

INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO RELATIVA À LINHA DE CULTIVO SOBRE A DENSIDADE DO SOLO EM DOIS SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO⁽¹⁾

V. CORRECHEL⁽²⁾, A. P. SILVA⁽²⁾ & C. A. TORMENA⁽³⁾

RESUMO

A densidade do solo é um parâmetro de fácil quantificação, relacionando-se com outras propriedades intrínsecas, tais como: textura e teor de matéria orgânica. A distribuição do tamanho de poros, a resistência do solo à penetração das raízes e a água disponível também estão relacionadas com a densidade do solo. Na comparação entre sistemas de preparo, a densidade do solo tem sido usada freqüentemente. No entanto, não tem sido levado em conta o fato de que os sistemas de manejo do solo e das culturas contribuem para a variabilidade espacial da densidade do solo. Os fatores que causam essa variação são o tráfego das máquinas nas operações de manejo, os processos de secamento e umedecimento do solo e o efeito do sistema radicular das plantas. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a distribuição da densidade do solo em dois sistemas de manejo em um solo cultivado com milho. Foi estudado um Latossolo Roxo sob semeadura direta e preparo convencional do solo, amostrado em transeções perpendiculares às linhas da cultura de milho, permitindo obter amostras nas posições linha e entrelinha. Avaliaram-se os efeitos do sistema de preparo e da posição de amostragem sobre a densidade pelo teste t, enquanto a influência do preparo e da posição sobre a variação sistemática da densidade do solo foi avaliada pela análise espectral. Os resultados indicaram que a densidade do solo foi influenciada pela posição de amostragem, com maiores densidades na posição entrelinha do que na linha, independentemente do sistema de preparo. A variação da densidade do solo ocorreu de forma sistemática com a posição de amostragem.

Termos de indexação: variação sistemática, análise espectral, sistemas de preparo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado apresentada pelo primeiro autor ao Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP. Recebido para publicação em março e aprovado em outubro de 1998.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11. Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail:apisilva@carpa.ciagri.usp.br.

⁽³⁾ Professor do Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá. Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail:catormen@cca.uem.br.

SUMMARY: *INFLUENCE OF POSITION RELATIVE TO THE CROP ROW ON BULK DENSITY IN TWO TILLAGE SYSTEMS*

Bulk density is a soil parameter that can be easily measured, associated to other intrinsic soil properties such as texture and organic matter. Pore size distribution, soil resistance to root penetration, and available water are also related with bulk density. When comparing tillage systems, bulk density is frequently used. However, tillage and plant effects on bulk density variability have not been addressed. Bulk density variability is caused by traffic, wetting and drying processes, as well as root system activity. The overall objective of this research was to evaluate bulk density distribution in two tillage systems in a soil cropped with corn. The study was conducted on a heavy clay Oxisol under no-till and conventional tillage. Sampling was carried out on a transect that crossed the corn rows, taken at two positions (row and interrow). To assess the tillage and position effects on bulk density, t tests were used. Spectral analysis was performed to evaluate whether bulk density variability was systematic. The results indicated that bulk density was influenced by position regardless of the tillage system. Bulk density variability was systematic and it was related to position.

Index terms: systematic variability, spectral analysis, soil tillage systems, bulk density.

INTRODUÇÃO

O impacto das práticas de manejo e das culturas sobre a estrutura do solo pode ser quantificado por meio de diversos parâmetros, dentre os quais se destaca a densidade do solo devida à facilidade para a sua obtenção. As modificações na estrutura do solo, ocasionadas pelas práticas de manejo, influenciam a densidade, razão por que ela é freqüentemente utilizada na avaliação do grau de compactação (Soane et al., 1981; Vieira & Muzilli, 1984), da porosidade e de todos os parâmetros nos quais se usam medidas de volume do solo. A densidade do solo é fortemente relacionada com suas características intrínsecas: diminui com o aumento do teor de argila e matéria orgânica dos solos (Jones, 1983; Mairinque & Jones, 1991).

O tipo de preparo influencia a densidade do solo (Cintra et al., 1983; Merten & Mielniczuk, 1991; Albuquerque et al., 1995). No preparo convencional, a inversão da camada arável resulta na incorporação dos resíduos vegetais e na mobilização intensa do solo. Já na semeadura direta, a movimentação do solo ocorre apenas na linha de semeadura, permanecendo os resíduos vegetais sobre a superfície do solo.

