2-0,4 e 0,6-0,8 m em relação à mesma posição do PC (Figura 8A). A pulverização do solo na camada superficial para construção dos canteiros com enxada rotativa no PPC resultou em aumento de 62% e 47% de massa seca radicular nas camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m, respectivamente, em relação à faixa não trafegada e preparada com grades do PC. Beutler & Centurion (2004) em Latossolo Vermelho de textura média também verificaram que no tratamento com solo revolvido e não trafegado ocorreu melhor distribuição do sistema radicular de soja

em relação aos tratamentos nos quais o solo foi compactado pelo trânsito de máquinas e equipamentos agrícolas.

Apesar da semelhança do comportamento das curvas de resistência do solo à penetração das ruas de tráfego agrícola (PPC-RUA e PC-RUA), maior massa seca radicular foi observada em todas as camadas do PPC (Figura 8B). Enquanto no PPC as operações agrícolas foram realizadas em uma única passagem do equipamento, no PC o manejo e preparo do solo foi realizado com mais de uma operação agrícola, elevando a frequência de carga dos rodados, somado a história de tensão da área. Os valores próximos a 3 MPa na camada de 0,0-0,2 m no PC-RUA reduziram 35% a massa seca radicular quando comparada à mesma camada do PPC-RUA.

Na avaliação da distribuição horizontal de raízes foi observada maior massa seca radicular no PPC-CANT na camada de solo de 0,2-0,4 m (Figura 8C). No PC-FNT, maior massa seca radicular pôde ser observada em todas as camadas de solo avaliadas (Figura 8D).

