

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E CRESCIMENTO RADICULAR DE SOJA EM LATOSSOLO ROXO SOB DIFERENTES MÉTODOS DE PREPARO DO SOLO⁽¹⁾

I. C. DE MARIA⁽²⁾, O. M. CASTRO⁽²⁾ & H. SOUZA DIAS⁽³⁾

RESUMO

A presença de camadas compactadas no solo, resultantes das operações de preparo, pode causar restrição ao crescimento radicular e, conseqüentemente, reduzir a produção. A determinação de atributos físicos do solo, entre eles a densidade e a resistência, tem sido utilizada para avaliar a compactação, visando a recomendações de manejo. Neste estudo, procurou-se determinar a relação entre esses atributos e o crescimento radicular, em um ensaio com cinco sistemas de preparo de solo e cultura de soja (*Glycine max* L.), localizado no município de Tarumã (SP), em Latossolo Roxo muito argiloso. As avaliações foram realizadas em janeiro de 1993, sete anos após o início do ensaio. Os sistemas de preparo combinaram preparos de verão e de inverno com grade pesada, arado escarificador e semeadura direta. O tratamento com semeadura direta, no verão e no inverno, apresentou valores elevados de resistência e densidade desde a superfície até 0,3 m, enquanto o tratamento com grade pesada apresentou valores elevados para esses parâmetros entre 0,1 e 0,2 m de profundidade, caracterizando camadas compactadas. Nos tratamentos com escarificação no verão, a resistência e a densidade do solo foram menores, com pequena diferença entre as profundidades analisadas. A semeadura direta apresentou maior densidade de raízes, seguida dos tratamentos com escarificação. Cerca de 50% do sistema radicular ficou concentrado na camada superficial do solo no tratamento com grade pesada, 40% no tratamento com semeadura direta e 30% com escarificador. As análises de regressão e correlação indicaram que, com o aumento da densidade do solo, a resistência e a umidade do solo foram maiores e, em decorrência dos valores obtidos no sistema de semeadura direta, a densidade radicular, nessas condições, também foi maior. A relação entre os parâmetros avaliados indicou que o sistema radicular foi reduzido em profundidade, quando a densidade e resistência foram elevadas na camada de 0,1-0,2 m ou quando foi alto o gradiente de densidade e resistência entre as camadas de 0,1-0,2 e 0-0,1 m. Os valores de resistência e densidade de um solo, tomados isoladamente, não puderam ser considerados como indicadores do crescimento de raízes.

Termos de indexação: sistemas de manejo, compactação, densidade de raízes, resistência do solo, densidade do solo.

⁽¹⁾ Trabalho apresentado no XXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Goiânia (GO), julho de 1993. Recebido para publicação em maio de 1997 e aprovado em abril de 1999.

⁽²⁾ Pesquisador do Instituto Agronômico de Campinas - IAC. Caixa Postal 28, CEP 13001-970 Campinas (SP), bolsista do CNPq.

⁽³⁾ Engenheiro-Agrônomo, Centro de Desenvolvimento Agropecuário do Médio Vale do Paranapanema. Caixa Postal 354, CEP 19800-000 Assis (SP).

SUMMARY: *SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND SOYBEAN ROOT GROWTH IN AN OXISOL UNDER DIFFERENT TILLAGE SYSTEMS*

Soil pans caused by tillage operation may restrict root growth thus reducing yield. Physical properties of soil such as bulk density and soil strength have been used as parameters for management decision in order to promote root growth. This work was carried out to evaluate the relationship among these soil parameters and root growth, in a 7 year field experiment with five soil tillage systems and soybean (Glycine Max L.). The tillage systems combined summer and autumn tillage with disk harrow, chisel plow and no-tillage treatments. Higher soil strength and bulk density were observed in no-tillage system in the 0-0.3 m layer and in conventional tillage in the 0.1-0.2 m layer. Root density was higher in no-tillage treatment compared with disk harrow treatment. Root concentration in the upper 0.1 m were of 50% at the disk harrow, 30% at the chisel plow and 40% in the no-tillage. Below 0.3 m there was no significant difference among the tillage systems for all parameters. Reduction on root growth was found when bulk density and soil strength were higher in the 0.1-0.2 m layer and the rate between 0.1-0.2 and 0-0.1 m layers were high.