Vários parâmetros da estrutura estão relacionados com a densidade do solo. A densidade é negativamente relacionada com a porosidade de aeração e positivamente relacionada com a resistência do solo à penetração das raízes (Archer & Smith, 1972; Ehlers et al., 1983; Silva et al., 1994). Os efeitos dos sistemas de preparo na variação da

densidade do solo podem ser manifestados de forma diferenciada de acordo com a intensidade de tráfego e a posição relativa à linha de semeadura (Kaspar et al., 1991; Kaspar et al., 1995). No entanto, há carência de trabalhos que abordem este tema (Cassel, 1982; Kaspar et al., 1995; Silva et al., 1997).

Este trabalho baseou-se na hipótese de que a densidade do solo varia com os sistemas de preparo do solo e com a posição relativa à linha da cultura. O objetivo geral do trabalho foi avaliar a distribuição da densidade do solo em dois sistemas de preparo num Latossolo Roxo, cultivado com milho.

Os objetivos específicos foram: (a) avaliar o efeito da posição relativa à linha de cultivo na variação da densidade do solo; (b) verificar se o efeito da posição relativa à linha de plantio depende do sistema de preparo do solo, e (c) verificar se a variação da densidade do solo ocorre de forma sistemática com a posição relativa à linha de cultivo.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido em agosto de 1996, na Fazenda Cachoeirinha, situada no município de Guaira (SP). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo subtropical com inverno seco (Cwa). O solo foi classificado como Latossolo Roxo, com granulometria na camada superficial composta por 60, 150 e 790 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente.

O relevo é suave ondulado, com colinas amplas e encostas convexas, uniformes e longas. O uso agrícola da região é bastante diversificado, predominando as culturas anuais, com destaque para soja, milho, feijão e tomate.

A área foi cultivada com milho inserto numa rotação envolvendo as culturas de soja e feijão, irrigadas por meio do sistema de pivô central. O talhão sob semeadura direta estava sendo realizado nesse sistema há quatro anos. No talhão sob o sistema de preparo convencional, o preparo primário do solo foi executado com grade Rome e o secundário com grade niveladora. As adubações de semeadura e de cobertura, bem como a eliminação das plantas invasoras, foram realizadas conforme recomendações técnicas para a cultura do milho (Fornasieri Filho, 1992; Lorenzi, 1994).

Amostras do solo com estrutura indeformada foram coletadas na área experimental utilizando anéis volumétricos (5 cm de diâmetro por 5 cm de altura), com auxílio de um amostrador, nos talhões dos sistemas de semeadura direta e de preparo convencional, na profundidade de 2,5 a 7,5 cm. No período de realização da amostragem, a cultura estava na fase de enchimento de grãos. Imediatamente após a coleta, as amostras foram envoltas em papel alumínio e transportadas para o Laboratório de Física do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP. A densidade do solo foi determinada conforme Blake & Hartge (1986).

As amostras foram coletadas ao longo de uma transeção perpendicular às linhas de plantio, tendo sido retiradas 47 amostras de solo na linha da cultura e 47 na entrelinha, totalizando 94 amostras, coletadas, seqüencialmente, em cada sistema de preparo do solo (Figura 1).

Para identificar o efeito da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo e verificar se

este efeito era dependente do sistema de preparo, foi feita análise dos dados por meio de comparação de médias (teste t). Para isto, foi utilizado o procedimento descrito pelo SAS (1991). Verificado o efeito da posição relativa à linha de cultivo na densidade do solo, fez-se uso da análise espectral para identificar se a variação da densidade ocorria de forma sistemática em relação à posição de amostragem.

A análise espectral é uma ferramenta estatística que possibilita identificar a concentração da variância dos dados em determinadas frequências e, assim, reconhecer uma possível periodicidade das variáveis analisadas, a qual pode ser descrita por meio da análise harmônica de Fourier (Davis, 1986). Uma variável medida ao longo de uma distância finita, em intervalos igualmente espaçados, pode ser representada por uma série ortogonal finita de Fourier:

$$Z_j = \sum_{K=1}^{N/2} [A_k \text{sen}(2\pi jK/L) + B_k \text{cos}(2\pi jK/L)] + A_0 \quad [1]$$

em que Z_j = observação até a posição j na transeção, $j = 1, 2, \dots, N$; L = período máximo igual ao comprimento da transeção; K = número harmônico igual aos ciclos completados no comprimento da transeção; A_k, B_k = coeficientes da série de Fourier e A_0 = valor médio de Z . Os coeficientes da série de Fourier podem ser calculados diretamente por:

$$A_k = (2/N) \sum_{j=1}^N Z_j \text{sen}(2\pi Kj/L) \quad [2]$$

$$B_k = (2/N) \sum_{j=1}^N Z_j \text{cos}(2\pi Kj/L) \quad [3]$$

No primeiro par harmônico ($K = 1$), seno e co-seno têm uma frequência cíclica igual a L^{-1} (período igual ao comprimento da transeção), a qual é chamada de frequência cíclica fundamental. No último par