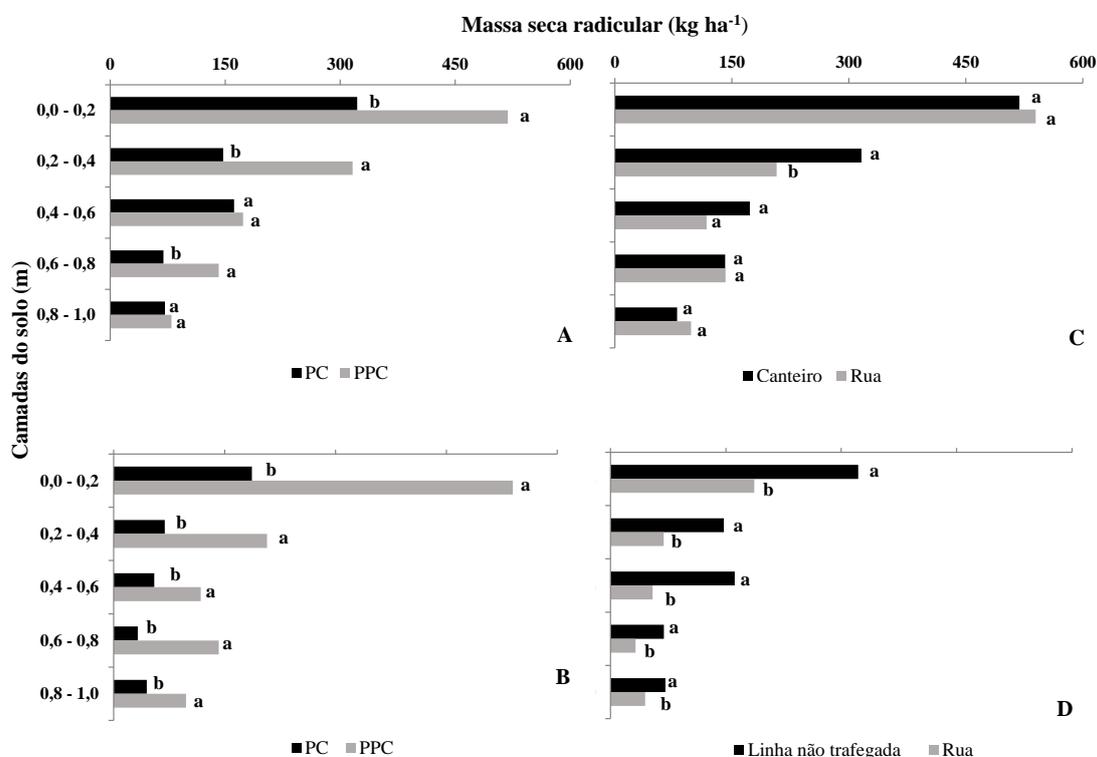


Figura 8 - Valores médios da massa seca radicular da cana-de-açúcar na faixa não trafegada (canteiro) (A) e na faixa trafegada (rua) (B), no preparo profundo canteirizado (PPC) (C) e no preparo convencional (PC) (D). Letras minúsculas comparam tipos de preparo do solo ou posições de amostragem em uma mesma camada do solo ($p < 0,15$).

O aumento em massa seca foi proporcionalmente acompanhado pelo aumento do comprimento de raízes. Nas camadas de 0,2-0,4, 0,4-0,6 e 0,8-1,0 m no canteiro do PPC houve comprimento de raízes maior em relação ao PC devido a menor impedância mecânica do solo à penetração das raízes (Figura 9A). Borges et al. (1988) trabalhando com soja e Bergamin et al. (2010) estudando o sistema radicular do milho, notaram que as raízes das culturas agrícolas desenvolveram-se melhor em pontos de menor resistência do

solo à penetração, e modificações na morfologia da raiz, como a redução no comprimento radicular foram observadas quando estas encontraram impedimento mecânico.

Nas camadas de 0,0-0,2 m e 0,6-0,8 m, a análise de ‘outliers’ diminuiu o número de repetições e, conseqüentemente, a população disponível para a aplicação do teste de médias, o que pode ter corroborado para a não detecção de diferenças entre os tratamentos experimentais. Na rua de tráfego agrícola, maiores comprimentos de raízes foram encontrados no PPC em relação ao PC em todas as camadas do solo (Figura 9B).

As raízes concentraram-se nos canteiros do PPC na camada de 0,2-0,4 m (Figura 9C). Mesmo com a log-transformação dos dados não foi possível detectar diferenças significativas nas demais camadas de solo. Contudo, observa-se diferença de 25% no comprimento de raízes no perfil do solo dentro do canteiro, em relação às ruas de tráfego agrícola. No PC foram observadas diferenças entre a faixa não trafegada e a rua de tráfego agrícola nas camadas de 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m em que as entrelinhas também apresentaram maiores comprimentos radiculares quando comparados às ruas de tráfego agrícola (Figura 9D). Em Latossolo Vermelho, Cury et al. (2014) verificaram que 25 a 30 % das raízes de cana-de-açúcar estão na entrelinha (0,6 m da soqueira) e 15 a 30 % estão abaixo de 0,60 m, indicando que as raízes da cana-de-açúcar exploram grande volume de solo.