Index terms: tillage systems, compaction, root density, penetration resistance, bulk density.

INTRODUÇÃO

As operações de preparo do solo são realizadas para criar condições favoráveis à germinação e ao crescimento radicular das culturas. Entretanto, as condições de umidade durante o preparo, o teor de argila e de matéria orgânica do solo, a profundidade de mobilização e o tipo de implemento utilizado podem levar a modificações da estrutura do solo, acarretando restrições ao crescimento das raízes.

É comum encontrar em áreas sob preparo convencional, com aração e gradagens, camadas compactadas próximas à superfície, formadas pelas rodas do trator, que exercem pressão sobre a camada não cortada pelos implementos, e pelo elemento cortante, que exerce pressão na área de contato entre as camadas mobilizadas e não mobilizadas (Camargo, 1983).

Quando são utilizados implementos de preparo com hastes, como nos arados escarificadores, não se observa a compactação. Assim, solos preparados com esse tipo de equipamento tendem a apresentar menores valores de resistência e densidade do solo, quando comparados com outros sistemas (Derpsch et al., 1986).

Contraopondo aos sistemas de preparo com mobilização total da camada superficial do solo, desenvolveu-se o sistema de semeadura direta, com mobilização apenas na linha de semeadura, mantendo a superfície coberta pelos restos da cultura anterior. Pode-se considerar como o principal efeito desse sistema a redução da erosão, mas ele apresenta, também, outras vantagens sobre os preparos convencionais, a saber: aumento no teor de matéria orgânica no solo e economia de combustíveis nas operações agrícolas. Entretanto, o

não-revolvimento do solo na semeadura direta provoca compactação da camada superficial, traduzida por aumento de densidade e redução da porosidade total do solo (Sidiras et al., 1982).

Uma das preocupações relacionadas com a compactação é o efeito sobre o crescimento radicular, sendo a relação entre esses parâmetros estudada com o intuito de determinar valores que restrinjam o crescimento das raízes (Rosolem et al., 1994; Alvarenga et al., 1996). A avaliação de atributos físicos do solo, como densidade e resistência, tem sido utilizada para determinar a presença de camadas compactadas (Sidiras et al., 1982; Blevins et al., 1983; Vieira & Muzilli, 1984; Centurion & Demattê, 1985; Castro et al., 1987), que funcionam como indicadores de restrição ao crescimento radicular.

Neste trabalho, foram determinados, em condições de campo, os atributos físicos do solo (densidade e resistência) e a densidade de raízes de soja, sob cinco sistemas de preparo do solo, com o intuito de verificar o efeito desses sistemas na compactação. Procurou-se verificar, também, a relação entre densidade, resistência e umidade, bem como a utilização desses atributos no crescimento radicular.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizadas avaliações de densidade e resistência do solo e de densidade de raízes de soja em ensaio localizado no Sítio Canaçu, em Tarumã (SP), em janeiro de 1993, no sétimo ano desde sua instalação. Utilizou-se um Latossolo Roxo distrófico muito argiloso que apresentou teores de argila, silte

e areia fina e areia grossa de 0,75; 0,20; 0,03 e 0,02 kg kg⁻¹, para o horizonte de 0-0,4 m respectivamente. Os cultivos alternaram milho e soja, no verão, e trigo e aveia preta, no inverno.