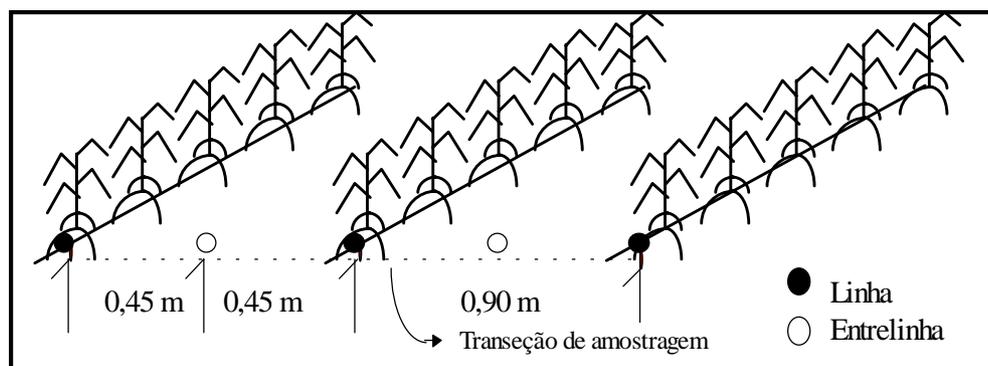


Figura 1. Esquema de coleta das amostras com estrutura indeformada em um Latossolo Roxo ao longo de um traçado perpendicular às linhas de cultivo, na linha e entrelinha.

harmônico ($K = N/2$), seno e co-seno têm uma frequência cíclica igual a $N/2L$ (período igual ao dobro do intervalo de amostragem), a qual é chamada de frequência Nyquist (Brillinger, 1981).

A frequência Nyquist e a frequência cíclica fundamental evidenciam as frequências máximas e mínimas que podem ser discriminadas e determinadas diretamente pelo intervalo de amostragem e pelo comprimento da transeção. A variância (V_k) do termo K harmônico é dado por (Panofsky & Brier, 1968), ou seja:

$$V_k = (A_k^2 + B_k^2)/2 \quad [4]$$

Como os pares harmônicos de Fourier são ortogonais, cada frequência separada contribui com uma proporção individual da variância total relativa à variável observada. Um gráfico da V_k versus a frequência do termo K harmônico é chamado de periodograma (Brillinger, 1981).

A partir da densidade do solo, foram obtidas estimativas da porosidade de aeração e da resistência do solo à penetração. A porosidade de aeração foi calculada como sendo a diferença entre a porosidade total e o conteúdo de água no potencial de $-0,033$ MPa, o qual foi estimado, para todas as amostras, a partir da curva de retenção de água do solo (dados não mostrados). A resistência à penetração foi estimada para cada amostra, num conteúdo de água equivalente ao potencial de $-0,7$ MPa, a partir do modelo desenvolvido por Correchel et al. (1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os momentos estatísticos da densidade do solo, que indicam a variabilidade espacial dos dados, são apresentados na figura 1. A maior amplitude de variação entre valores de densidade do solo (valores máximos e mínimos) foi obtida na linha da sementeira direta, seguida pela entrelinha do preparo convencional. O coeficiente de variação, em torno de 5%, e a distribuição normal dos valores de densidade do solo estão de acordo com os resultados obtidos por Nielsen et al. (1973) e Silva et al. (1997).

A densidade do solo média foi de $1,16 \text{ Mg m}^{-3}$, na sementeira direta, e de $1,13 \text{ Mg m}^{-3}$, no preparo convencional, as quais são estatisticamente diferentes ($t = 3,01$, $p < t = 0,0030$). Os maiores valores da densidade do solo no sistema de sementeira direta confirmam os resultados obtidos por outros autores (Pidgeon & Soane, 1977; Vieira & Muzilli, 1984; Silva et al., 1997).

Pidgeon & Soane (1977) e Unger (1996) demonstraram que a maior densidade do solo na sementeira direta é limitada aos primeiros 15 cm de profundidade, principalmente em áreas em que esse

Quadro 1. Momentos estatísticos dos dados de densidade do solo para os dois sistemas de preparo do solo e as duas posições em relação à linha de cultivo

Parâmetro	SD - L	SD - EL	PC - L	PC - EL
N	47	47	47	47
Média	1,13	1,19	1,09	1,16
Desvio-padrão	0,0632	0,0593	0,0561	0,0736
Mínimo	0,95	1,07	0,93	1,02
Máximo	1,27	1,32	1,22	1,33
C.V.	5,612	5,001	5,147	5,348
W	0,9718	0,9737	0,9814	0,9784
$p > W$	0,4590	0,5099	0,7935	0,6892

SD = sementeira direta; PC = preparo convencional; L = linha; EL = entrelinha; C.V. = coeficiente de variação; W = estatística de Shapiro-Wilk; $p > w$ = probabilidade de distribuição normal.

sistema de preparo está instalado há pouco tempo, situação correspondente à da área amostrada (quatro anos sob sementeira direta). Resultados diferentes foram obtidos por Hill & Cruse (1985), Merten & Mielniczuk (1991) e Albuquerque et al. (1995), os quais não observaram diferenças significativas na densidade do solo entre a sementeira direta e o preparo convencional. Vale destacar que os referidos trabalhos não consideraram a posição relativa à linha de cultivo.