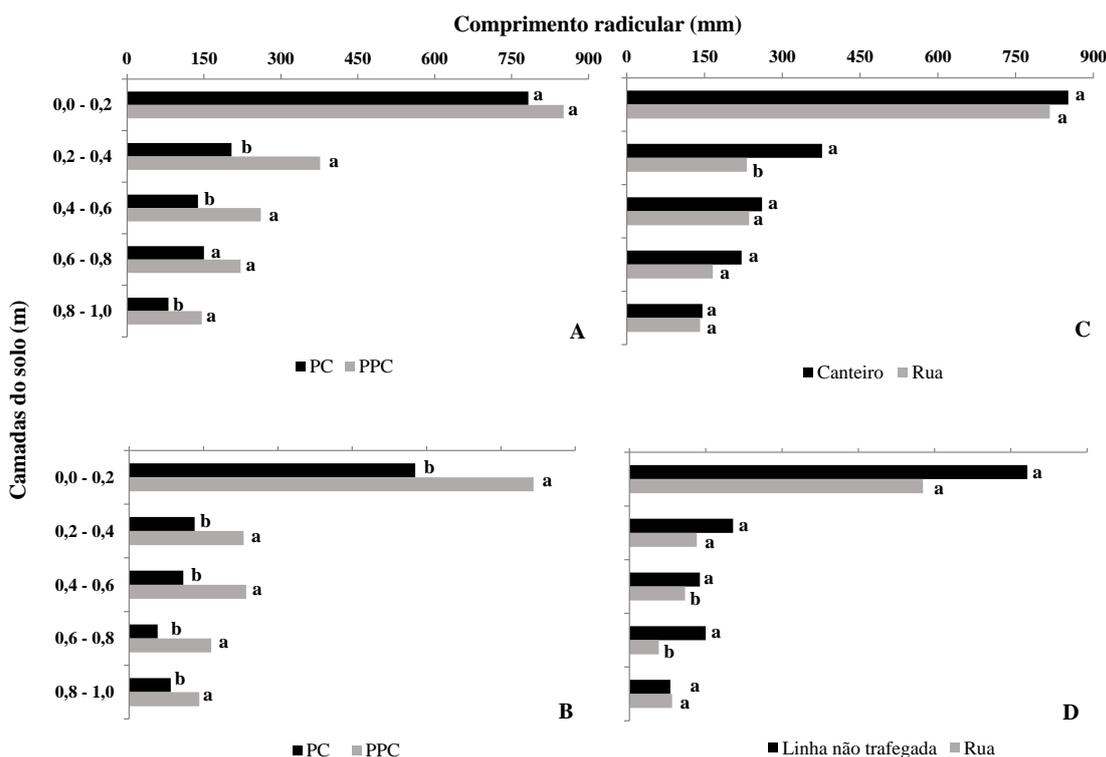


Figura 9 - Valores médios do comprimento radicular da cana-de-açúcar na faixa não trafegada (canteiro) (A) e na faixa não trafegada (rua) (B), no preparo profundo canteirizado (PPC) (C) e no preparo convencional (PC) (D). Letras minúsculas comparam tipos de preparo do solo ou posições de amostragem em uma mesma camada do solo ($p < 0,15$).

Quanto ao volume radicular (Figura 10A) observou-se que na camada de 0,2-0,4 e 0,8-1,0 m o PPC-CANT e na camada de 0,6-0,8 no PC-FNT apresentaram maior volume radicular. Nas ruas de tráfego agrícola maiores volumes radiculares foram observados no PPC, sendo que a camada de 0,6-0,8 m diferiu do PC (Figura 10B). A ausência de diferenças significativas para esse atributo pode ser atribuído ao acúmulo da variabilidade dos três atributos (altura, comprimento e profundidade) utilizados para cálculo do volume radicular. O CV de 205 % nos canteiros do PPC foi reduzido a 48%, porém, ainda é considerada uma variabilidade média, o que pode ter interferido na sensibilidade do teste de médias.

Analisando o efeito da posição de amostragem em cada tratamento, observa-se maior volume de raízes nos canteiros na camada de 0,0-0,2 m no PPC (Figura 10C). No PC-FNT as camadas de 0,0-0,2 e 0,4-0,6 m apresentam volume radicular maior, enquanto que na camada de 0,8-1,0 m o volume maior foi observado no PC-RUA.