Os tratamentos, dispostos em faixa de 10 por 50 m, combinavam preparo primário do solo no verão e no inverno: grade pesada/grade pesada (GP/GP); escarificador/escarificador (ES/ES); escarificador/grade niveladora (ES/GN); escarificador/semeadura direta (ES/SD) e semeadura direta/semeadura direta (SD/SD). O grau de mobilização do solo diminuía do primeiro ao quinto tratamento. Com exceção do tratamento SD, todos os sistemas recebiam um preparo secundário com duas passadas de grade niveladora. A grade pesada utilizada tinha sete discos de 26" e a grade niveladora 32 discos de 18". O escarificador tinha sete hastes oblíquas, com 23 cm de espaçamento entre hastes e cerca de 30 cm de profundidade de trabalho. A semeadora utilizada em todos os tratamentos era uma máquina apropriada para semeadura direta, com quatro linhas e sistema de dois discos duplos, para semente e adubo.

A soja IAS-5 foi semeada em meados de novembro. Na amostragem, a cultura encontrava-se na fase de formação de vagens. As produções obtidas para GP/GP, ES/ES, ES/GN, ES/SD e SD/SD atingiram, respectivamente, 2.406, 2.522, 2.339, 2.661 e 3.379 kg ha⁻¹.

Foram abertas cinco trincheiras por tratamento, onde se determinaram as densidades do solo nas profundidades de 0,05, 0,15, 0,25 e 0,35 m, com anéis de 0,0001 m³ (0,04 m de altura por 0,0565 m de diâmetro). Os anéis foram introduzidos na parede da trincheira de forma a coincidir o centro do anel com as profundidades indicadas anteriormente. Utilizando os mesmos anéis, determinaram-se a umidade do solo no momento da amostragem, pelo método gravimétrico, e a umidade na capacidade de campo, pelo método da câmara de pressão (Richards, 1965), utilizando-se um potencial de -10 kPa.

Avaliou-se, também, a resistência do solo com penetrômetro de impacto, com cinco repetições em cada um dos cinco pontos de amostragem próximos às trincheiras e ao lado dos pontos de amostragem de raízes. A transformação dos valores de impactos por profundidade para resistência do solo (em MPa) foi feita pela equação apresentada por Stolf (1991). Os resultados foram apresentados em valores médios de resistência para cada 0,1 m de profundidade.

Também próximo às trincheiras, foram retiradas amostras de raízes com trado de bordas dentadas e 0,08 m de diâmetro, de acordo com o método de Fujiwara et al. (1994). As amostras foram retiradas nas profundidades de 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m, a 0,2 m da linha de plantio, e acondicionadas em sacos plásticos. O material coletado recebeu uma solução água-álcool para a conservação das raízes até a chegada ao laboratório. A separação das raízes foi feita manualmente por meio de dissolução e

fracionamento do solo em água abundante e pela suspensão e peneiramento das raízes, utilizando peneira com abertura de 0,5 mm. Após a separação, as raízes foram lavadas, colocadas em estufa a 60°C, por 24 h, e pesadas. Os resultados foram expressos em massa seca de raízes (Mg) por volume de solo (m³).

O dados foram, inicialmente, avaliados pela análise de variância e teste F, considerando os tratamentos de preparo e profundidade como fatores de variação. Quando a interação do tratamento de preparo e profundidade não foi significativa, foi feita nova análise de variância para comparar os tratamentos de preparo do solo em cada profundidade. A comparação entre as médias, quando o valor de F foi significativo, foi feita por diferença mínima significativa pelo teste de Tukey a 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade e resistência do solo

O efeito dos tratamentos de preparo na densidade do solo foi significativo a 5% pelo teste F. Houve efeito da profundidade do solo na camada de 0-0,10 m que apresentou valores significativamente mais baixos que as demais profundidades, mas não houve interação de tratamento e profundidade.

A densidade do solo (Quadro 1) foi mais elevada no tratamento SD/SD, com valores de 1,20 a 1,24 Mg m⁻³ entre 0 e 0,3 m, e, no tratamento GP/GP, com valores de 1,21 Mg m⁻³ na camada de 0,1-0,2 m. Nos tratamentos com escarificador, os valores de densidade não foram superiores a 1,13 Mg m⁻³.