A diferença na densidade do solo, entre os sistemas de preparo, foi dependente da posição relativa à linha de cultivo (Quadro 1). Comparando a densidade do solo entre os sistemas de preparo em relação ao efeito da linha da cultura, observou-se que a densidade do solo na sementeira direta foi maior do que no preparo convencional ($t = 2,97$ e $p < t = 0,0038$). Por outro lado, a densidade na sementeira direta não diferiu significativamente ($t = 1,87$, $p < 0,07$) da densidade no preparo convencional, quando a comparação foi feita na posição entrelinha, concordando com os resultados obtidos por Silva et al. (1997). É possível que a maior densidade do solo observada na linha na sementeira direta seja devida à menor intensidade de revolvimento do solo. No preparo convencional, a mobilização da camada arável em toda a área promove a fragmentação dos agregados, desfazendo esses efeitos e reduzindo a densidade inicial do solo por ocasião do preparo. O tráfego cumulativo na sementeira direta é fator que pode contribuir para tais resultados, acentuando os efeitos sobre a densidade do solo ao longo do tempo. Já a ação de raízes e organismos na zona de enraizamento das culturas é idêntica, tanto na sementeira direta como no preparo convencional.

A densidade do solo na entrelinha foi significativamente maior do que na linha ($t = 4,68$, $p < t = 0,0001$). O efeito da posição relativa à linha de plantio no sistema de preparo convencional pode ser observado na figura 1. Os resultados foram similares aos obtidos na semeadura direta. A densidade do solo média foi maior na entrelinha do que na linha ($t = 5,18$, $p < t = 0,0001$), comportamento também observado por Silva et al. (1997), em solos canadenses, sob semeadura direta e preparo convencional.

No preparo convencional, apesar de a camada superficial ter sido mobilizada por ocasião do preparo do solo, a maior densidade na entrelinha em relação à linha pode estar associada ao tráfego de máquinas. A maior densidade do solo devida ao tráfego nas entrelinhas também foi constatada por Fausey & Dylla (1984) e Bauder et al. (1985). Já na semeadura direta, apesar de não ser a camada superficial mobilizada, um sulco foi aberto no momento da semeadura, mobilizando o solo e reduzindo a densidade na linha, comparativamente à entrelinha. Os ciclos de secamento e umedecimento no solo também promovem este efeito, aumentando a densidade do solo na entrelinha, nos dois sistemas de preparo. Entretanto, a ação das raízes, melhorando a estrutura do solo na linha, pode compensar os efeitos do secamento e umedecimento do solo.

Embora a densidade do solo tenha sido maior na entrelinha do que na linha, o tráfego de máquinas e implementos não foi confinado a entrelinhas específicas, de forma que a densidade do solo no lado trafegado de uma linha de plantas pode ser muito maior do que no lado não trafegado da mesma linha

(Fausey & Dylla, 1984; Kaspar et al., 1991), alterando o padrão de distribuição das raízes das culturas.

Cassel (1982) revelou que amostragens aleatórias para quantificar a densidade do solo não permitem isolar o efeito da posição linha e entrelinha. A observação de que a densidade na entrelinha é maior do que na linha, nos dois sistemas de preparo do solo, requer uma análise mais detalhada. É importante verificar se esse comportamento é sistemático ou aleatório.

A figura 2 mostra a densidade do solo ao longo da transeção na semeadura direta e no preparo convencional. Os resultados obtidos da análise espectral são apresentados na figura 3, onde se destaca o pico localizado na frequência $1,11 \text{ ciclo m}^{-1}$, correspondente à distância de $0,45 \text{ m}$, a qual é equivalente ao espaçamento entre a linha e entrelinha na transeção de amostragem.

A maior proporção da variância ocorreu nas posições de amostragem, confirmando a variação sistemática da densidade do solo em relação à posição. Pode-se também observar (Figura 3) menor variância da densidade do solo no sistema de semeadura direta comparativamente ao preparo convencional. Esses resultados indicam que alguns cuidados devem ser considerados no planejamento da amostragem do solo.