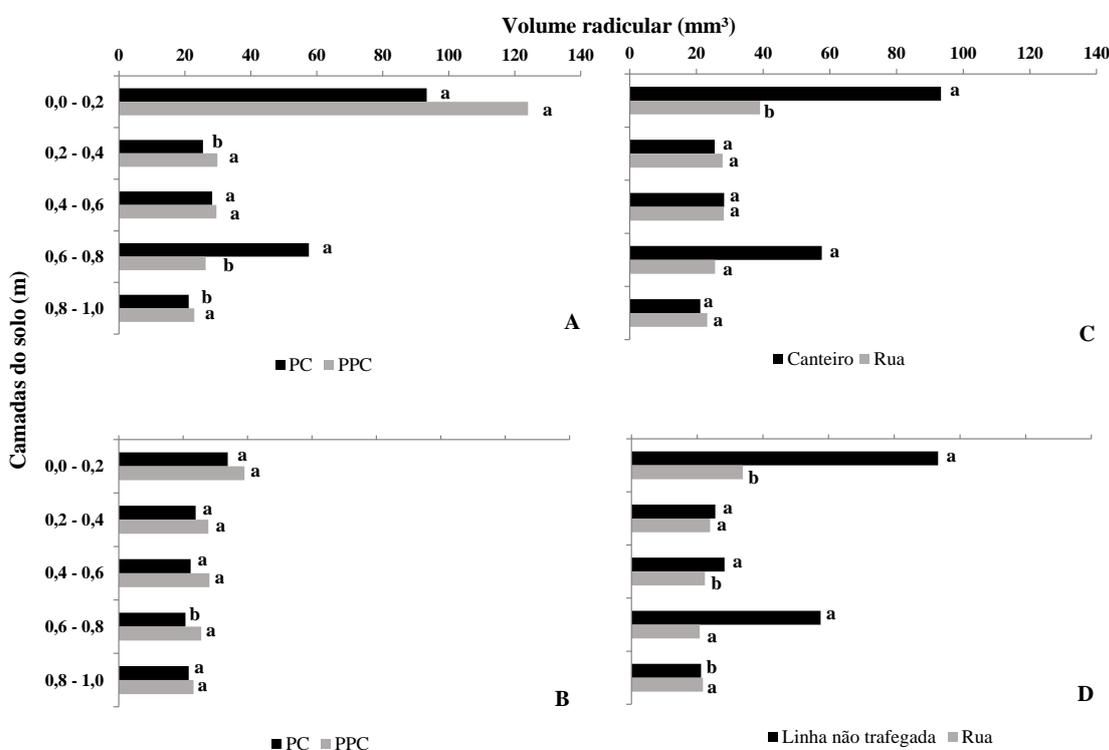


Figura 10 - Valores médios do volume radicular da cana-de-açúcar na faixa não trafegada (canteiro) (A) e na faixa trafegada (rua) (B), no preparo profundo canteirizado (PPC) (C) e no preparo convencional (PC) (D). Letras minúsculas comparam tipos de preparo do solo ou posições de amostragem em uma mesma camada do solo ($p < 0,15$).

As condições físicas do solo no PPC, notadas por menores valores de D_s e de RP , proporcionaram melhor desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar. O preparo profundo do solo antes da implantação da cultura beneficiou de forma significativa os atributos radiculares nos canteiros, onde ocorreu o manejo da adubação e descompactação mecânica do solo em profundidade.

No PPC-CANT, a mobilização do solo (localizada e combinada) até a profundidade de 0,8 m diminuiu os valores de RP e reduziu o grau de compactação do solo, considerando-se valores de $RP > 3,0$ MPa como limitantes ao desenvolvimento de culturas (Taylor et al., 1966). Além disso, a adubação realizada de forma localizada (dentro dos canteiros a 0,4 m de profundidade) elevou a soma de bases em relação ao mesmo local do PC (Tabela 1), o que pode ter contribuído para um melhor desenvolvimento de raízes e sua capacidade de explorar o solo em camadas mais profundas nos canteiros do PPC.

Nas ruas de tráfego agrícola, a pressão imposta ao solo pelos rodados das máquinas e implementos para preparo do solo no PPC aumentou a resistência do solo à penetração (Figura 4A), interferindo na massa seca de raízes (Figura 8), comprimento (Figura 9) e no volume radiculares (Figura 10).

Em contraste à posição de amostragem, a menor massa seca de raízes nos canteiros do PPC nas camadas de 0,0-0,2 e 0,8-1,0 m deve-se aos maiores comprimentos radiculares nas ruas para as classes de diâmetros $< 0,50$ mm e 0,51-1,0 mm, respectivamente. No PC, o preparo do solo em área total, seguido da passagem dos rodados das máquinas e implementos agrícolas em duas operações, alterou a densidade do solo, elevando a resistência do solo à penetração nas ruas de tráfego agrícola. Desta maneira, menores quantidades de raízes foram observadas, possivelmente devido a menor taxa de alongação celular em razão da diminuição na taxa de divisão celular do meristema em zonas compactadas.