Quadro 1. Densidade do solo, nos tratamentos combinando tipos de preparo de solo no verão/inverno: grade pesada (GP), escarificador (ES), grade niveladora (GN) e semeadura direta (SD), por profundidade e na média do perfil

Profundidade	Densidade do solo				
	GP/GP	ES/ES	ES/GN	ES/SD	SD/SD
m	Mg m ⁻³				
0,0-0,1	1,08 ab ⁽¹⁾	0,93 b	1,02 ab	0,97 b	1,20 a
0,1-0,2	1,21 a	1,00 b	1,13 ab	1,04 b	1,24 a
0,2-0,3	1,16 ab	1,01 b	1,11 ab	1,13 ab	1,23 a
0,3-0,4	1,12 a	1,06 a	1,10 a	1,19 a	1,17 a
Valor médio	1,14 ab	0,99 c	1,09 b	1,08 b	1,21 a

⁽¹⁾ Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% entre os tratamento em cada profundidade. Interação de tratamento e profundidade não-significativa. Coeficientes de variação de 8,1, 5,8, 6,3 e 6,6% nas profundidades de 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3-0,4, respectivamente.

Quadro 2. Resistência do solo, nos tratamentos combinando tipos de preparo de solo no verão/inverno: grade pesada (GP), escarificador (ES), grade niveladora (GN) e semeadura direta (SD), por profundidade e na média do perfil

Profundidade	Resistência do solo				
	GP/GP	ES/ES	ES/GN	ES/SD	SD/SD
m	MPa				
0,0-0,1	0,55 bC ⁽¹⁾	0,54 bB	0,49 bB	0,47 bB	1,95 aB
0,1-0,2	2,09 aA	1,16 bA	0,98 bA	1,41 bA	2,52 aA
0,2-0,3	1,86 aA	1,22 bA	1,02 bA	1,28 bA	1,90 aB
0,3-0,4	1,43 aB	1,43 aA	1,19 aA	1,38 aA	1,38 aC
Valor médio	1,48 b	1,09 c	0,92 d	1,13 c	1,94 a

⁽¹⁾ Letras minúsculas diferentes, na linha, e letras maiúsculas diferentes, na coluna, indicam diferença pelo teste de Tukey a 5%. Coeficiente de variação de 11,1%.

Da mesma forma, a resistência do solo (Quadro 2) foi mais elevada no tratamento SD/SD até 0,3 m, com valores de 1,90 a 2,52 MPa e, no tratamento GP/GP, entre 0,1 e 0,3 m, com valores de 1,86 e 2,09 MPa. O maior valor de resistência entre os tratamentos com escarificador foi de 1,41 MPa, no tratamento ES/PD, na camada de 0,1-0,2 m. Assim como para a densidade, entre 0,3 e 0,4 m, não houve diferença significativa entre os tratamentos.

Para a resistência do solo, entretanto, a interação de sistema de preparo e profundidade foi significativa a 1% pelo teste F. O comportamento dos três tratamentos de preparo que incluíam o arado escarificador foi semelhante: a profundidade de 0-0,10 m apresentou valores de resistência significativamente menores que as demais camadas. No tratamento GP/GP, as camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m apresentaram valores significativamente mais elevados que as demais, enquanto, no tratamento PD/PD, os valores foram significativamente mais elevados na camada de 0,10-0,20 m.

Os dois atributos do solo estudados foram igualmente adequados para indicar diferenças na estrutura do solo determinadas pelos cinco sistemas de preparo testados. Para caracterizar compactação, mostrando as diferenças entre as camadas de solo dentro do mesmo sistema, a resistência do solo apresentou melhores resultados.