Os resultados indicam que, ao longo da transeção perpendicular às linhas de cultivo (Figura 2), o aumento dos valores da densidade do solo na linha em relação à entrelinha pode estar restringindo ou limitando o desenvolvimento do sistema radicular das plantas de milho. Tal fato pode ser atribuído à relação da densidade do solo com outras

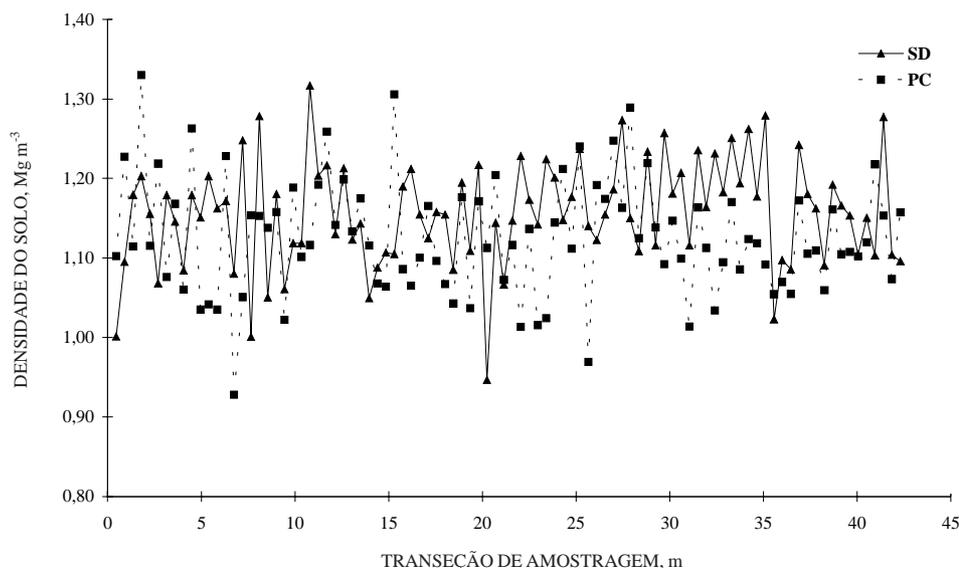


Figura 2. Densidade do solo ao longo da transeção de amostragem nos sistemas de semeadura direta (SD) e preparo convencional (PC) num Latossolo Roxo.

propriedades físicas do solo que influenciam diretamente o crescimento de raízes, como a aeração e a resistência do solo à penetração das raízes.

Para ilustrar os efeitos da densidade sobre a qualidade física do solo para o crescimento das plantas, as estimativas da porosidade de aeração (Figuras 4 e 5) e da resistência do solo à penetração das raízes (Figuras 6 e 7) são apresentadas.

Na semeadura direta, a porosidade de aeração foi maior na linha do que na entrelinha ao longo de quase toda a transeção de amostragem. Pode-se observar, na figura 4, que na 9ª posição (indicada por uma seta no gráfico) a porosidade de aeração foi de 19,6%, na linha, e de 9,1%, na entrelinha. Considerando 10% como um valor de porosidade de aeração limitante ao crescimento de plantas (Dexter, 1988), os resultados obtidos na entrelinha revelam uma possível restrição ao desenvolvimento radicular

decorrente da inadequada aeração. Isto também foi observado para outros pontos de amostragem ao longo da transeção estudada na semeadura direta, indicando que condições físicas limitantes ao crescimento radicular ocorrem com mais frequência na posição da entrelinha do que na linha da cultura.

Ao longo da transeção no preparo convencional (Figura 5), a porosidade de aeração foi menor na entrelinha do que na linha, embora, em pontos específicos da transeção, ela tenha sido maior na entrelinha de cultivo. As maiores amplitudes observadas neste sistema de preparo, em função das posições analisadas, estão presentes no 2º e no 17º ponto da transeção, em relação à planta na linha de semeadura. Nestas duas posições de amostragem, a entrelinha apresentou porosidade de aeração de 7,2 e 7,9%, respectivamente. Na semeadura direta, a frequência com que a porosidade de aeração ficou