A magnitude do volume radicular, em geral, segue aqueles do comprimento radicular, sendo os valores maiores desse atributo observados nos canteiros do PPC. No entanto, verificou-se aumento do volume radicular no PC na camada de solo de 0,6-0,8 m (Figura 10A). Essa diferença ocorreu devido ao maior comprimento de raízes com diâmetros de 1,01-2,00 e 2,01-3,00 mm no PC-FNT em relação ao PPC. Isto provavelmente está associado à ocorrência de pé-de-grade na profundidade de aproximadamente 0,2 m, dificultado as raízes penetrarem mais profundamente no solo. Com a diminuição do espaço poroso do solo, principalmente da macroporosidade, ocorre não somente a redução da quantidade de oxigênio, mas também da disponibilidade de água às raízes. Desta forma, para superar essas adversidades do ambiente edáfico, há modificações morfológicas e anatômicas das raízes (Carducci et al., 2014).

Quando esta situação ocorre, as raízes promovem maior desenvolvimento radicular na camada superior menos compactada, como forma de compensar a redução do desenvolvimento radicular na camada de solo compactada. No entanto, o aumento da resistência do solo à penetração numa determinada camada ao ponto de impedir a passagem da raiz principal leva à expansão de raízes laterais com diâmetros menores, que se proliferam e formam um sistema radicular muito denso e raso.

Em geral, as raízes desenvolveram-se melhor nos canteiros, principalmente no PPC, pois, além do preparo profundo do solo, essa região não é trafegada, favorecendo o crescimento do sistema radicular. O aumento do volume radicular nos canteiros do PPC na camada de 0,0-0,2 m em relação às ruas (Figura 10A) se deve ao maior comprimento de raízes com diâmetros de 1,01-3,00 mm.

Souza et al. (2012), estudando o sistema radicular da cana-de-açúcar relacionado à compactação do solo, verificaram menores atributos radiculares de cana-de-açúcar na faixa rodado e associou-os à limitações físicas do solo causadas pelo tráfego de máquinas. Incremento da compactação pode resultarem menor

densidade radicular e redução do volume de solo explorado pela cultura, podendo comprometer a produtividade agrícola (Braunack et al., 2006; Collares et al., 2008).

Em estudo com cana-de-açúcar e feijão e trigo Braunack et al. (2006) e Collares et al. (2008), respectivamente, verificaram que a maior compactação do solo resultou em menor volume de solo utilizado pelas culturas, o que ocasionou perda de produtividade. Faroni & Trivelin (2006) observaram redução de 91% na concentração do sistema radicular na faixa rodado, na camada de 0,0-0,2 m. Estes resultados são corroborados com os obtidos no presente estudo.

Para os preparos do solo percebe-se maior concentração de raízes na superfície do solo, que diminuem gradativamente em profundidade, o que pode favorecer uma maior absorção maior da água após uma precipitação, minimizando a evaporação. Em geral, o PPC proporcionou melhor expressão do sistema radicular da cana-de-açúcar, enquanto que no PC as raízes encontraram camadas de solo impeditivas ao seu crescimento, buscando estratégias alternativas, através do espessamento de suas raízes, numa tentativa de buscar os recursos físico-hídricos e nutricionais em outras porções do solo.

CONCLUSÕES

O sistema preparo profundo canteirizado promove ampla exploração do solo pelas raízes, ratificado pela maior massa radicular, tanto nos canteiros quanto nas ruas de tráfego agrícola, quando comparado com o preparo convencional do solo.

Os canteiros no sistema de preparo profundo canteirizado apresentam menor resistência do solo à penetração e maiores massa e volume radiculares em comparação à faixa não trafegada do sistema preparo convencional do solo e às faixas trafegadas dos dois sistemas.