Comparando sistemas de preparo do solo, via de regra, verificou-se que a densidade e a resistência do solo foram maiores na semeadura direta na camada mais superficial, enquanto, abaixo dessa camada, os valores desses parâmetros foram iguais (Blevins et al., 1983; Centurion & Demattê, 1985), superiores (Vieira & Muzilli, 1984) ou inferiores (Castro et al., 1987) aos valores encontrados nos sistemas convencionais. Neste trabalho, os valores foram maiores no sistema SD/SD até 0,3 m,

concordando com Vieira & Muzilli (1984). Nos sistemas SD/SD entre 0,1 e 0,2 m e GP/GP entre 0,1 e 0,3 m, caracterizou-se a presença de camadas compactadas, não-uniformes, por apresentarem valores variáveis ao longo de sua espessura.

Umidade do solo

Os resultados indicaram diferença significativa entre os tratamentos também para a umidade do solo, base volumétrica (Quadro 3), com valores mais elevados nos sistemas SD/SD até 0,3 m e GP/GP entre 0,1 e 0,3 m, correspondendo aos maiores valores encontrados para densidade e resistência do solo. A umidade na capacidade de campo foi significativamente maior nos sistemas SD/SD e GP/GP, em relação aos valores encontrados para os sistemas ES/ES e ES/SD nas camadas de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, indicando poros menores nesses sistemas. A umidade atual do solo em todos os sistemas estava abaixo da umidade na capacidade de campo, e a diferença entre esses dois parâmetros foi menor no sistema SD/SD, indicando maior umidade disponível no solo. A maior retenção de água no sistema de semeadura direta tem sido verificada por outros autores e apontada como uma das vantagens desse sistema (Blevins et al., 1983; Centurion & Demattê, 1985).

A correlação entre os dados de resistência (Ri), umidade gravimétrica (U) e densidade (Ds) foi positiva, isto é, as camadas mais compactadas apresentavam maior umidade volumétrica, de acordo com a equação de regressão: $Ri = -2,976 + 2,757Ds + 4,187U$, sendo os dois primeiros parâmetros (-2,976 e 2,757) significativos a 1% e o último parâmetro (4,187) significativo a 5% pelo teste t. O modelo foi significativo pelo teste F a 1%, com coeficiente de determinação de 0,42.

Essa afirmação parece contrariar o fato, já consolidado na literatura, de que, quanto maior a umidade do solo, menor é a resistência. Os resultados evidenciaram a condição de campo no momento da amostragem. A dependência da umidade em relação à densidade do solo e as dificuldades encontradas na obtenção de equações relacionando essas variáveis, utilizando dados de campo, foram discutidas, também, em Tormena & Roloff (1996). Provavelmente, se todas as camadas de solo estivessem na mesma condição de umidade, a resistência seria ainda maior nas camadas compactadas. Na amostragem, entretanto, a umidade das camadas compactadas era mais elevada, considerando a maior retenção de água devida à maior proporção de microporos e, no caso da semeadura direta, devida à menor evaporação e maior infiltração de água no perfil (Blevins et al., 1983).

Densidade de raízes

Os valores de densidade de raízes (Quadro 4) apresentaram alto coeficiente de variação em torno

de 50%. Considerando os valores obtidos em todas as profundidades, o tratamento SD/SD apresentou massa seca de raízes significativamente superior à do tratamento GP/GP, indicando haver alguma restrição às raízes no sistema com grade. Analisando cada profundidade, o teste estatístico indicou diferença significativa apenas na profundidade de 0,1-0,2 m, com o tratamento ES/ES revelando mais raízes que o tratamento GP/GP. Na semeadura direta, a densidade de raízes não diferiu significativamente da dos demais sistemas.

Na camada superficial (0-0,1 m), ficaram concentrados 50% do sistema radicular no tratamento GP/GP, 40% nos tratamentos SD/SD e ES/GN e 30% nos tratamentos ES/SD e ES/ES. Pode-se dizer que,

nos sistemas ES/SD e ES/ES, o sistema radicular da soja apresentou distribuição mais uniforme na camada de 0-0,4 m.