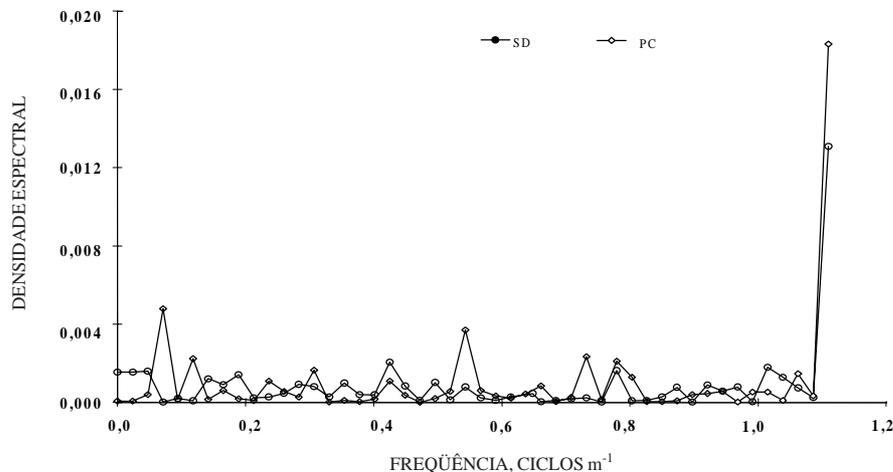


Figura 3. Densidade espectral da densidade do solo nos sistemas de semeadura direta (SD) e preparo convencional (PC) num Latossolo Roxo.

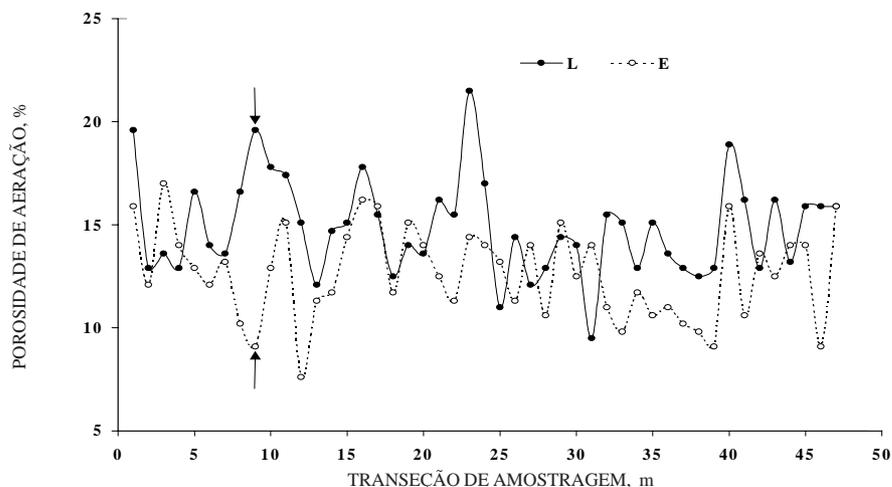


Figura 4. Porosidade de aeração na linha (L) e entrelinha (E) no sistema de semeadura direta ao longo de uma transeção perpendicular às linhas de cultivo em um Latossolo Roxo cultivado com milho, para umidade do solo equivalente à tensão de 0,033 MPa.

abaixo do limite crítico foi de 2,1 e 12,8% das amostras na posição linha e entrelinha, respectivamente. Por outro lado, no preparo convencional, 10,6% dos pontos apresentaram porosidade de aeração abaixo do limite crítico.

A resistência à penetração é outro parâmetro físico influenciado pela densidade do solo, que pode indicar limitação ao desenvolvimento do sistema radicular quando atinge valores próximos de 2,0 MPa (Allmaras & Logsdon, 1990). A resistência à penetração varia com a densidade e umidade do solo (Busscher, 1990). Na mesma área experimental, Correchel et al. (1997) ajustaram um modelo proposto por Busscher et al. (1990), para estimar a resistência à penetração, na semeadura direta (SD) e no preparo convencional (PC), considerando a densidade e a umidade do solo, descrito a seguir:

$$SD: RP = 0,0122 \cdot Ds^{8,2080} \cdot \theta^{-3,356}$$

$$PC: RP = 0,0094 \cdot Ds^{8,2080} \cdot \theta^{-3,356}$$

em que RP = resistência do solo à penetração (MPa), θ = umidade do solo ($cm^3 cm^{-3}$), Ds = densidade do solo ($Mg m^{-3}$).

A resistência à penetração devida à variação da densidade do solo foi estimada para um valor de umidade correspondente ao potencial matricial de -0,7 MPa. Esses dados são apresentados nas figuras 6 e 7, para os sistemas de preparo e posições avaliados.