As ruas de tráfego agrícola promovem menor comprimento radicular e maior resistência à penetração em comparação à respectiva faixa não trafegada, independentemente do sistema de preparo do solo avaliado.

No sistema preparo convencional do solo o tráfego de máquinas e implementos agrícolas, antes da implantação do experimento, mantém valores de resistência à penetração e de densidade do solo limitantes ao crescimento radicular abaixo da camada de 0-0,2 m na faixa não trafegada e rua de tráfego agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATKINSON, D. Root characteristics: Why and what to measure. In: SMIT, A. L.; BENGOUGH, A. G.; ENGELS, C. van NORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; van de GEIJN, S. C. (Eds.). **Root methods: A handbook**. Berlin:Springer-Verlag, 2000. p.305-341.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **ScientiaAgricola**, Piracicaba, v.58, n.3, p.555-560, 2001.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v.34, p.681-691, 2010.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, p.581-588, 2004.

BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; REGAZZI, A.J.; FERNANDES, B.; BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres, Viçosa**, v.35, p.553-568, 1988.

BRAUNACK, M. V.; ARVIDSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharumofficinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.89, p.103-121, 2006.

BRAUNACK, M. V.; MCGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharumofficinarum*) in Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.89, p.86-102, 2006.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2009. 77p. (Boletim técnico, 106)

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; ROSSONI D. F.; COSTA, A. L.; OLIVEIRA, L. M. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.270–278, 2014.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. 1.ed. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

CINTRA, F. L. D.; IVO, W. M. P. M.; SILVA, L. V.; LEAL, M. L. S. Distribuição das raízes de cana-de-açúcar em sistemas de cultivo com adubação orgânica e *crotalariaspectabilis*. Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2006. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 12.

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

COSTA, M. C. G.; MAZZA, J. A.; VITTI, G. C.; JORGE, L. A. C. Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 31 p.1503-1514, 2007.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.6, p.1007-1013, 2006.

FERNANDES, J.; RIPOLI, T. C.; MILLAN, M. A. A compactação do solo e a brotação das soqueiras. **Álcool & Açúcar**, v.3, n.12, p.12-17, 1983.

FERREIRA, D. F. **Manual do sistema Sisvar para análises estatísticas**. 1.ed. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2000. 66p.

JORGE, L.; RODRIGUES, A. Safira: sistema de análise de fibras e raízes. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 24.

LIBARDI, P. L.; PREVEDELLO, C. L.; PAULETTO, E. A.; MORAES, S. O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, n. 2, p. 85-90, 1986.

MARASCA, I.; LEMOS, D. V.; SILVA, R. B.; GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P. Soil compaction curve of an Oxisol under sugarcane planted after in-row deep tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1490-1497, 2015

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soilpenetrationresistancereducessugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.117, n.2, p.201-210, 2011.

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

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

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. 353p.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.921-930, 2006.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.4, p.603-612, 2012.

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**, Jaboticabal, v.34, n.1, p.31-38, 2008.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:963-973, 2008.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.3, p.229-235, 1991.

TAYLOR, H. M; ROBERSON, G. M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. **Soil Science**, Madison, v.102, p.18-22, 1966.

TREIN, C. R.; LEVIEN, R.; SOUZA, L. F. C. Tráfego controlado: pneus e compactação. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v.41, p.22-25, 2005.

TULLBERG, J. N. Tractor-based systems for traffic control in Australia. **Landwards**, v.52, p.12-15, 1997.

VALADÃO, F. C. A.; WEBER, O. L. S.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; SCAPINELLI, A.; DEINA, F. R.; BIANCHINI, A. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p.243-255, 2015.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A. **Fisiologia do sistema radicular**. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Eds.). Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agronômico, p.882, 2010.

VEIGA, M.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1437-1446, 2008.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Soil density and root penetration. **University of California**, 1:487-493, 1948.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Applications of soil physics**, New York, Academic Press, 1980. 319-344p.

ZONTA, E.; BRASIL, F. C.; GOI, S.R.; ROSA, M. M. T. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral das plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p.7-52.