Os valores de densidade e resistência do solo que restringem o crescimento radicular variam entre os autores. Para a soja, Cintra & Mielniczuk (1983), trabalhando em Latossolo argiloso, encontraram restrição às raízes com valores de densidade de 1,3 Mg m⁻³ e de resistência de 1,08 MPa, enquanto Rosolem et al. (1994), trabalhando em Latossolo arenoso, encontraram restrição a partir de valores de densidade e de resistência (com penetrômetro de bolso) de 1,25 Mg m⁻³ e 0,75 MPa, respectivamente, e total impedimento com valores de 1,72 Mg m⁻³ e 2,0 MPa. Para outras leguminosas, Alvarenga et al.

Quadro 3. Umidade do solo (m³ m⁻³), nos tratamentos combinando tipos de preparo de solo no verão/inverno: grade pesada (GP), escarificador (ES), grade niveladora (GN) e semeadura direta (SD), por profundidade e na média do perfil

Profundidade	GP/GP	ES/ES	ES/GN	ES/SD	SD/SD
m	m ³ m ⁻³				
	Umidade atual				
0,0-0,1	0,295 b ⁽¹⁾	0,248 b	0,284 b	0,268 b	0,355 a
0,1-0,2	0,361 a	0,276 b	0,327 ab	0,287 b	0,368 a
0,2-0,3	0,371 ab	0,293 c	0,345 abc	0,333 bc	0,396 a
0,3-0,4	0,367 a	0,330 a	0,362 a	0,373 a	0,383 a
Valor médio	0,348 b	0,287 d	0,329 bc	0,315 c	0,376 a
	Umidade na capacidade de campo				
0,0-0,1	0,359 ab ⁽¹⁾	0,316 b	0,350 ab	0,317 b	0,389 a
0,1-0,2	0,412 a	0,339 b	0,384 ab	0,341 b	0,404 a
0,2-0,3	0,415 a	0,352 b	0,388 ab	0,373 ab	0,417 a
0,3-0,4	0,414 a	0,381 a	0,402 a	0,406 a	0,412 a
Valor médio	0,400 ab	0,347 d	0,381 bc	0,360 cd	0,405 a

⁽¹⁾ Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% entre os tratamento em cada profundidade. Interação de tratamento e profundidade não-significativa. Coeficientes de variação de 7,6, 7,3, 7,4 e 6,9%, para umidade atual, e de 7,8, 5,6, 6,7 e 5,5%, para umidade na capacidade de campo, nas profundidades de 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3-0,4, respectivamente.

Quadro 4. Densidade de raízes, nos tratamentos combinando tipos de preparo de solo no verão/inverno: grade pesada (GP), escarificador (ES), grade niveladora (GN) e semeadura direta (SD), por profundidade e na média do perfil

Profundidade	Densidade de raízes				
	GP/GP	ES/ES	ES/GN	ES/SD	SD/SD
m	Mg m ⁻³				
0,0-0,1	0,210 a ⁽¹⁾	0,217 a	0,208 a	0,130 a	0,304 a
0,1-0,2	0,098 b	0,286 a	0,184 ab	0,208 ab	0,220 ab
0,2-0,3	0,065 a	0,111 a	0,107 a	0,069 a	0,138 a
0,3-0,4	0,038 a	0,067 a	0,050 a	0,033 a	0,076 a
Valor médio	0,103 b	0,170 ab	0,137 ab	0,110 ab	0,185 a

⁽¹⁾ Letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% entre os tratamento em cada profundidade. Interação de tratamento e profundidade não-significativa. Coeficientes de variação de 53,5, 35,5, 58,7 e 60,2% nas profundidades de 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3-0,4, respectivamente.

(1996), em Latossolo argiloso, verificaram restrição às raízes com densidade de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ e resistência de $1,47 \text{ MPa}$.