No sistema de semeadura direta, a resistência à penetração na entrelinha apresentou valores acima de 2 MPa, o qual é considerado limitante ao desenvolvimento das raízes (Allmaras & Longsdon, 1990). Comparando a linha com a entrelinha (Figura 11), o 9º ponto, por exemplo, alcançou o valor de

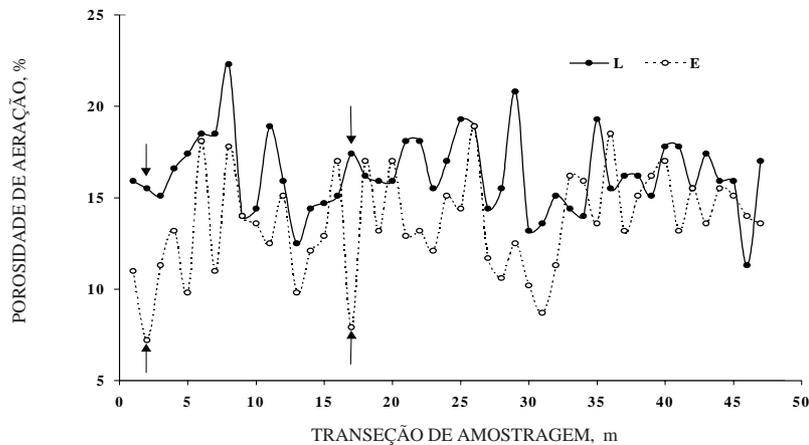


Figura 5. Porosidade de aeração na linha (L) e entrelinha (E) no sistema de preparo convencional ao longo de uma transeção perpendicular às linhas de cultivo em um Latossolo Roxo cultivado com milho, para umidade do solo equivalente à tensão de 0,033 MPa.

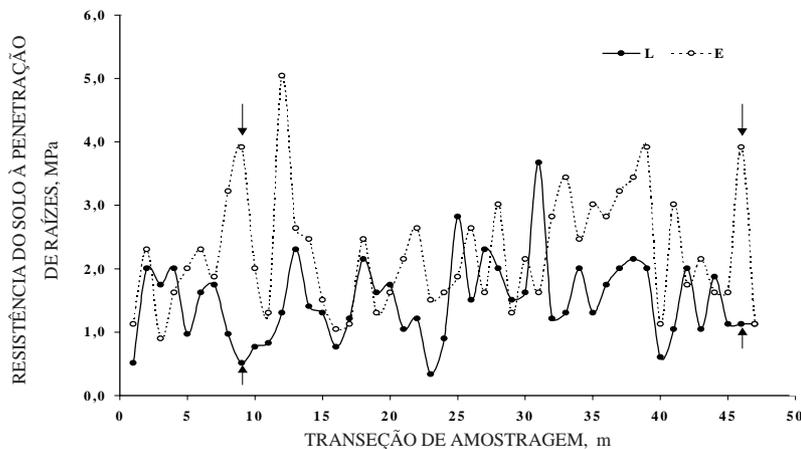


Figura 6. Resistência do solo à penetração de raízes na linha (L) e entrelinha (E) no sistema de semeadura direta ao longo de uma transeção perpendicular às linhas de cultivo em um Latossolo Roxo cultivado com milho, para umidade do solo equivalente à tensão de 0,70 MPa.

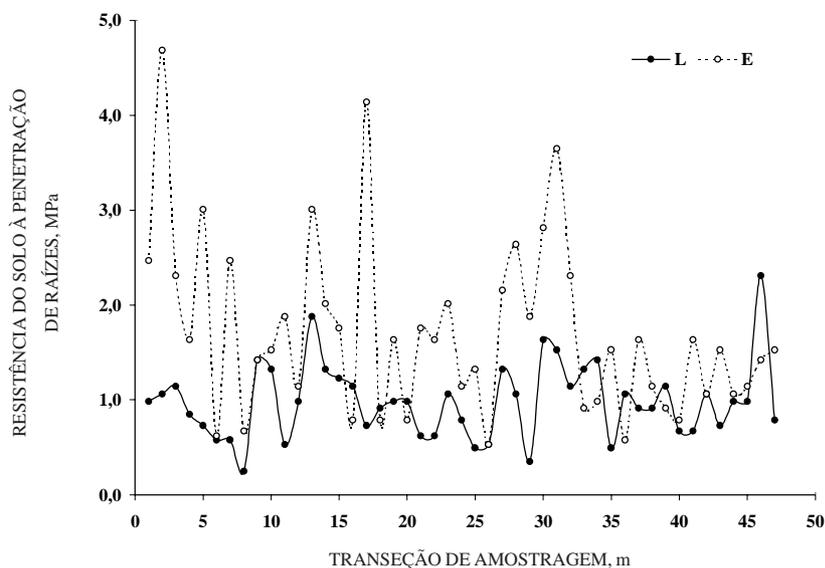


Figura 7. Resistência do solo à penetração de raízes na linha (L) e entrelinha (E) no sistema de preparo convencional ao longo de uma transeção perpendicular às linhas de cultivo em um Latossolo Roxo cultivado com milho, para umidade do solo equivalente à tensão de 0,70 MPa.

3,9 MPa, na entrelinha, e 0,5 MPa na linha. O mesmo ocorreu na 46ª posição, onde a linha apresentou uma resistência à penetração de 1,1 MPa contra 3,9 MPa na entrelinha. Na semeadura direta, cerca de 28 e 55% das amostras apresentaram resistência à penetração maior que 2 MPa, na linha e entrelinha, respectivamente. No preparo convencional, a proporção de amostras com elevada resistência foi bem menor: de 2%, na linha, e de 30%, na entrelinha.

CONCLUSÕES

1. A variação da densidade do solo no campo é influenciada pela posição relativa à linha de cultivo.
2. O efeito da posição relativa à linha de cultivo na distribuição da densidade do solo não depende do sistema de preparo do solo.
3. A densidade do solo varia de forma sistemática com a linha e entrelinha nos sistemas de preparo do solo semeadura direta e preparo convencional.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma estrutural do solo ao final de sete anos. R. Bras. Ci. Solo, 19:115-119, 1995.
- ALLMARAS, R.R. & LONGSDON, S.D. Soil structural influences on the root zone and rhizosphere. In: Rhizosphere dynamics. AAAS, 1990. p.8-54.
- ARCHER, J.R. & SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soils. J. Soil Sci., 23:472-480, 1972
- BAUDER, J.W.; RANDALL, G.W. & SCHULER, R.T. Effects of tillage with controlled wheel traffic on soil properties and root growth of corn. J. Soil Water Conserv., 2:382-385, 1985.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, ASA-SSSA, 1986. p.363-375.
- BRILLINGER, D.R. Time series, data analysis and theory. San Francisco, Holden-Day Ins. 1981. 500p.
- BUSSCHER, W.J. Adjustments of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. Am. Soc. Agric. Eng., 2:519-524, 1990.
- CASSEL, D.K. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. In: UNGER, P. & van DOREN, D.M.JR. eds. Predicting tillage effects on soil physical properties and process. Madison, ASA, 1982. p.45-68 (Special Publication, 44)
- CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. & SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 3:323-327, 1983.
- CORRECHEL, V.; SILVA, A.P.; TORMENA, A.C. & SANCHES, A.C. Resistência de um Latossolo Roxo ao penetrômetro em dois sistemas de preparo do solo. (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, Rio de Janeiro, 1997. Informação de solo na globalização do conhecimento sobre o uso das terras: resumos. Rio de Janeiro: SBSC, 1997. não paginado
- DAVIS, J.C. Statistics and data analysis in geology. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 383p.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. Soil Til. Res., 11:199-238, 1988.

- EHLERS, W.; KOPKE, W.; HESSE, F. & BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Til. Res.*, 3:261-275, 1983.
- FAUSEY, N.R. & DYLLA, A.S. Effects of wheel traffic along one side of corn and soybeans rows. *Soil Til. Res.*, 4:147-154, 1984.
- FORNASIERI FILHO, D. A cultura do milho. Jaboticabal, FUNEP, 1992. 273p.
- HILL, R.L. & CRUSE, R.M. Tillage effects on bulk density and soil strength of two Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:1270-1273, 1985.
- JONES, C.A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1208-1211, 1983.
- KASPAR, T.C.; BROWN, H.J. & KASSMEYER, E.M. Corn root distribution as affected by tillage, wheel traffic, and fertilizer placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:1390-1394, 1991.
- KASPAR, T.C.; LOGSDON, S.D. & PRIEKSAT, M.A. Traffic pattern and tillage system effects on corn root and shoot growth. *Agron. J.*, 87:1046-1051, 1995.
- LORENZI, H. Manual de identificação e controle de plantas daninhas: plantio direto e convencional. 4.ed. Nova Odessa, Plantarum, 1994. 229p.
- MAIRINQUE, L.A. & JONES, C.A. Bulk density of soil in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:476-480, 1991.
- MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 3:369-374, 1991.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. & ERH, K.T. Spatial variability of soil properties. *Hilgardia*, 42:215-259, 1973.
- PANOFSKY, H.A. & BRIER, G.W. Some applications of statistics to meteorology. University Park, Pennsylvania, 1968. 224p.
- PIDGEON, J.D. & SOANE, B.D. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley mono-culture system. *J. Agric. Sci.*, 88:431-442, 1977.
- SAS Institute. SAS/STAT procedure guide for personal computers. 5.ed. Cary, NC. 1991.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil Til. Res.*, 44:81-93, 1997.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W. & PAINTER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: a review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil Til. Res.*, 1:207-237, 1981.
- UNGER, P.W. Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. *Soil Til. Res.*, 37:67-75, 1996.
- VIEIRA, M.C. & MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. *Pesq. Agrop. Bras.*, 19:873-882, 1984.