Nos tratamentos estudados, a camada de $0,1-0,2 \text{ m}$, no sistema GP/GP, e a camada de $0-0,3 \text{ m}$, no sistema SD/SD, apresentaram valores de densidade e resistência potencialmente restritivos ao sistema radicular. No sistema GP/GP, verificou-se que valores de densidade de $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$ e de resistência de $2,09 \text{ MPa}$, na camada de $0,1-0,2 \text{ m}$, poderiam estar determinando redução do crescimento das raízes.

Na semeadura direta, entretanto, a densidade de raízes não foi reduzida, embora os valores de densidade e resistência fossem altos, principalmente quando comparados com os do tratamento GP/GP. A presença de maiores valores de densidade e resistência do solo em sistemas de preparo com menor mobilização do solo nem sempre ocasionou restrição às raízes. Vieira (1981) verificou maior volume de raízes em profundidade em sistema de semeadura direta comparado com sistema convencional, enquanto Merten & Mielniczuk (1991), comparando esses sistemas de preparo, não encontraram diferença estatística entre massa de raízes de soja. Lal (1978), Cannel (1981) e Camargo (1983) apontaram razões para essa ocorrência: a continuidade de poros formados por raízes que apodrecem e por minhocas e a maior umidade nos solos pouco mobilizados permitem o crescimento radicular.

A interpretação dos dados de densidade de raízes apresenta dificuldades, principalmente pela grande variação dos valores entre repetições, especialmente nos tratamentos com escarificador e na semeadura direta, onde a estrutura do solo não é uniforme. Todavia, pelos resultados obtidos, os valores de densidade e resistência do solo apresentados na literatura como restritivos ao sistema radicular não foram válidos para o sistema de semeadura direta, concordando com Ehlers et al. (1983). Esses autores propuseram valores restritivos diferentes para os preparos convencionais e para a semeadura direta.

Ainda, assim, procurou-se determinar a relação de dependência entre os atributos físicos e a quantidade de raízes por meio de análise de correlação, considerando os valores médios de cada variável, por tratamento e por profundidade.

A relação entre o crescimento radicular e os atributos avaliados mostrou que o sistema radicular foi reduzido entre $0,1-0,2 \text{ m}$, quando a densidade foi elevada nessa mesma camada, embora com baixo coeficiente de correlação ($r = -0,63$). A relação entre o gradiente de densidade do solo entre camadas e a densidade de raízes também apresentou coeficiente de correlação baixo ($r = -0,66$). A melhor correlação entre os atributos foi obtida, considerando o gradiente de resistência do solo entre as camadas de $0,1-0,2$ e de $0-0,1 \text{ m}$ e a densidade de raízes nas camadas de $0,2-0,3$ e $0,3-0,4 \text{ m}$ ($r = -0,91$). O gradiente

de resistência entre camadas de solo, que é a relação da resistência da camada inferior ($0,1-0,2 \text{ m}$) e a resistência da camada superior ($0-0,1 \text{ m}$), foi o melhor indicador de restrição às raízes nas condições deste trabalho. A utilização do gradiente de resistência entre camadas do solo como indicador de restrição ao sistema radicular já havia sido sugerido por Bacchi (1976), estudando efeitos de compactação em cana-de-açúcar.

Os tratamentos de preparo do solo utilizados neste trabalho determinaram modificações na estrutura do solo, resultando em camadas compactadas nos sistemas GP/GP e SD/SD, definidas, principalmente, pela resistência do solo. No sistema SD/SD, entretanto, as raízes não sofreram restrições em ambientes de densidade e resistência mais elevadas, comparativamente aos demais sistemas. Recomenda-se estabelecer limites para a compactação no sistema de semeadura direta e o monitoramento dos atributos do solo, do crescimento de raízes e da produção.

Por outro lado, a utilização do arado escarificador resultou em maior uniformidade do perfil e menores valores de densidade e resistência, indicando, também, maior porosidade do solo, mesmo em combinação com o sistema de SD no inverno. Pode-se considerar a possibilidade de utilização desse sistema, como recuperador da estrutura do solo, quando a densidade ou resistência do solo atingirem valores limitantes no sistema SD/SD.

CONCLUSÕES

1. Os valores de densidade e resistência do solo e de densidade de raízes indicaram que os tratamentos de manejo do solo alteraram suas condições físicas, além de afetar o sistema radicular.
2. Nos sistemas de preparo do solo, grade pesada e semeadura direta, houve compactação do solo entre $0,1$ e $0,3 \text{ m}$ e $0,1$ e $0,2 \text{ m}$, respectivamente, avaliada por meio da resistência do solo.
3. Maiores valores de resistência e densidade não determinaram, necessariamente, redução na densidade de raízes.
4. O melhor indicador de redução do sistema radicular foi o gradiente de resistência de solo entre as camadas de $0,1-0,2$ e $0-0,1 \text{ m}$.

LITERATURA CITADA

- ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W. & REGAZZI, A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. R. Bras. Ci. Solo, 20:319-326, 1996.

- BACCHI, O.O.S. Efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1976. 67p. (Tese de Mestrado)
- BLEVINS, R.L.; SMITH, M.S.; THOMAS, G.W. & FRYE, W.W. Influence of conservation tillage on soil properties. *J. Soil Water Conserv.*, 38:301-305, 1983.
- CAMARGO, O.A. Compactação do solo e o crescimento das plantas. Campinas, Fundação Cargill, 1983. 44p.
- CANNEL, R.Q. Soil cultural practices related to root development. In: RUSSEL, R.S.; IGUE, K. & MENTA, Y.R., eds. *The soil/root system in relation to brazilian agriculture*. Londrina, Fundação Instituto Agronômico do Paraná, 1981. p.61-80.
- CASTRO, O.M.; CAMARGO, O.A.; VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F. & CANTARELLA, H. Caracterização química e física de dois Latossolos em plantio direto e convencional. Campinas, Instituto Agronômico, 1987. 23p. (Boletim científico, 11)
- CENTURION, J.F. & DEMATTÊ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. *R. Bras. Ci. Solo*, 9:263-266, 1985.
- CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:197-201, 1983.
- DERPSCH, R.; SIDIRAS, N. & ROTH, C.H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and tillage techniques in Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.*, 8:253-263, 1986.
- EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.*, 3:261-275. 1983.
- FUJIWARA, M.; KURACHI, S.A.H.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M. & SAKAI, E. A técnica de estudo de raízes pelo método do trado. Campinas, Instituto Agronômico, 1994. 9p. (Boletim técnico, 153)
- LAL, R. Influence of within and between row mulching on soil temperature, soil moisture root development and yield of maize (*Zea mays* L.) in a tropical soil. *Field Crops Res.*, 1:127-129, 1978.
- MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Distribuição de sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistema de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:369-374, 1991.
- RICHARDS, L.A. Physical condition of water in soil. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical properties including statistical of measuring and sampling*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.128-151. (Agronomy Series, 9)
- ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S. & SACRAMENTO, L.V.S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. *Bragantia*, 53:259-266, 1994.
- SIDIRAS, N.; HENKLAIN, J.C. & DERPSCH, R. Comparison of three different tillage system with respect to aggregate stability, the soil and water conservation and the yields of soybean and wheat on an oxisol. In: CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANIZATION, 9., Osijek, 1982. *Anais. Osijek, ISTRO*, 1982. p.537-544.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:229-235, 1991.
- TORMENA, C.A. & ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:333-339, 1996.
- VIEIRA, M.J. Propriedades físicas do solo. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. *Plantio direto no estado do Paraná*. Londrina, 1981. p.19-32. (Circular IAPAR, 23)
- VIEIRA, M.J. & MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:873-882, 1984.